



**GAZ ATOMİZASYONDA PARÇALANMA MEKANİZMASININ
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YARDIMIYLA İKİ FAZLI
OLARAK MODELLENMESİ**

Deniz AKTÜRK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANA BİLİM DALI**

**SİVAS BİLİM VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2022

Deniz AKTÜRK tarafından hazırlanan “GAZ ATOMİZASYONDA PARÇALANMA MEKANİZMASININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YARDIMIYLA İKİ FAZLI OLARAK MODELLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Emre YURTKURAN

Mekanik Anabilim Dalı, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Dr.Öğr.Üyesi Nazım BABACAN

Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr.Öğr.Üyesi Arif BALCI

Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı, Kafkas Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 19/12/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

.....

Doç. Dr. Emre BİÇER

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Deniz AKTÜRK

GAZ ATOMİZASYONDA PARÇALANMA MEKANİZMASININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YARDIMIYLA İKİ FAZLI OLARAK MODELLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Deniz AKTÜRK

SİVAS BİLİM ve TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Son yıllarda hızlı prototipleme, termal spreyleme, metal enjeksiyon kalıplama, soğuk veya sıcak izostatik pres, eklemeli imalat gibi üretim yöntemlerinin popülerleşmesi, bu üretim proseslerinin ham maddesi olan metal tozu üretim talebini artırmıştır. Gaz atomizasyon işleminde toz dağılımı kontrol edilebildiğinden, diğer metal tozu üretim prosesleri arasında en verimli metot olduğu belirtilmiştir. Gaz atomizasyonda optimizasyon çalışmalarında literatürde çoğunlukla sadece gaz akışının analiz edildiği tek fazlı modelleme çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmada ise parçalanma mekanizması üç farklı aşamada analiz edilmiştir. İlk olarak 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basınçlarında Prandtl-Meyer dalgaları, Mach diskleri, şok dalgaları, türbülans katmanı, sirkülasyon bölgesi ve durma noktası gibi gaz akış dinamiği parametreleri incelenmiştir. 2,5 ve 3 MPa’da gaz akış ayrımı oluşurken, 3,5 ve 3,7 MPa’da gaz akış ayrımının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca gaz giriş basıncı arttıkça şok dalgaları ve Prandtl-Meyer dalgalarının sayısının azaldığı ve atomizasyon hattı boyunca en yüksek kinetik enerjiye 3,7 MPa gaz giriş basıncının sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci adımında ise 3,7 MPa gaz giriş basıncında ergiyik metal-gaz etkileşimi iki fazlı olarak modellenmiştir. Birincil atomizasyonun başlangıç aşaması olan bu adımda elde edilen partikül boyutları 500 μm ve 1 mm şeklindedir. Son adımda ise birincil atomizasyonda elde edilen partiküller hesaplama alanında konumlandırılarak, ikincil atomizasyonda gaz ve ergiyik etkileşimi iki fazlı olarak modellenmiştir. Analizler sonucunda damlacıkların durma noktasına yaklaştıkça birbirlerine yapıştığı ve dolayısıyla bu noktanın uydulaşma başlangıç aşaması olduğu görülmüştür. Ayrıca parçalanmış damlacıkların durma noktasının aşağısında merkez eksenden dışa doğru savrulduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile gaz akış dinamiği ve ergiyik metal etkileşiminde parçalanma mekanizması detaylı olarak incelenmiştir.

Bilim Kodu : 91411

Anahtar Kelimeler : Gaz Atomizasyon, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, İki-Fazlı Akış

Sayfa Adedi : 138

Danışman : Dr.Öğr.Üyesi Emre YURTKURAN

TWO-PHASE MODELING OF THE BREAKUP MECHANISMS IN GAS ATOMIZATION WITH THE AID OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

(M. Sc. Thesis)

Deniz AKTÜRK

SİVAS UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

December 2022

ABSTRACT

In recent years, the popularization of production methods such as rapid prototyping, thermal spraying, metal injection molding, cold or hot isostatic pressing, additive manufacturing has increased the demand for metal powder. In gas atomization optimization studies, there are mostly single-phase studies in the literature. In this study, the fragmentation mechanism was analyzed in three different stages. Firstly, gas flow dynamics parameters such as Prandtl-Meyer expansion waves, Mach disks, shock waves, turbulence layer, circulation zone and stagnation point at 2,5; 3; 3,5 and 3,7 MPa argon gas inlet pressures were investigated. While gas flow separation occurs at 2,5 and 3 MPa, it has been observed that it does not occur at 3,5 and 3,7 MPa. In addition, it was determined that as the gas inlet pressure increased, the number of shock waves and Prandtl-Meyer waves decreased and the gas inlet pressure of 3,7 MPa had the highest kinetic energy along the atomization line. In the second step, the molten metal-gas interaction was modeled as two-phase at a gas inlet pressure of 3,7 MPa. The particle sizes obtained in this step are 500 μm and 1 mm. In the last step, the particles obtained in the primary atomization were positioned in the calculation area, and the gas and melt interaction in the secondary atomization was modeled as two-phase. As a result of the analysis, it was observed that the droplets adhered to each other as they approached the stagnation point, and therefore this point was the initial phase of satellite. In addition, it was observed that the fragmented droplets were directed outward from the central axis below the stagnation point. With the results obtained, the gas flow dynamics and the disintegration mechanism in the molten metal interaction are explained in detail.

Science Code : 91411

Key Words : Gas Atomisation, Computational Fluid Dynamics, Two-phase Flow

Page Number : 138

Supervisor : Asst.Prof. Emre YURTKURAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca emek ve bilgisini esirgemeyen, kıymetli tecrübeleriyle beni yönlendiren çok değerli danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi Emre YURTKURAN'a çok teşekkür ederim. Tezimi değerlendiren, yüksek lisans tez jürimde yer alan Dr.Öğr.Üyesi Nazım BABACAN ve Dr.Öğr.Üyesi Arif BALCI hocalarıma da değerli görüşleri ve katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemi sağlayan, her anımda yanımda olan, desteklerini her zaman hissettiğim ve çocukları olduğum için gurur duyduğum canım annem Hülya AKTÜRK ve canım babam Necati AKTÜRK'e tüm kalbimle teşekkür ederim. Ayrıca kardeşleri olduğum için kendimi çok şanslı hissettiğim, sevgilerini benden asla esirgemeyen ağabeyim Onur AKTÜRK ve ablam Ekin AKTÜRK'e canı yürekten teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1.GİRİŞ.....	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Atomizer Tipleri.....	5
2.1.1.Serbest düşmeli ve yakından eşlemeli atomizasyon.....	6
2.2. Gaz Atomizasyon Değişkenleri.....	6
2.2.1. Nozul tasarımı.....	6
2.2.2. Gaz akış analizleri	13
2.2.3. Partikül analizi	22
2.2.4. Deneysel araştırmalar	34
2.3.Parçalanma Mekanizması.....	45
2.3.1. Birincil atomizasyon.....	46
2.3.2. İkincil atomizasyon.....	49
3.MATERYAL VE YÖNTEM	53
3.1. Süreklilik, Momentum ve Enerjinin Korunumu Denklemleri	53
3.2.Türbülans Modelleri.....	54
3.2.1. Standart k- ϵ , RNG k- ϵ ve Realizable k- ϵ modelleri	55
3.2.2. Standart k-w, BSL ve SST k-w modeli	57
3.3. Multi-Faz Modelleri	59
3.3.1. Euler-Lagrange yaklaşımı.....	59
3.3.2. Euler-Euler yaklaşımı	60
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	65

4.1. Modelin ve Ağ Yapısının Oluşturulması	65
4.2. Tek Fazlı Gaz Akışının Hesaplama Akışkanlar Dinamiği ile Analizi	70
4.3. İki Fazlı Ergiyik Metal-Gaz Akışının Hesaplama Akışkanlar Dinamiği ile Analizi ...	83
4.3.1. Ağ yapısının oluşturulması ve analiz kabulleri	83
4.3.2. İki fazlı ergiyik metal-gaz akışında birincil atomizasyonun hesaplama akışkanlar dinamiği ile analizi	87
4.3.3. İki Fazlı Ergiyik Metal-Gaz Akışında İkincil Atomizasyonun Hesaplama Akışkanlar Dinamiği ile Analizi.....	96
5.SONUÇ VE ÖNERİLER	109
KAYNAKLAR.....	111
ÖZGEÇMİŞ.....	116

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Geliştirilen Simülasyon Sonuçları	23
Çizelge 2.2. Geliştirilen Simülasyon Sonuçları	28
Çizelge 4.1. Ağ yapısından bağımsızlık testi için kullanılan eleman sayıları	67
Çizelge 4.2. Seçilen ANSYS Fluent analiz parametreleri	71
Çizelge 4.3. Farklı gaz giriş basınçlarında Hat 2'e göre maksimum gaz hızları	79
Çizelge 4.4. İki fazlı analizler için kullanılan ANSYS Fluent parametreleri	86
Çizelge 4.5. Argon Özellikleri	86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. a) İç karıştırmalı atomizer b) Dış karıştırmalı atomizer	5
Şekil 2.2. Gaz akış dinamiği hız kontürleri a) DYN ve b) ITN dizaynı için	7
Şekil 2.3. Farklı nozul uzunluklarında oluşturulan tasarımlar	8
Şekil 2.4. 1 MPa gaz giriş basıncında farklı nozul tasarımları için gaz akış analiz sonuçları	9
Şekil 2.5. Yakınsak-İraksak nozulda nitrojen gazının farklı basınçlarda Schlieren görüntüleri (a) 2.06, (b) 2.41, (c) 2.75, and (d) 3.10 MPa	10
Şekil 2.6. Atomizer tasarımları sırasıyla (a) Y-jet, (b) OIG, (c) OIL, (d) CFT	11
Şekil 2.7. Zamana bağlı olarak partikül ligament parçalanma mekanizması	11
Şekil 2.8. Atomizerden boşaltılan sıvının örnek anlık görüntüleri. Çıkış ağzı çapları CFT, OIG ve OIL için 0,7 mm ve Y-jet atomizer için 1 mm.....	12
Şekil 2.9. HAD simülasyonundan (a) elde edilen gaz yoğunluğu gradyan kontur grafiği ve ilgili gölge grafiği görüntüsünün (b) karşılaştırılması.....	13
Şekil 2.10. Yakından eşlemeli gaz atomizasyonda gaz akış (HAD) hız gradyan sonuçları	14
Şekil 2.11. Sirkülasyon bölgesindeki gaz hız akışı.....	15
Şekil 2.12. Eriyik dahil edilmeden önce gaz akışının özellikleri ve (a) DYN ve (b) ITN'deki gaz hız değerlerinin kontürleri.....	15
Şekil 2.13. (a) DYN ve (b) ITN'deki başlangıç bölgelerine bağlı olarak bir damlacık için gaz akışı özelliklerinin ve yörüngelerinin karşılaştırılması.....	17
Şekil 2.14. Farklı atomizasyon gaz basınçlarında gaz akış hız grafikleri. (a) 15 atm; (b) 20 atm; (c) 25 atm; (d) dairesel bir nozuldan yalnızca gaz akışının Schlieren görüntüsü	18
Şekil 2.15. 4 MPa durgun basınçta simetri eksenı boyunca Mach sayısı değişimi	19
Şekil 2.16. Yakından eşlemeli atomizasyonda 5 ila 8 MPa arasında değişen gaz basınçlarında yüksek basınçlı gaz atomizasyon nozulunun HAD modeli (a) 5 MPa'da birincil ve ikinci sirkülasyon bölgesi; (b) 6 MPa'da birincil ve genişletilmiş ikinci sirkülasyon bölgesi; (c) 7 MPa'da birincil, ikinci ve üçüncü sirkülasyon bölgesi; (d) birincil, ikincisi 8 MPa'da genişletilmiş üçüncü sirkülasyon bölgesi.....	20
Şekil 2.17. Yakından eşlemeli gaz atomizasyonda dairesel yarık nozul	21
Şekil 2.18. Atomizasyon havzasında gaz akışı	22
Şekil 2.19. Gaz akış dinamiğinin hız kontürü (m/s)	23

Şekil 2.20. a) Boğaz köşesinde oluşan sirkülasyon bölgesi, b) Ergiyik tüpü çıkışındaki sirkülasyon bölgesi.....	25
Şekil 2.21. 1, 3 ve 5 mm çapında damlacıkların zamana bağlı olarak hız analiz grafiği.....	25
Şekil 2.22. 1, 3 ve 5 mm çapında damlacıkların toz partikül dağılımları	26
Şekil 2.23. a) Tek fazlı gaz akış analiz sonuçları, b) Çift fazlı ergiyik metal-gaz akışı sonuçları	27
Şekil 2.24. Farklı kütle oranlarında (m.s-1) hız kontür grafikleri a) 20 L.h-1, b) 30 L.h-1 c) 50 L.h-1	28
Şekil 2.25. 0.2 MPa atomizasyon basıncında damlacık dağılımlarının farklı kütle oranlarında deneysel ve sayısal analiz sonuçları (m.s-1 a) 20 L.h-1, b) 30 L.h-1 c) 50 L.h-1	29
Şekil 2.26. Yüksek çözünürlükte parçalanma mekanizmasının birincil ve ikincil atomizasyon sonuçları	30
Şekil 2.27. Atomizasyon çemberinde damlacık çapı dağılımı.....	31
Şekil 2.28. Merkezi düzlemde farklı konumlarda Sauter ortalama çap dağılımında model doğrulanması.....	32
Şekil 2.29. 200K sıcaklıkta çelik damlacıklar için küreselleşme ve soğuma süresi	33
Şekil 2.30. a) İzole edilmiş nozul b) Serbest düşmeli nozul için Lubanska “K” sabitine göre karşılaştırılması	34
Şekil 2.31. a) Kalay Tozları b) Babbitt metal tozları morfoloji görüntüleri	35
Şekil 2.32. D32 Partikül boyutunda atomizasyon gaz tipinin partikül boyutuna etkisi a) Azot b) Helyum c) Argon	36
Şekil 2.33. Farklı basınç dağılımlarında metal tozlarının toz dağılımı	37
Şekil 2.34. Geliştirilen Atomizasyon Sistemi	38
Şekil 2.35. Yakından eşlemeli gaz atomizer tasarımı	39
Şekil 2.36. Atomize tozların (a–c) TEM görüntüleri ve toz boyutu dağılımları (d): (a) kalay/1,0 MPa; (b) 7055 Alüminyum/0,8 MPa; (c) 7055 Alüminyum/0,4 MPa	40
Şekil 2.37. Gaz atomizer tasarımı ve prosesi	41
Şekil 2.38. a) $Al_{0.5}CoCrCuFeNi$, b) $Al_{0.5}CoCrCuFeNiSi_{1.2}$ ve c) $Al_{0.5}CoCrCuFeNiSi_{2.0}$ alaşımlarının TEM mikrografları ve partikül dağılımı	41

Şekil 2.39. Farklı gaz giriş basınçlarında gaz atomizasyonda partikül boyutu dağılımı a) Parçacık boyutunun kümülatif hacim oranı, b) Gaz-ergiyik metale bağlı olarak D50 dağılımı	42
Şekil 2.40. Aşırı ısıtmaya bağlı olarak kontak açısı analizi	43
Şekil 2.41. Bakır tozlarının farklı aşırı ısıtma miktarlarına bağlı olarak TEM morfolojileri a) 150 K, b) 200 K, c) 250 K, d) 300 K	44
Şekil 2.42. GMRv oranına bağlı olarak Cu, Sn, Fe, Cu-15 wt% Sn ve SS 316L alaşımlarının D ₅₀ değerleri	45
Şekil 2.43. Gaz atomizasyon ergiyik atomizasyon süreci.....	46
Şekil 2.44. Savart'ın damlacık parçalanma modeli görseli.....	46
Şekil 2.45. Alkol ve su karışımı içinde süspanse edilmiş sıvı bir yağ sütununun parçalanması	47
Şekil 2.46. Film parçalanması kenar (solda), delikli (orta) ve dalgalı film parçalanması (sağda)	48
Şekil 2.47. Newton damlacıkların parçalanma morfolojisi	50
Şekil 3.1. Arayüz hesaplamaları a) Gerçek arayüz, b) Geometrik yapılandırma ve c) Donör-Alıcı şematik görüntüleri	63
Şekil 4.1. Sınır Koşulları ve Geometrinin Modellenmesi.....	65
Şekil 4.2. Ağ yapısının Modellenmesi.....	66
Şekil 4.3. Ağ yapısından bağımsızlık için ölçüm yapılan hatlar.....	67
Şekil 4.4. Hesaplama alanı boyunca Hat 1 sonuçları.....	68
Şekil 4.5. Hesaplama alanı boyunca Hat 2 sonuçları.....	69
Şekil 4.6. Hesaplama alanı boyunca Hat 3 sonuçları.....	69
Şekil 4.7. a) 28458, b) 58319, c) 98521, d) 141995, e) 211143 ve f) 299160 eleman sayısı kullanılarak 3,7 MPa giriş basıncında gaz akış dinamiği analizleri.....	70
Şekil 4.8. 2,5 MPa argon gaz giriş basıncında gaz akış dinamiği.....	72
Şekil 4.9. 2,5 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği	72
Şekil 4.10. 3 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği	73
Şekil 4.11. 3,5 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği	74
Şekil 4.12. 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği	75
Şekil 4.13. 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği	75

Şekil 4.14. Hat 1 hattında 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basınçlarında hız ölçüm değerleri	77
Şekil 4.15. Hat 2 hattında 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği.....	78
Şekil 4.16. Turuncu hatlar ile belirtilen Prandtl-Meyer genişleme dalgaları sırasıyla a) 2,5 MPa; b) 3 MPa, c) 3,5 MPa ve d) 3,7 MPa	80
Şekil 4.17. Hat 2’de 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basınçlarında hız ölçüm değerleri	81
Şekil 4.18. Hat 3’te 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basınçlarında hız ölçüm değerleri	81
Şekil 4.19. Hat 3 için 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği	82
Şekil 4.20. İki Fazlı Analizler için Hesaplama Alanının Geometrisi	83
Şekil 4.21. İki fazlı analizler sınır koşulları.....	84
Şekil 4.22. İki fazlı analizlerde kullanılan ağ yapısı.....	85
Şekil 4.23. 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında kütleli debi ölçümü.....	87
Şekil 4.25. 3,7 MPa argon giriş basıncında $2e-4$ saniyede gaz akış dinamiği	89
Şekil 4.26. 3,7 MPa argon giriş basıncında $5e-4$ saniyede gaz akış dinamiği	89
Şekil 4.27. 3,7 MPa argon giriş basıncında $8e-4$ saniyede gaz akış dinamiği	90
Şekil 4.28. 3,7 MPa argon giriş basıncında $11e-4$ saniyede gaz akış dinamiği	91
Şekil 4.29. 3,7 MPa argon giriş basıncında $13e-4$ saniyede gaz akış dinamiği	91
Şekil 4.30 3,7 MPa argon giriş basıncında $15e-4$ saniyede gaz akış dinamiği	92
Şekil 4.31. 3,7 MPa argon giriş basıncında $17e-4$ saniyede gaz akış dinamiği	93
Şekil 4.32. 3,7 MPa argon giriş basıncında $19e-4$ saniyede gaz akış dinamiği	94
Şekil 4.33. 3,7 MPa argon giriş basıncında $2e-3$ saniyede gaz akış dinamiği	94
Şekil 4.34. 3,7 MPa argon giriş basıncında $2e-3$ saniyede gaz akış vektörleri.....	95
Şekil 4.35. 3,7 MPa argon giriş basıncında $2e-3$ saniyede gaz akış vektörleri a) $2,2e-3$ ve b) $2,3e-3$	96
Şekil 4.36. 3,7 MPa argon giriş basıncında $19e-4$ saniyede elde edilen partikül boyutları	97
Şekil 4.37. İkincil atomizasyon analiz adımları sırasıyla a) 5,01 ms, b) 5,02 ms, c) 5,03 ms, d) 5,04 ms, e) 5,05 ms, f) 5,06 ms.....	98
Şekil 4.38. İkincil atomizasyon analiz adımları sırasıyla a) 5,07 ms, b) 5,08 ms, c) 5,09 ms, d) 5,10 ms, e) 5,11 ms, f) 5,12 ms.....	99
Şekil 4.39. 5,09 ms’de gaz atomizasyon hattı boyunca ikincil atomizasyon analiz sonuçları	100

Şekil 4.40. 5,09 ms’de gaz akış dinamiği	100
Şekil 4.42. İkincil atomizasyon analiz adımları sırasıyla a) 5,13 ms; b) 5,14 ms; c) 5,15 ms; d) 5,16 ms; e) 5,17 ms; f) 5,18 ms; g) 5,19 ms; h) 5,20 ms; ı) 5,21 ms ve i) 5,22 ms	102
Şekil 4.43. İkincil atomizasyonda 5,18 ms’de gaz akış dinamiği analizi	103
Şekil 4.44. İkincil atomizasyon analiz adımları sırasıyla a) 5,23 ms; b) 5,24 ms; c) 5,25 ms ve d) 5,26 ms; e) 5,23 ms’de gaz akış dinamiği	103
Şekil 4.45. İkincil atomizasyon analiz adımları sırasıyla a) 5,27 ms; b) 5,28 ms; c) 5,29 ms; d) 5,30 ms; e) 5,31 ms; f) 5,32 ms; g) 5,33 ms; h) 5,34 ms	105
Şekil 4.46. 5,32 ms’de vektörel gaz akış dinamiği	106
Şekil 4.47. 5,32 ms’de gaz atomizasyon hattı boyunca ikincil atomizasyon analiz sonuçları	107
Şekil 4.48. Üç boyutta 5,32 ms’de gaz akış dinamiği.....	107

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

cm³	Santimetreküp
d₃₂	Partiküllerin 32%'sinden daha ince olduğu çap değeri
d₅₀	Partiküllerin 50%'sinden daha ince olduğu çap değeri
d₈₄	Partiküllerin 84%'sinden daha ince olduğu çap değeri
g	Gram
h	Hour
K	Lubanska Denklemindeki Deney Sabiti
k	Türbülans Kinetik Enerjisi
kPa	Kilopaskal
L	Litre
m³	Metreküp
mm³	Milimetreküp
MPa	Megapaskal
Pr	Prandtl Sayısı
psi	Pounds Per Square Inch
r	Radyal Koordinatlar
s	Saniye
S_m	İkinci Fazdan Sürekli Faza Eklenen Kütle Miktarı
t	Time
V	Hacim
v	Velocity
v_r	Radyal Hızı
v_x	Eksenel Hızı
We	Weber Sayısı

Simgeler**x****Açıklamalar**

Eksenel Koordinatlar

 α_q

Hacim Oranı

 ε

Türbülanslı Kinetik Enerjinin Dağılımı

 μm

Mikrometre

 ρ

Yoğunluk

 $\dot{m}_{pq}$

q Fazının p Fazına Kütle Transferini

 $\dot{m}_{qp}$

p Fazının q Fazına Göre Kütle Transferi

Kısaltmalar**Açıklamalar****ATM**

Atmosfer

CFD

Computational Fluid Dynamics

DPM

Ayrık Faz Modeli

DYN

Dairesel Yarık Nozul

HAD

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

HV

Vickers Sertliği

ITN

İzentropik Tıpa Nozul

KH

Kelvin-Helmholtz

MPa

Megapaskal

OIG

Outside In Gas

OIL

Outside In Liquid

RNG

Renormalization Group

RSM

Reynolds Stres Model

RT

Rayleigh-Taylor

TEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

TM

Toz Metalurjisi

VOF

Sıvıların Hacmi

1.GİRİŞ

Toz Metalurjisi (TM), metal tozlarının üretimini, özelliklerini ve mühendislik bileşenlerinin imalatında kullanımı inceleyen bir bilim dalıdır. Bu üretim yöntemi ile istenilen boyut ve yüzey toleranslarında malzeme üretilebilmektedir [1]. TM yöntemi ilk olarak yüksek ergime sıcaklıklarına sahip, ingot metalurji ve füzyon metalurji gibi geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi zor materyaller için kullanılmaya başlanmıştır. Füzyon metalurjisi gibi üretim yöntemleri, yavaş soğuma hızları ve segregasyonlardan dolayı üretilen malzemeler kaba bir mikro yapıya sahipken, TM yöntemiyle üretilen parçalar yüksek teorik yoğunluğa, yüksek aşınma direncine, daha iyi mikroyapıya ve yüksek mukavemete sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca üretim sırasında malzeme kullanımında yüksek verimliliğe sahip olduğundan dolayı, ingot metalurji yöntemlerine kıyasla daha ucuz bir üretim yöntemidir [2-5].

Son yıllarda hızlı prototipleme, termal spreyleme, metal enjeksiyon kalıplama, soğuk veya sıcak izostatik pres, eklemeli imalat gibi üretim yöntemlerinin popülerleşmesi, bu üretim proseslerinin ham maddesi olan metal tozu üretimine karşı oluşan talebi artırmıştır [6-8]. Dünyada çelik ve alüminyum gibi sanayide yaygın olarak kullanılan metal ve alaşımları, nikel ve kobalt süper alaşımları gibi metallerin toz üretimi yılda 700 000 tonu aşmıştır. Metal ve alaşımlarının toz halinde üretilmesi için yıllardır birçok yöntem geliştirilmiştir. Metal tozlar mekanik, kimyasal, elektrolitik ve atomizasyon yöntemleriyle üretilebilmektedir [9]. Ancak bunlardan bazıları yüksek kaliteli tozlar üretebilse de ekonomik açıdan verimli değildir [10].

Gaz atomizasyon işleminde toz dağılımı kontrol edilebildiğinden, diğer metal tozu üretim prosesleri arasında yüksek basınçlı gaz atomizasyonun en verimli metot olduğu belirtilmiştir [6, 11, 12]. Atomizasyon ile üretilmiş metal tozları yüksek soğuma hızları sayesinde, geleneksel üretim yöntemlerine göre daha yüksek kalitede metal tozları üretilebilmektedir. Hızlı katılaşma sayesinde üretilen metal tozları daha az segregasyona, daha iyi mikroyapıya ve homojen tane boyutu dağılımına sahiptir. Yüksek basınçlı gaz atomizasyonda, yüksek hızdaki gaz kinetik enerjisini ergiyik metale aktararak parçalanma işlemi gerçekleştirilmektedir [12]. Yüzey gerilimleri, parçalanma sonucunda oluşan damlacıkların küreselleşme durumunu belirlemekte, ve ayrıca ergiyik ile gaz arasında oluşan yüksek sıcaklık gradyanı hızlı katılaşma ile

sonuçlanmaktadır [11, 13]. Gazların genel olarak termal iletkenlikleri düşük olduğu için, gaz atomizasyonda katılaşma prosesi genel olarak uzun sürmektedir. Bu yüzden gaz atomizasyon prosesinde genel olarak üretilen tozlar küresel şekildedir [11].

Atomizasyonda parçalanma mekanizması birincil ve ikincil atomizasyon olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Genel olarak ergiyiğin ligament olarak adlandırılan çubuksu yapı oluşumu sonrası büyük damlacıklara parçalanması birincil atomizasyon, ardından bu damlacıkların daha küçük boyutlara ayrılması ikincil atomizasyon olarak tanımlanmaktadır [10]. Literatürde parçalanma mekanizmasını incelemek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır [6, 13-19]. Bu çalışmalara göre atomizasyon mekanizması ligament oluşumu, ligamentin sıvı damlacıklara parçalanması birincil atomizasyon, damlacıkların daha küçük boyutlara parçalanması ikincil atomizasyon ve damlacıkların katılaşması sonucu toz üretimi olarak dört aşamadan oluşmaktadır.

Gaz atomizasyon işleminde deneysel olarak çalışmak maliyetli olacağından, atomizasyon işlemini modellemek için çalışmalar yapılmıştır. Zeoli ve Gu [20], gaz akış dinamiği ve damlacık atomizasyon prosesini izentropik tıpa nozulu (ITN) ve dairesel yarık nozul (DYN) nozul tasarımları için simüle etmiştir. Elde edilen veriler sonucunda, ITN nozul tasarımı sayesinde şok dalgaları azalmış bu sayede ergiyiğe daha yüksek kinetik enerji aktarabilmektedir. Motaman vd. [21] ise yalnızca gaz akışının incelendiği sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklemleri çözümlenerek, gaz atomizasyonu için farklı nozul ucu uzunluğunun gaz akışı üzerine etkisini sayısal olarak incelemiştir. Ergiyik akışı sırasında gaz tarafından oluşacak olan geri akışın, ergiyiğin akışına engel olabileceği bu sebeple de ergiyik nozul uzunluğunun oldukça önemli olduğu belirtilmiştir. Zeoli ve Gu [22] başka bir çalışmada ikincil atomizasyon prosesini sayısal olarak incelemiştir. Ergiyik besleme çapı 6 mm olduğu için 1, 3 ve 5 mm çapındaki damlacıkların parçalanması Lagrange ayırık faz yöntemi ile modellenmiştir. Firmansayah vd. [12] çalışmasında atomizasyon toz boyutunu asıl belirleyen aşamanın ikinci atomizasyon olduğunu belirtmiştir. Bu sebeple 1 ve 5 mm arasında parçacık boyutlarına sahip damlacıklara ikincil atomizasyon parçalanmasını uygulamıştır. Ayrıca damlacık boyutunu daha da azaltmak için giriş gazı basıncı ve sıcaklığının etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Mullis vd. [23], araştırma ölçekli atomizer ile geliştirdikleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

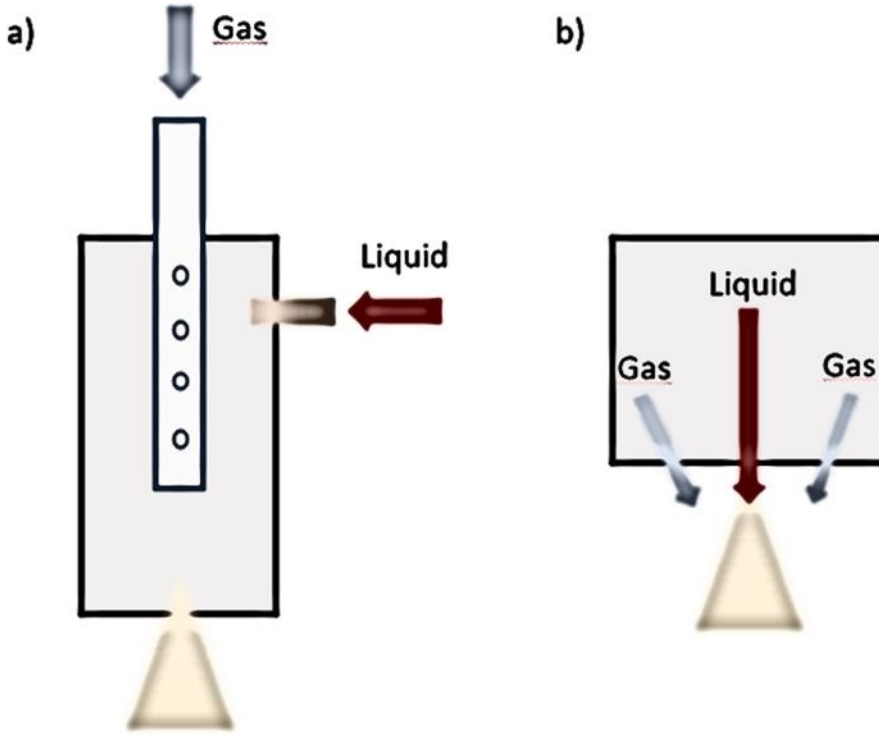
modelinin sonuçlarını karşılaştırarak elde ettiği verilerle, Prandtl-Meyer dalgalarının oluşumu karşılaştırılmış ve deneysel çalışma ile sayısal model arasında uyum olduğunu belirtmiştir. Allimant vd. [24] ise çalışmasında, bir potanın boşaltılması sırasında, ergiyiğin statik yüksekliğinin azalmasının metal kütle akış hızını etkilediğini belirtmiştir. Bu sebeple oluşturdukları modelde gaz basıncının kütle akış hızı değişimiyle oranını sabit tutmak için bir model geliştirmiş ve sonuç olarak ortalama parçacık boyutu dağılımının daha da daraldığını ve parçacık boyutunun küçüldüğünü belirtmiştir. Kamalasekaran [25] çalışmasında, girdi parametrelerinin gaz akışı üzerindeki etkisinin anlaşılması üzerine bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Gölge grafiği yöntemiyle simülasyon modelleri karşılaştırıldığında sonuçların uyumsuzluğu nedeniyle parametrik çalışmalar durdurulmuş ve HAD modelinde yer alan varsayımların yeniden araştırılması gerektiği belirtilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar gaz atomizasyon prosesini geliştirmek için yapılan deneysel çalışmaların oldukça yüksek maliyetli olacağı belirtilmiş ve bu çalışmalarda proses optimizasyon çalışmalarının genellikle sayısal olarak modellendiği görülmüştür. Ancak bu çalışmaların büyük çoğunluğunda gaz atomizasyon prosesinde sadece gaz akışı tek fazlı olarak simüle edilmiştir. Gaz atomizasyon işleminde ergiyik parçalanması, ergiyik hareketi ve ergiyik-gaz etkileşimini analiz etmek, prosesin anlaşılması için oldukça önemlidir. Bu sebeple atomizasyon verimliliğini artırabilmek için bu parametrelerin incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada da gaz atomizasyon parçalanma mekanizmasında gaz-ergiyik etkileşimi HAD ile iki fazlı olarak modellenmiş ve geliştirilen model sayesinde gaz atomizasyonda parçalanma mekanizması, gaz akış dinamiği, birincil ve ikincil atomizasyon prosesleri detaylı olarak incelenmiştir.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Atomizer Tipleri

Atomizer tipleri sıvıyı parçalamak için kullanılan enerjiye göre gruplandırılmaktadır. Sıvı parçalanma işlemi basınçla, pnömatik olarak gaz enerjisiyle, rotasyon kullanılarak mekanik enerjiyle, elektrikle veya akustik enerji ile gerçekleştirilebilir. Pnömatik atomizasyonda yüksek basınçtaki gaz akışı kinetik enerjisi sıvıya aktararak parçalanmasını sağladığı belirtilmiştir. Pnömatik atomizasyon sıvı-gaz fazlarının dış ve iç karıştırılmalı olmasına bağlı olarak ikiye ayrılmaktadır. İç karıştırılmalı atomizasyonda gaz ve sıvı fazları atomizasyon çemberine girmeden karıştırılır. Dış karıştırılmalı atomizasyonda ise atomizasyon ünitesinin içinde etkileşime geçmektedir. Şekil 2.1’de iki fazlı iç ve dış karıştırılmalı atomizer üniteleri gösterilmiştir [26].



Şekil 2.1. a) İç karıştırılmalı atomizer b) Dış karıştırılmalı atomizer

2.1.1.Serbest düşmeli ve yakından eşlemeli atomizasyon

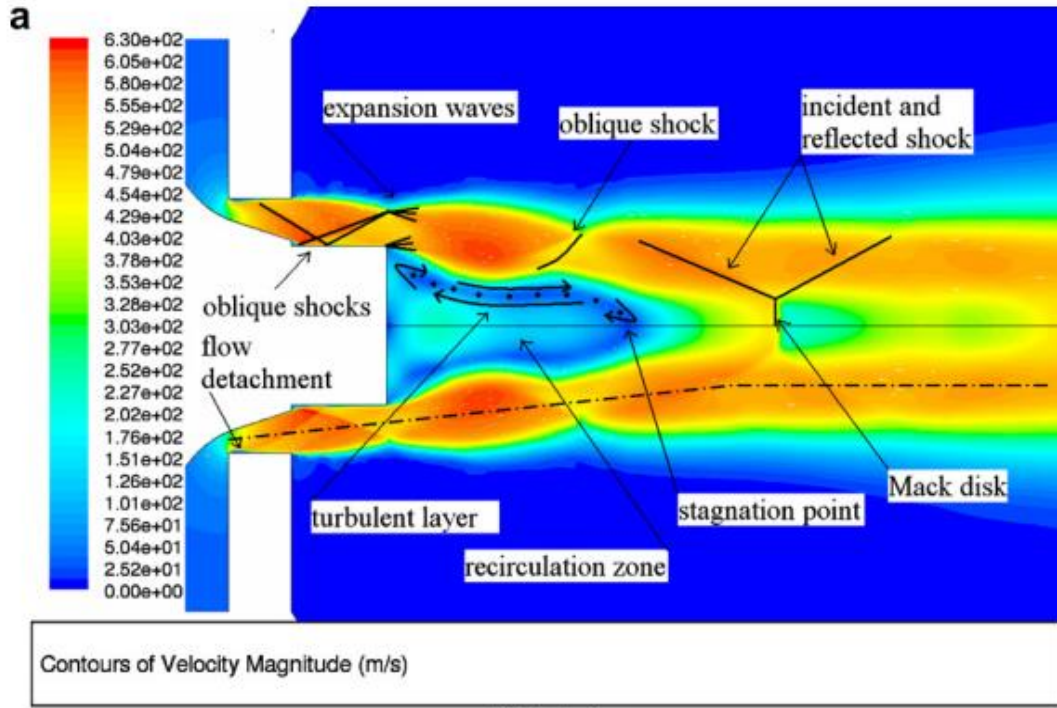
Yüksek basınçlı gaz atomizasyon ünitesi yakından eşlemeli ve serbest düşmeli atomizer olarak ikiye ayrılmıştır. Ergiyik tüpünün ve gaz nozullarının konumlandırılmasına göre kategorilendirilmiştir [6, 27, 28]. Yakından eşlemeli atomizerde ergiyik tüpünden çıkınca direkt olarak gaz akışı ile etkileşime geçerken, serbest düşmeli atomizerde ergiyik yer çekimi etkisiyle dökülür ve belli bir mesafe sonra gaz akışı ile etkileşime geçmektedir. Zeoli vd. [28], çalışmasında yakından eşlemeli atomizerlerin serbest düşmeliye göre daha küçük toz üretilebileceğini belirtmiştir. Ancak yakından eşlemeli atomizerde geri emme (ing; *lick back*) problemi yüzünden pozitif emme basıncı oluşur ve ergiyiğin katılaşma sorunu oluşmaktadır [6, 28, 29] .

2.2. Gaz Atomizasyon Değişkenleri

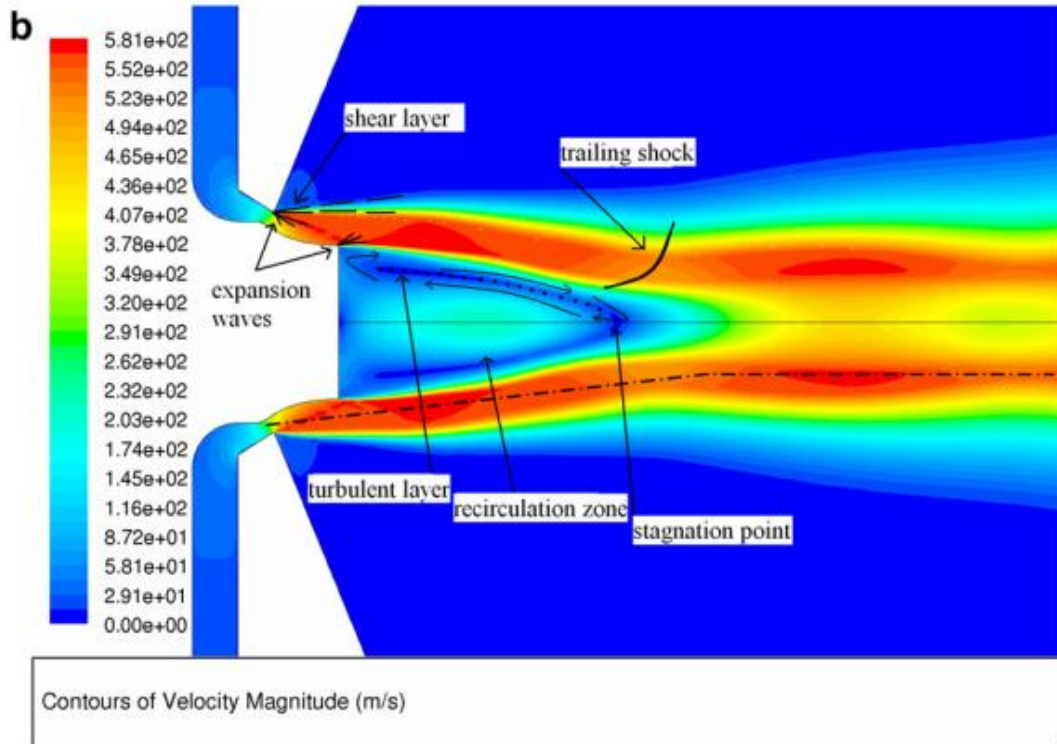
2.2.1. Nozul tasarımı

Zeoli ve Gu [20], geliştirdikleri simülasyon modeli sayesinde ITN ve DYN nozul dizaynları arasında gaz akış dinamiği ve damlacık atomizasyon proseslerini karşılaştırmıştır. DYN nozulu incelendiğinde, şok dalgaları yüzünden yetersiz gaz genleşmesi gözlenmiş ve akış boyunca parçalanma için yetersiz gaz kinetik enerjisi olduğu belirtilmiştir. ITN nozulu tasarımında ise şok dalgalarının daha az olduğu ve bu sayede daha düzenli gaz akışı sayesinde yüksek kinetik enerjiye sahip gaz akış elde edildiği gözlemlenmiştir. Sayısal model nozul performansı, gaz akış dinamiği, damlacık parçalanma mekanizması ve partikül takibi işlemlerini içermektedir. Şekil 2.2’de DYN ve ITN nozullarının gaz akış dinamiği gösterilmiştir.

Şekil 2.2(a)’da gözlemlendiği üzere oluşan mach diskleri gazın kinetik enerjisini düşürmüştür. Gaz kinetik enerjisi azalmasının sirkülasyon bölgesinde gaz hızını da düşürdüğü ve bu nedenle parçalanma işleminin veriminin oldukça düşük olacağı belirtilmiştir. Şekil 2.2(b)’de ise ITN nozul dizaynında, DYN nozula göre mach diskleri çok daha sonra oluştuğundan ergiyiğe aktarılan kinetik enerji çok daha yüksek olacaktır. Bu sayede elde edilen metal tozları çok daha küçük boyutlarda elde edilebileceği belirtilmiştir [20].



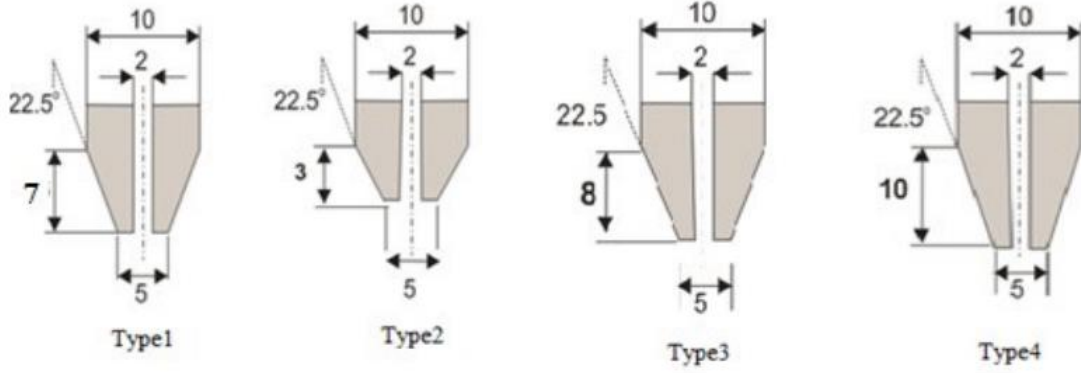
ASN design



IPN design

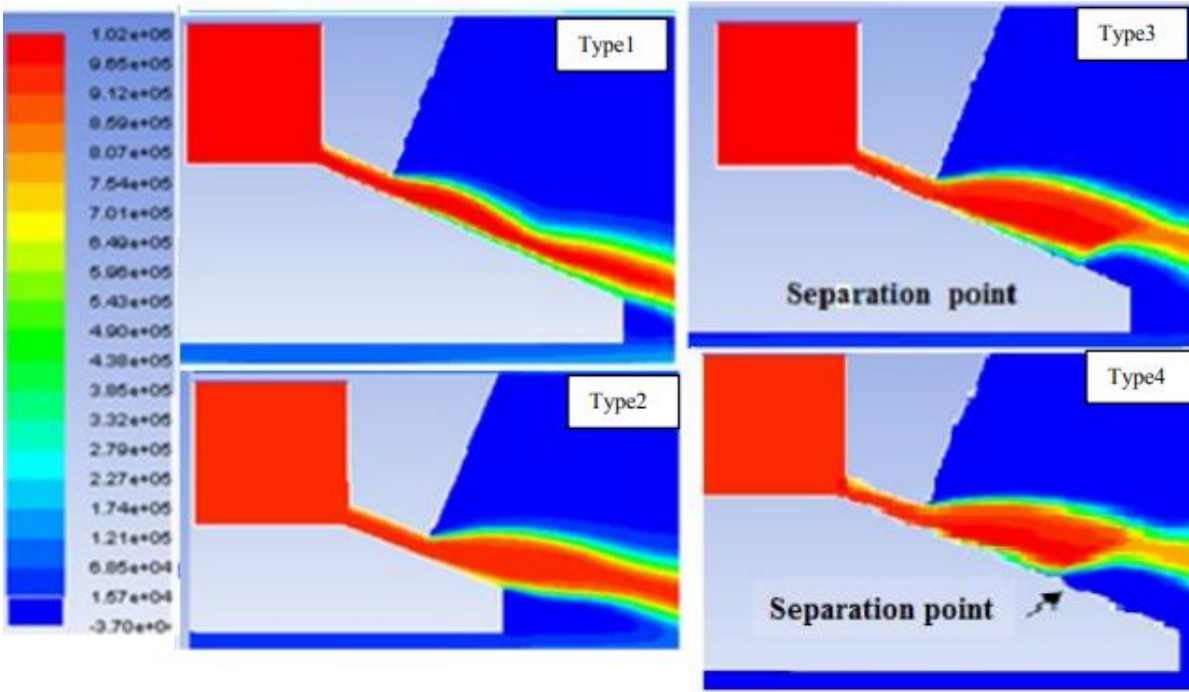
Şekil 2.2. Gaz akış dinamiği hız kontürleri a) DYN ve b) ITN dizaynı için [20]

Motaman vd. [21], sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklemlerini kullanarak farklı dairesel yarık nozul tiplerinde, farklı uzunluklarında gaz akışı analizini gerçekleştirilen model geliştirmişlerdir. Farklı nozul uzunluklarında ve farklı gaz giriş basınçlarında gaz akış dinamiği sayısal olarak analiz edilmiştir. Nozul tasarımları Şekil 2.3'te görüldüğü üzere 7, 3, 8 ve 10 mm olmak üzere sırasıyla Tip 1, Tip 2, Tip 3 ve Tip 4 olarak belirtilmiştir.



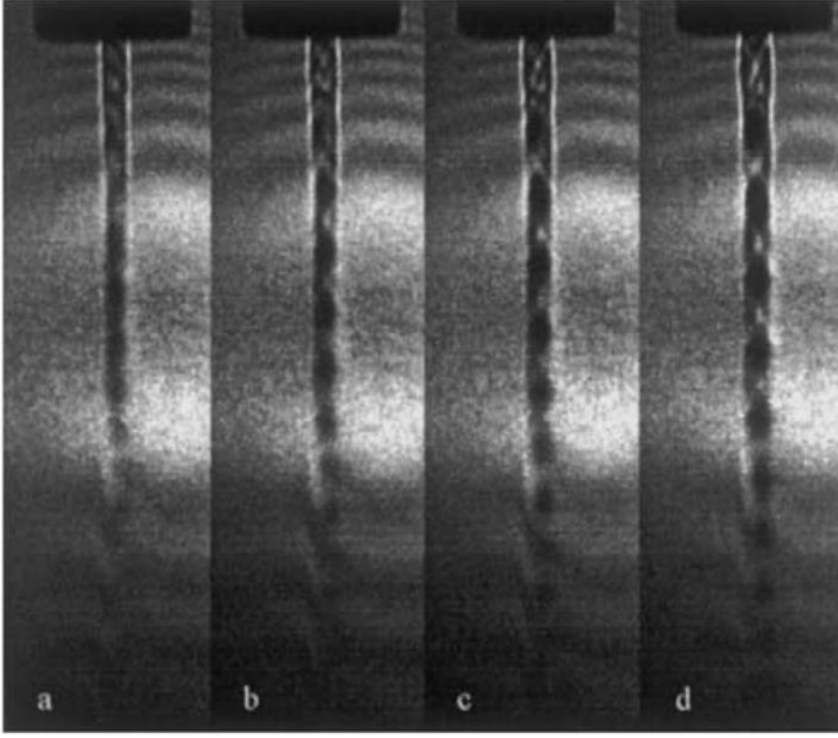
Şekil 2.3. Farklı nozul uzunluklarında oluşturulan tasarımlar [21]

Şekil 2.4'te görüldüğü üzere Tip 3 ve Tip 4 nozullarında 1 MPa için ergiyik nozul duvarında gaz akış ayrımı gözlenmiştir. Gaz akış ayrımı ise ergiyiğe aktarılan kinetik enerjinin azalmasına neden olmuştur. Bu sebeple nozul uzunluğunun, partikül boyutunu belirlemede önemli bir parametre olduğu ve dikkat edilmesi gerektiği belirtilmiştir [21].



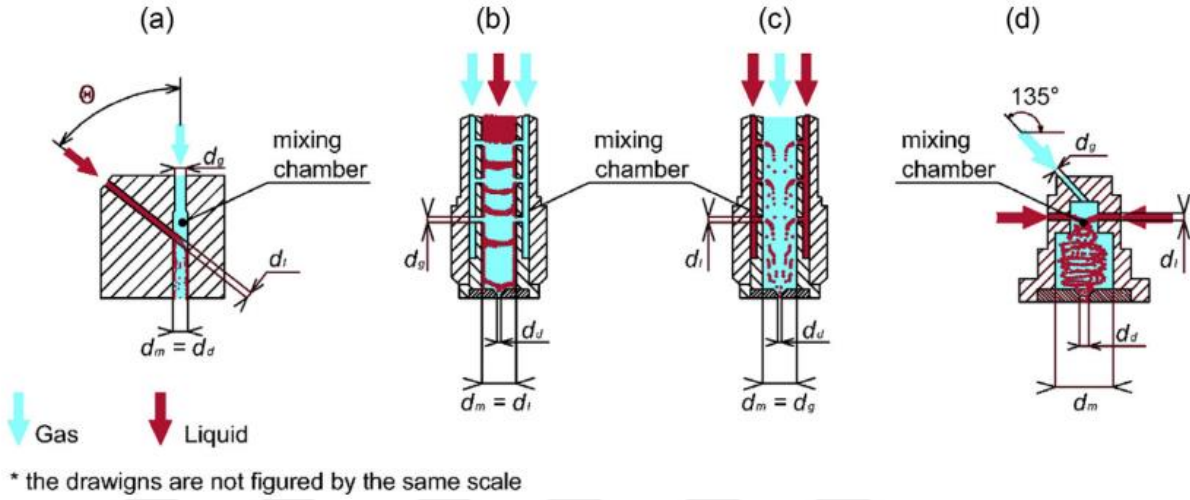
Şekil 2.4. 1 MPa gaz giriş basıncında farklı nozul tasarımları için gaz akış analiz sonuçları [21]

Anderson ve Terpstra [30] ise, farklı silindirik ve yakınsak-ıraksak nozulları tasarımlarını yüksek basınçlı gaz atomizasyonda karşılaştırmıştır. Yüksek basınçlı yakınsak-ıraksak nozulun, silindirik nozula göre daha verimli olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.5'te farklı giriş basınçlarında yakınsak-ıraksak nozulun Schlieren görüntüleme tekniğiyle görselleştirilmiş sonuçları gösterilmiştir. Gaz kütle akış analizleri sonucunda, deneysel sonuçlarda tespit edilen gaz akışının hesaplanan miktara göre oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yetersiz gaz manifold hacmi, gazın dengeli bir şekilde akışını engellediği belirtilmiştir. Ayrıca artan genleşme soğutma etkisi nedeniyle artan dinamik basıncın izentropik akışı engellediği de belirtilmektedir.



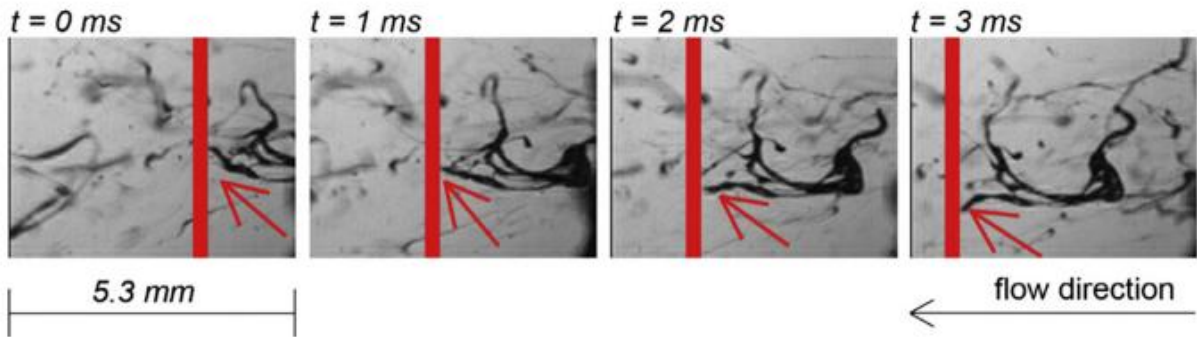
Şekil 2.5. Yakınsak-İraksak nozulda nitrojen gazının farklı basınçlarda Schlieren görüntüleri (a) 2,06; (b) 2,41; (c) 2,75; and (d) 3,1 MPa [30]

Mrkvik vd. [31], viskoz sıvıların düşük basınçta sprey işlemini araştırmıştır. İç karıştırmalı dört farklı tip ikiz atomizer kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan Y-jet 'dışarıdan gaz' efervesan atomizerler ve 'dışarıdan sıvı içinde' CFT efervesan atomizerler iki farklı gaz giriş basıncı (0,14 ve 0,28 MPa) ve çeşitli %2,5; %5; %10 ve %20 gaz-sıvı oranlarında karşılaştırılmıştır. Şekil 2.6'da tasarlanan atomizer tipleri sırasıyla (a) Y-jet, (b) OIG, (c) OIL, (d) CFT olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Atomizer tasarımları sırasıyla (a) Y-jet, (b) OIG, (c) OIL, (d) CFT [31]

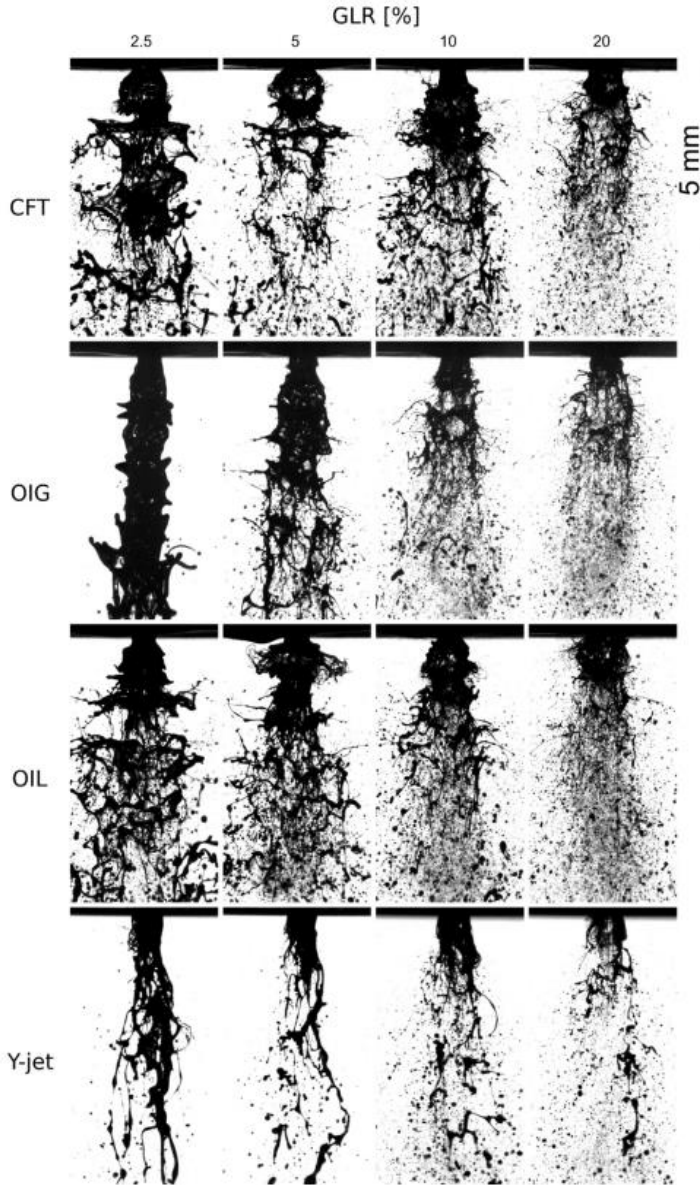
Araştırmada sıvı-gaz akışı, sprej kararlılığı, birincil atomizasyon ve damlacık boyutuna odaklanılmıştır. Birincil atomizasyon işlemi, yüksek hızlı kamera sistemi ile incelenmiştir. Parçalanma işlemi esas olarak OIG, OIL ve CFT atomizerlerinde hava direnci ile Y-jet atomizerlerde ise yüzey gerilimi ile sağlandığı tespit edilirken, en kararlı sprej işleminin gerçekleştiği OIL ve Y-jet tipi atomizerler olduğu belirtilmiştir. Düşük gaz-sıvı oranlarında Y-jet atomizer tipinde damlacık boyutları artarken, OIL atomizerde ise en küçük damlacık boyutu elde edilmiştir. Şekil 2.7'de zamana bağlı olarak parçalanma mekanizması gösterilmiştir [31].



Şekil 2.7. Zamana bağlı olarak partikül ligament parçalanma mekanizması [31]

Zaremba vd. [32], aynı parametrelerde dört farklı ikiz atomizerleri incelemiştir. Gaz atomizasyonu içerisindeki akış basitleştirilmiş analitik yaklaşımla ve nozul yakınındaki ergiyik boşaltım bölgesi incelenerek analizler desteklenmiştir. Damlacık parçalanma dinamiği faz-

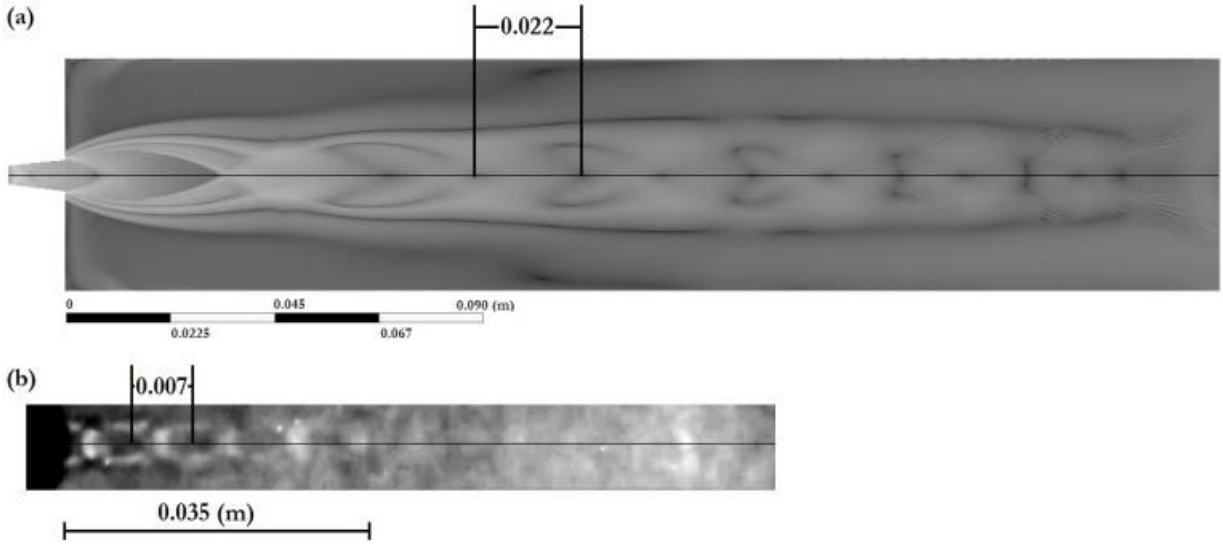
doppler analizi kullanarak gözlemlenmiştir. Sonuçlar atomizasyonun düşük gaz-sıvı oranlarında ikiz sıvı atomizerin iç tasarımına bağlı olduğunu göstermektedir. Gaz akış miktarının iki fazlı akışın karakterini, parçalanma mekanizmasını, damlacık dinamiklerini ve damlacık boyutu dağılımını etkilediği belirtilmiştir. Artan gaz-ergiyik oranı ile atomizerler arasındaki fark azalmıştır. Şekil 2.8’de atomizerden boşaltılan sıvının anlık görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Atomizerden boşaltılan sıvının örnek anlık görüntüleri. Çıkış ağzı çapları CFT, OIG ve OIL için 0,7 mm ve Y-jet atomizer için 1 mm [32]

2.2.2. Gaz akış analizleri

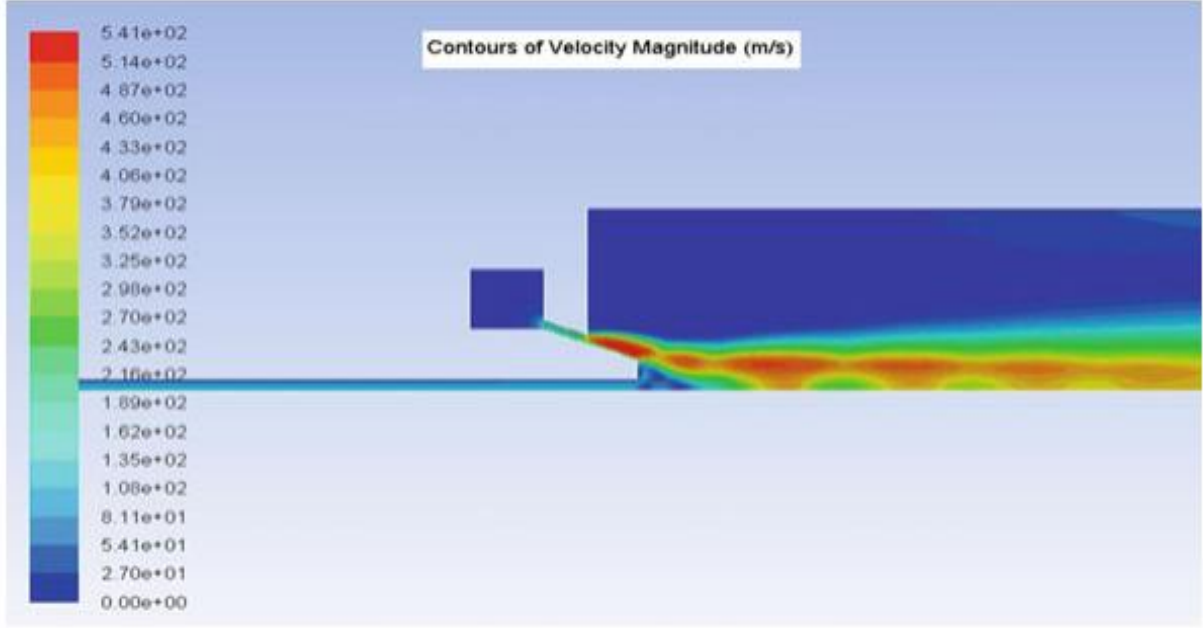
Kamalasekaran [25], girdi parametrelerinin yakınsak-ıraksak nozulda gaz akış özelliklerine etkisini inceleyen sayısal bir model geliştirmiştir. Yakınsak-ıraksak nozuldan çıkan gaz jetinin özelliklerini belirleyen girdi parametreleri, HAD modelleri ve gaz jeti gölge grafiği görselleştirme teknikleri yardımıyla gözlemlenmiştir. Sayısal model ve deneyin sonuçları benzer artış göstermesine rağmen, gaz jetlerinin mutlak boyutları arasında farklılık olduğu belirtilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki tutarsızlığın temel sebebi gaz yoğunluğu ve viskozite gibi HAD modelinde girdi olarak kullanılan parametrelerin yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca gaz jeti uzunluğunu belirlemede en önemli parametrenin, gaz atomizasyon nozulundaki ıraksak bölgenin açısı olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.9'da HAD simülasyonunda elde edilen gaz yoğunluğu kontür ve gölge grafiği görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.9. HAD simülasyonundan (a) elde edilen gaz yoğunluğu gradyan kontür grafiği ve ilgili gölge grafiği görüntüsünün (b) karşılaştırılması [25]

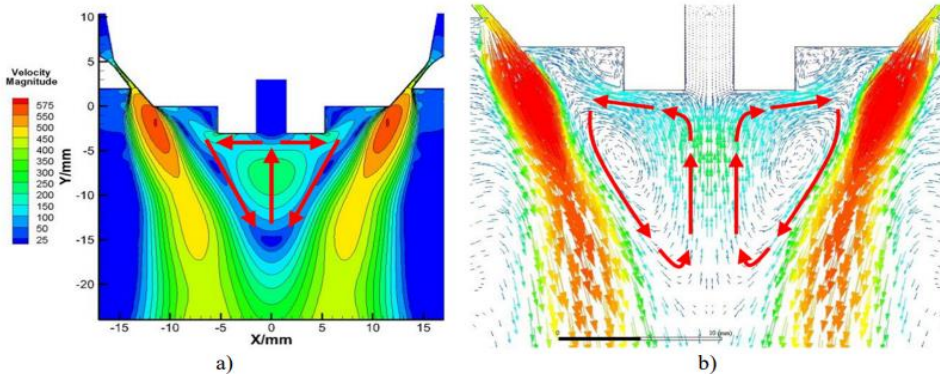
Mullis vd. [23], araştırma ölçekli atomizer ile HAD kullanılarak oluşturdukları modeli yüksek hızlı kamera görüntüleme tekniği ile karşılaştırmıştır. Sprey işleminin gerçekleştiği bölge incelendiği zaman Prandtl-Meyer dalgalarının sayısal model ve deneysel sonuçlarda benzerlik gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca simülasyonda, ergiyik bölgenin altında bulunan sirkülasyon

bölgesinin konumunu saptamada da başarılı olduğunu gözlemlemişlerdir. Yakından eşlemeli gaz atomizasyon ile elde edilen simülasyon verileri Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



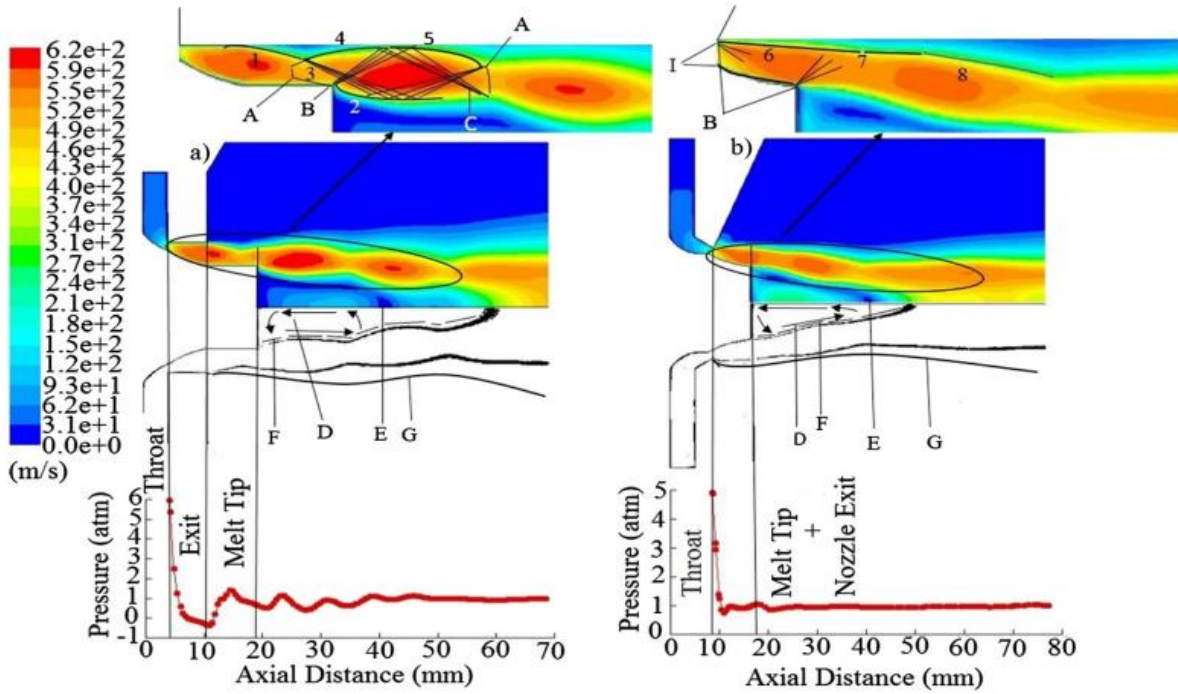
Şekil 2.10. Yakından eşlemeli gaz atomizasyonda gaz akış (HAD) hız gradyan sonuçları [23]

Guo vd. [33], nikel tabanlı alaşımın iki fazlı ANSYS Fluent yazılımında gaz akış bölgesi ve ergiyik metal atomizasyonunun modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Sonuçlar sirkülasyon bölgesinin uzunluğunun 12,28 mm ve sirkülasyon bölgesini sınırlayanın durma noktası olduğu belirtilmiştir. Durma noktasının altında ise, gaz hız akış yönü aşağı yönlü olup, maksimum hız 457,43 m/s 'ye kadar çıkmaktadır. Gaz akışı mach disklerine ulaştığı zaman ise, hız değerlerinin kademeli olarak düştüğü belirtilmiştir. Ayrıca sirkülasyon bölgesindeki türbülans miktarının artışı, birincil ve ikincil atomizasyon arasında kuvvetli bir bağ olduğunu göstermektedir. Şekil 2.11'de sirkülasyon bölgesinde gaz akış vektörleri gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Sirkülasyon bölgesindeki gaz hız akışı [33]

Kaiser vd. [14], atomizasyonda gaz-sıvı arasındaki enerji transfer verimini artırmak için şok dalgalarının etkilerini iki farklı dairesel yarı ve ITN nozul dizaynında sayısal olarak incelemişlerdir. Nozul çıkışında farklı bölgelere konumlandırılmış damlacıkların parçalanma mekanizması ve gaz hızı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak şok dalgalarının parçalanma mekanizması ve gaz hızlarını doğrudan etkilediği, bu sebeple de toz boyutunun küçülmesini engellediği belirtilmiştir. Şekil 2.12’de tek fazlı gaz akış analizleri gösterilmiştir.

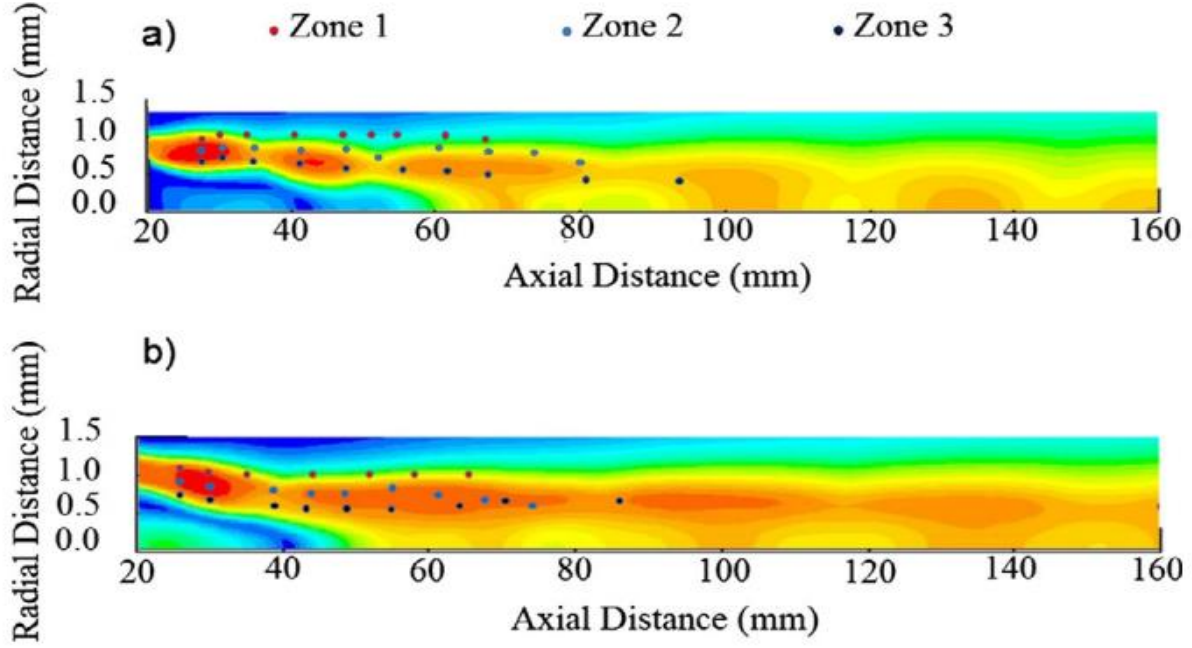


Şekil 2.12. Eriyik dahil edilmeden önce gaz akışının özellikleri ve (a) DYN ve (b) ITN'deki gaz hız değerlerinin kontürleri [14]

Şekil 2.12(a)'da görüldüğü üzere yüksek hızlı gaz basıncı DYN nozul dizaynında ıraksak bölgeden çıkışa doğru artarak hızlanmıştır. Daha sonra gaz basıncı, ortam basıncı olan 1 atm altına doğru düşmüş yani sıkışma aşamasına gelmiştir. Ardından oluşan eğik şok dalgasından dolayı, gaz tekrar genişleme evresine geçmiştir ve bu şekilde atomizasyon havzası basıncıyla eşitlenene kadar Prandtl-Meyer sıkışma-genleşme dalgaları devam etmektedir. Şekil 2.12 (b)'de ise ITN nozul dizaynında güçlü şok dalgaları oluşmadığı için, gaz akışının basıncı neredeyse atomizasyon çemberinin basıncıyla dengelenmiş konumda devam etmektedir [14].

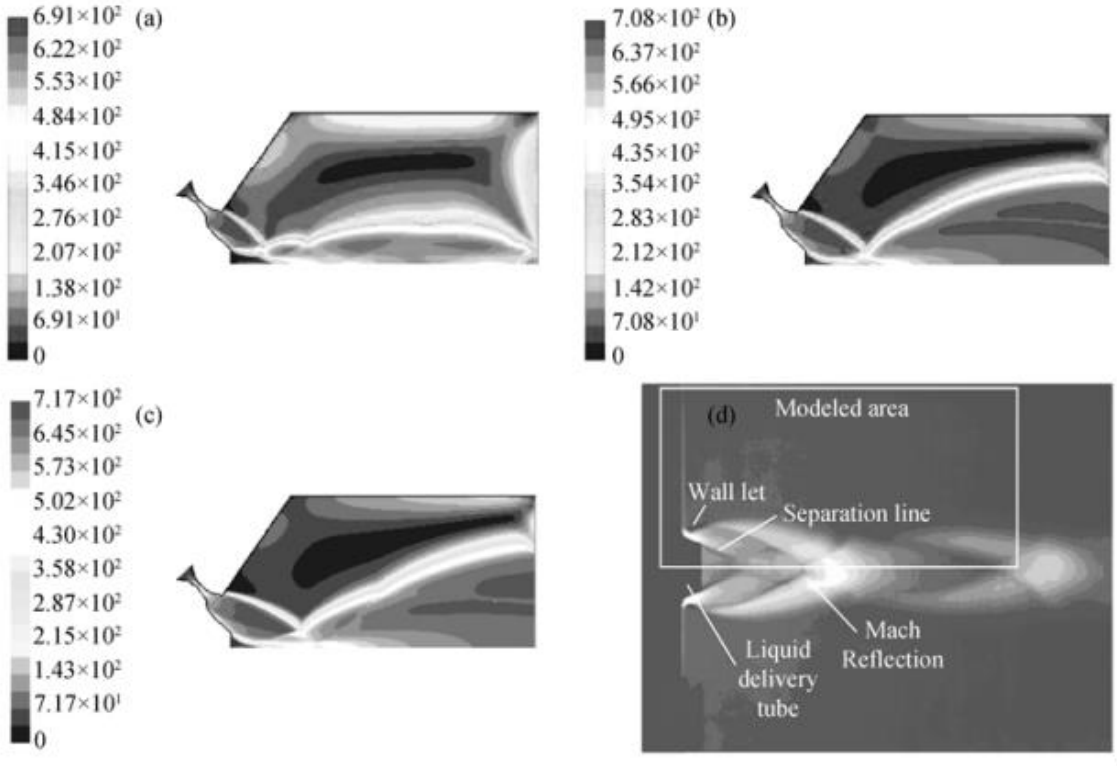
Şekil 2.12'de görüldüğü üzere DYN'deki gazın maksimum hızının ITN'dekinden biraz daha yüksek olduğu fark edilebilir. Bununla birlikte, DYN'deki şok dalgalarının gaz atomizasyonu için faydalı olup olmadığı hala belirsizdir, çünkü şoklar partikül yörüngelerini ve ayrıca yola bağlı parçalanma verimliliğini değiştirebilmektedir [14].

Şekil 2.13'te görüldüğü üzere bölge 1, bölge 2 ve bölge 3 olarak belirlenmiş partiküllerin analizi yapılmıştır. Şekil 2.13 (a)'da DYN nozul dizaynında birinci bölgede bulunan damlacıklar, oluşan ilk eğik şok dalgası sonucu akıştan dışarıya doğru savrulmuştur. Öte yandan bölge 3 için damlacıklar şok dalgalarının içine doğru giden bir yol izlemiş ve bunu akış boyunca takip etmişlerdir. Bölge 2'de yer alan damlacıklar ise bölge 1 ve bölge 3 arasında bir yol izlediği ve gaz akışının merkezinde başlamasına rağmen gittikçe dışarı savrulduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 2.13(b)'de ise ITN nozul dizaynındaki damlacıklar, bölge 1 ve bölge 3 için DYN nozul dizaynıyla benzer yolu izlediği gözlemlenirken, bölge 2 için ise IPN nozul dizaynında gaz akışı merkezinde devam ettiği tespit edilmiştir. Bu sayede ITN nozul dizaynındaki damlacıklar daha yüksek kinetik enerji transferi sağladığı için, DYN nozul dizaynına göre daha yüksek verime sahip olduğu belirtilmiştir [14].



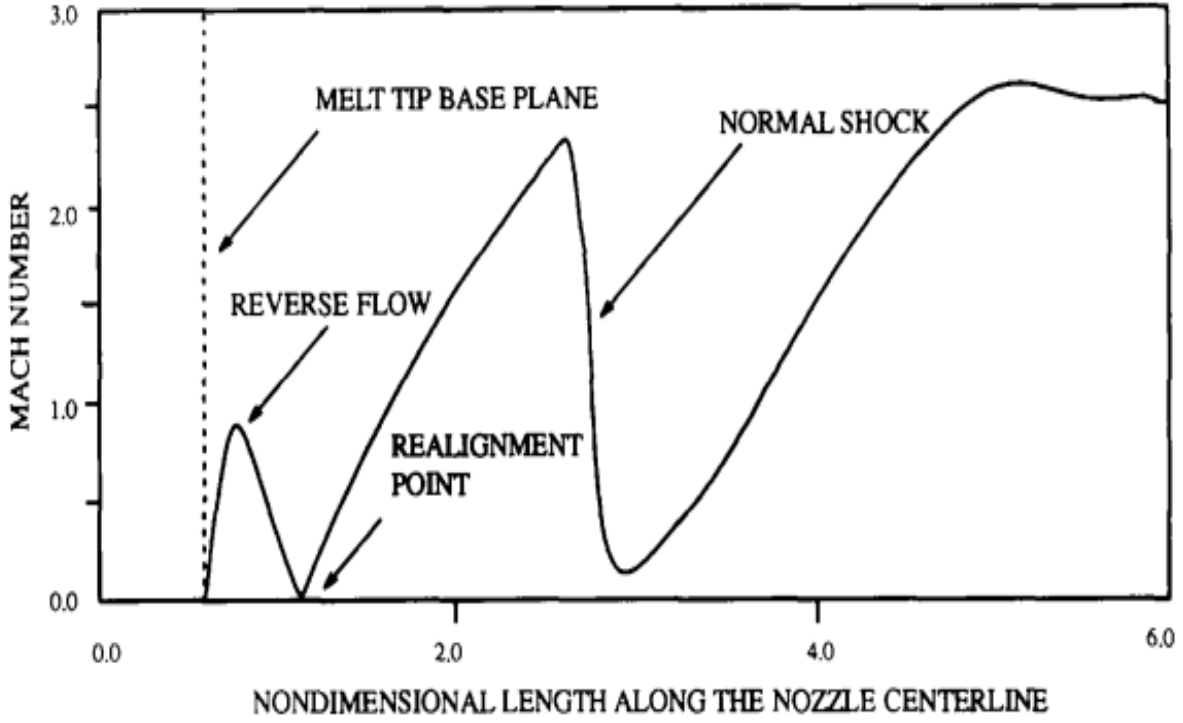
Şekil 2.13. (a) DYN ve (b) ITN'deki başlangıç bölgelerine bağlı olarak bir damlacık için gaz akışı özelliklerinin ve yörüngelerinin karşılaştırılması [14]

XinMing vd. [34], süpersonik gaz atomizasyonda gaz akışının farklı atomizasyon basınçlarında statik basınca ve gaz hızına etkisini analiz edebilmek için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçlar maksimum gaz akış hızının, artan atomizasyon basıncıyla beraber arttığını göstermektedir. Aspirasyon basıncı (ΔP), daha düşük atomizasyon gaz basıncında P_0 arttıkça azaldığı bulunmuştur. Ancak daha yüksek atomizasyon basıncında, P_0 arttıkça aspirasyon basıncın arttığı tespit edilmiştir. ΔP 'nin değişimine ise durma noktası basıncındaki ve Mach diskinin konumundan kaynaklanan değişiklikler neden olmuştur. Ayrıca ergiyik besleme nozulunun altında atomizasyon simetri eksenı boyunca P_0 arttıkça, atomizasyon basıncı artmaktadır. Şekil 2.14'te ise farklı atomizasyon basıncında elde edilen sayısal analiz sonuçları ve Şekil 2.14(d)'de ise Espina'nın çalışmasında sadece gaz akışı ile Schlieren görüntüleme tekniği ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır [34, 35].



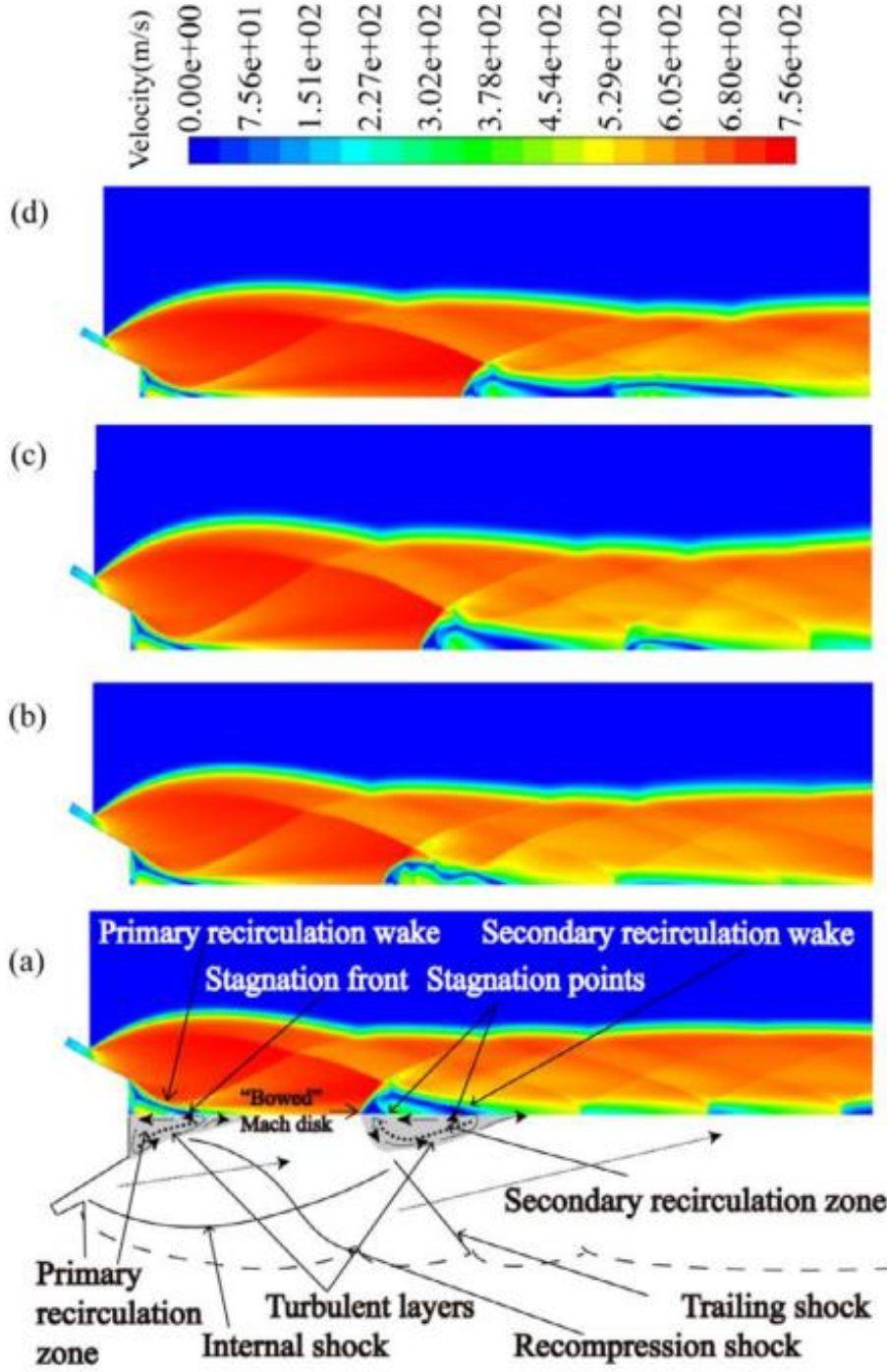
Şekil 2.14. Farklı atomizasyon gaz basınçlarında gaz akış hız grafikleri. (a) 15 atm; (b) 20 atm; (c) 25 atm; (d) dairesel bir nozuldan yalnızca gaz akışının Schlieren görüntüsü [34, 35]

Mi vd. [36], çalışmasında yüksek basınçta yalnız gaz akışının sayısal verileri elde edilmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Eksenel simetrik, türbülanslı, sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklemleri, ergiyik nozul ucunun yakınında sadece gaz akışı için çözülmüştür. Gaz atomizasyon basıncının parametrik değişimi ve bunun gaz akış alanı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sayısal sonuçların ve deneysel gözlemlerin geçmiş çalışmalarla uyum sağladığı ve ergiyik besleme borusunun altında güçlü bir sirkülasyon bölgesi, karışım katmanı ve şok dalgalarının varlığı gözlemlenmektedir. Durma basıncının artmasıyla beraber sirkülasyon bölgesi ve karışma katmanının yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Mach diskinin konumu, artan durgun basınç ile eksen boyunca aşağı doğru hareket eder ve basınç artışıyla beraber şok dalgalarının gaz akışına etkisinde de artış göstermektedir. Şekil 2.15'te 4 MPa durgun basınçta merkez simetri boyunca Mach sayısı değişimi gösterilmiştir.



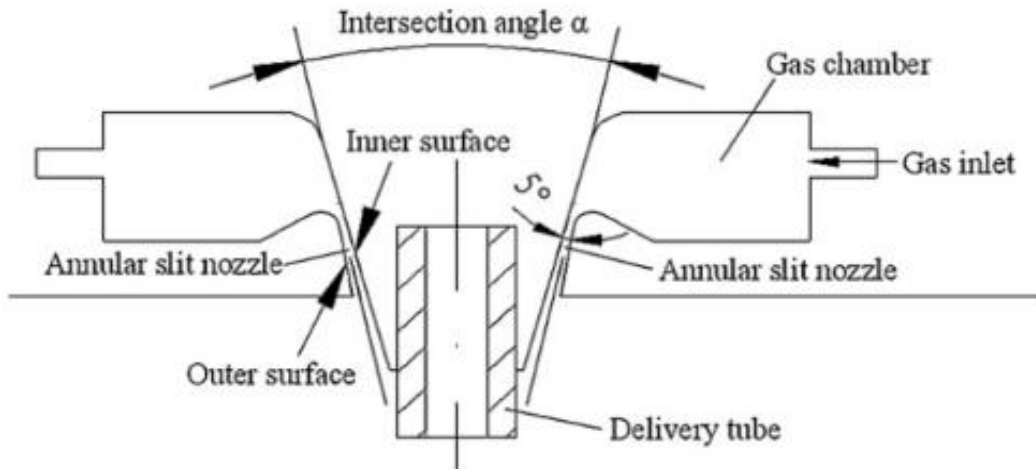
Şekil 2.15. 4 MPa durgun basınçta simetri eksenini boyunca Mach sayısı değişimi [36]

Shi vd. [37], toz partikül karakteristiği ve yüksek gaz basıncı arasındaki bağlantıyı incelemek için iki fazlı gaz-ergiyik akış analizi ve ayrık faz metodu kullanarak sayısal olarak analiz yapmışlardır. Mach diskinin şekilleri ve sirkülasyon bölgesi incelenmiştir. Gaz fazı akış alanında mach disklerine yakın bölgelerde bulunan girdapların, gaz hızını yavaşlatan yeni bir unsur olduğu tespit edilmiştir. İki fazlı akış alanında, damla akışının etkisi altında Mach diskinin şekli “S” şeklinden “Z” şekline dönüştüğü belirtilmiştir. Akış modelinden tahmin edilebildiği üzere, gaz basıncının yükselmesiyle birlikte parçacığın boyutunun giderek azaldığı ve dağılımının daha yoğun hale geldiği bulunmuştur. Şekil 2.16’da 5-8 MPa arasında yüksek basınçlı gaz atomizasyonun HAD analiz sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Yakından eşlemeli atomizasyonda 5 ila 8 MPa arasında değişen gaz basınçlarında yüksek basınçlı gaz atomizasyon nozulunun HAD modeli (a) 5 MPa'da birincil ve ikinci sirkülasyon bölgesi; (b) 6 MPa'da birincil ve genişletilmiş ikinci sirkülasyon bölgesi; (c) 7 MPa'da birincil, ikinci ve üçüncü sirkülasyon bölgesi; (d) birincil, ikincisi 8 MPa'da genişletilmiş üçüncü sirkülasyon bölgesi [37]

Zhao vd. [38] çalışmasında, dört farklı atomizerin gaz akış alanlarını hem k- ϵ türbülans modeli hem de Reynolds Stres Modeli (RSM) ile analiz edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 2.17’de görüldüğü üzere nozulun ergiyik çıkışına oldukça yakın olması, yüksek hızlı gaz akışının kinetik enerjisinin doğrudan ergiyiğe etki etmesini sağlayacaktır. ANSYS Fluent ile gerçekleştirilen sayısal analizde k- ϵ ve RSM türbülans modelleri karşılaştırıldığında RSM sonuçlarının deneysel sonuçlarla daha fazla uyumlu olduğu belirtilmiştir. Ayırma açısının 5° ; 35° ; 55° ve 65° kademeli olarak değiştirilmesi sonucunda elde edilen verilerde, merkez eksen boyunca gaz hızında belirli bir değişim olmadığı ancak ergiyik iletim noktası altında oluşan halka şeklinde tepe noktasının ergiyik konumundan uzaklaştığı belirtilmiştir. Geliştirilen sayısal modelin yakından eşlemeli atomizerin gaz akış alanını analiz etmek için etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Şekil 2.17’de yakından eşlemeli gaz atomizasyonda dairesel yarık nozul tasarımı gösterilmiştir.

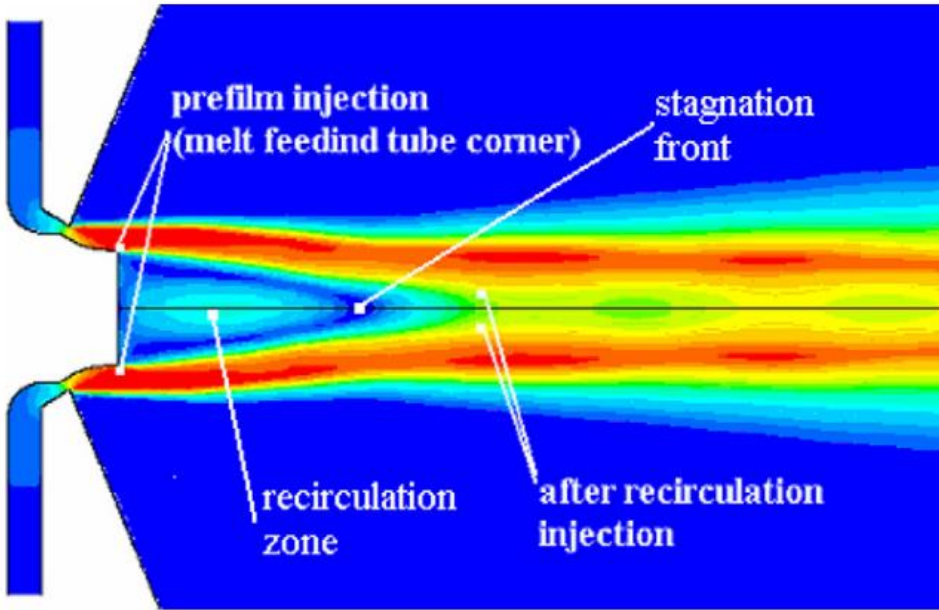


Şekil 2.17. Yakından eşlemeli gaz atomizasyonda dairesel yarık nozul [38]

Kaiser vd. [39], yakından eşlemeli gaz atomizasyon nozulunda aspirasyon basıncının oluşumunun önceden tahmin edilebilmesi üzerine yeni bir model geliştirmişlerdir. Literatürdeki en büyük deneysel veri kümesine dayalı bir analitik model denklemi ile $R^2=0,98$ ile boyutlandırılmamış aspirasyon basıncının tahmin edilebileceği kanıtlanmıştır. Ancak verilerin yetersiz olmasında dolayı R^2 oranı $0,73$ 'e düşmüştür ve ortalama 17% 'lik bir tahmin hatası olduğu belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yakından eşlemeli nozulda çıkıntı uzunluğunun ve Reynolds sayısının, apeks açısına göre daha önemli olduğu tespit edilmiştir.

2.2.3. Partikül analizi

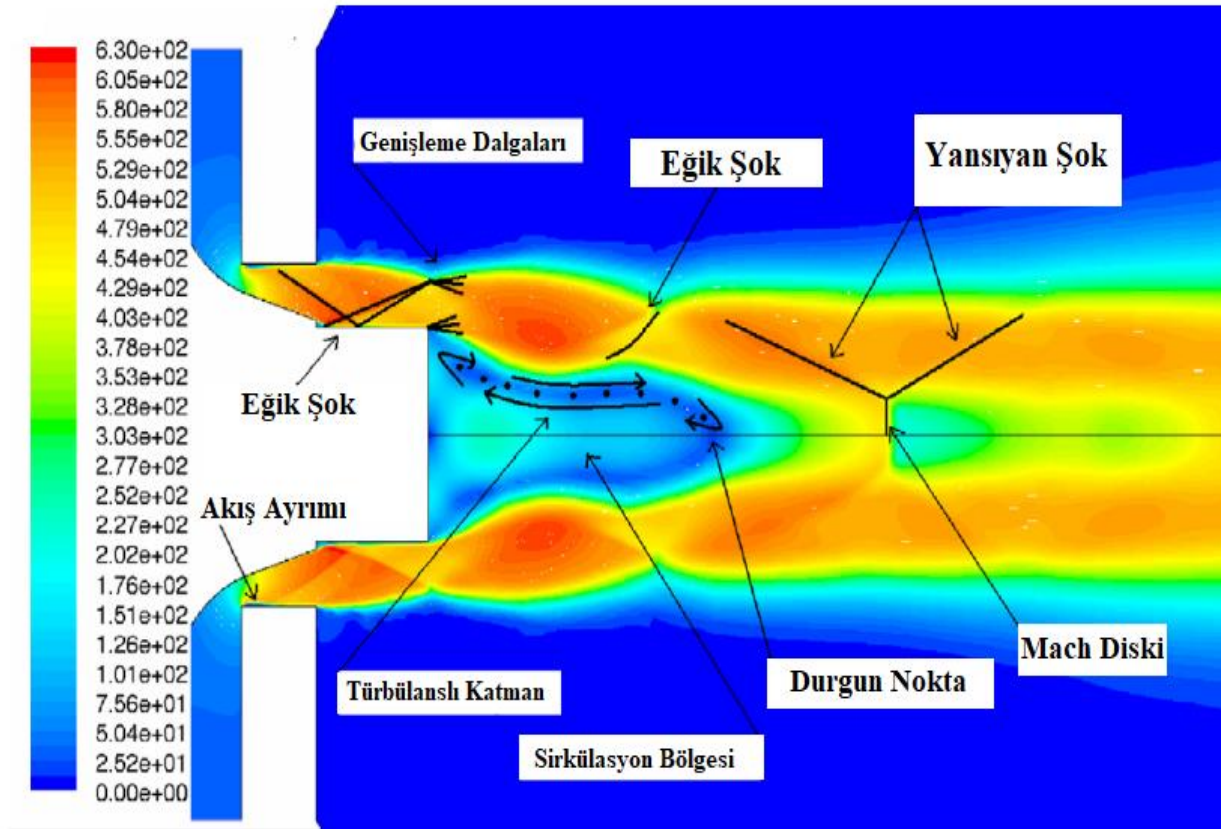
Zeoli ve Gu [40] çalışmalarında, soğutma ve parçalanma mekanizmasının dahil olduğu sayısal bir model geliştirmiş ve Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Euler gaz akışında ayrık faz modeli kullanarak damlacık analizi yapılmıştır. Akışkan denklemlerinde ısı ve momentum değişimlerinde gaz ve damlacık, etken ve etkilenen mekanizma olarak hesaplama yapılmıştır. Gaz akış bölgeleri sonuçlarının verildiği sayısal modelde, damlacık parçalanma mekanizmasının literatürle uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir. Model sonuçları damlacıkların soğuma karakteristiğinin ilk damlacık boyutuna bağlı olduğu, büyük damlacıklar aşırı soğumaya maruz kalmazken küçük damlacıkların aşırı soğuma ve yeniden şekillenme aşamalarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tahminler gaz atomizasyon sırasında damlacıkların benzer proseslere sahip olduğu ve nihai partikül boyutunu belirleyen parametre ve katılaşma sürecini etkileyen ana faktörün uçuş mesafesi olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.18. Atomizasyon bölgesinde gaz akışı [40]

Şekil 2.19’da damlacık takibi için geliştirilen sayısal modelin gaz akış analiz sonuçları gösterilmiş ve nozul çıkışında bir dizi Prandtl-Meyer sıkışma-genleşme dalgaları olduğu gözlemlenmiştir. Ergiyik besleme tüpünün kenarında gelişen gaz akış ayrımı ise ergiyik tüpünün

altında sirkülasyon bölgesini oluşturduğu belirtilmiştir. Ayrıca sirkülasyon bölgesinin altında gaz hızının sıfır, basıncın maksimum olduğu durgun nokta gözlenmiştir [40].



Şekil 2.19. Gaz akış dinamiğinin hız kontürü (m/s) [22]

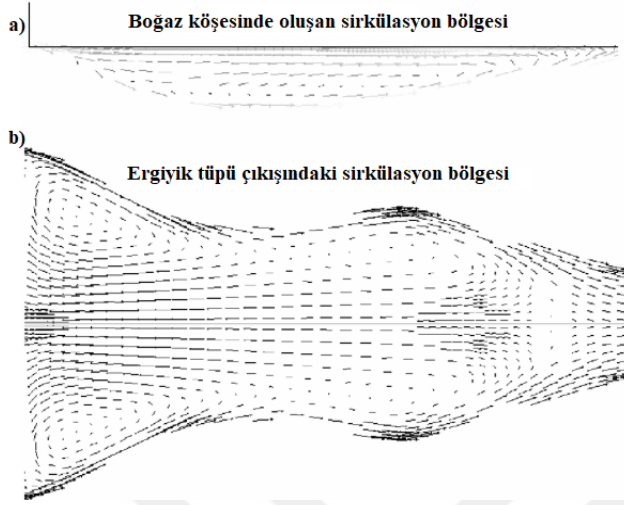
Atomizer gaz olarak nitrojen gazı kullanılmış ve gaz-ergiyik metal oranı 1:1 olarak belirlenmiştir. Çizelge 2.1’de belirtildiği üzere farklı damlacık çaplarında ve farklı bölgelere konumlandırılmış damlacıkların çıkış çapı gösterilmiştir [40].

Çizelge 2.1. Geliştirilen Simülasyon Sonuçları [40]

Damlacık Tipi	Damlacık Başlangıç Çapı	Enjeksiyon Bölgesi	Damlacık Çıkış Çapı
Damlacık A	3 mm	Besleme Tüpü Köşesi	82 μm
Damlacık B	5 mm	Besleme Tüpü Köşesi	152 μm
Damlacık C	1 mm	Besleme Tüpü Köşesi	22 μm
Damlacık D	5 mm	Durma Noktası	213 μm

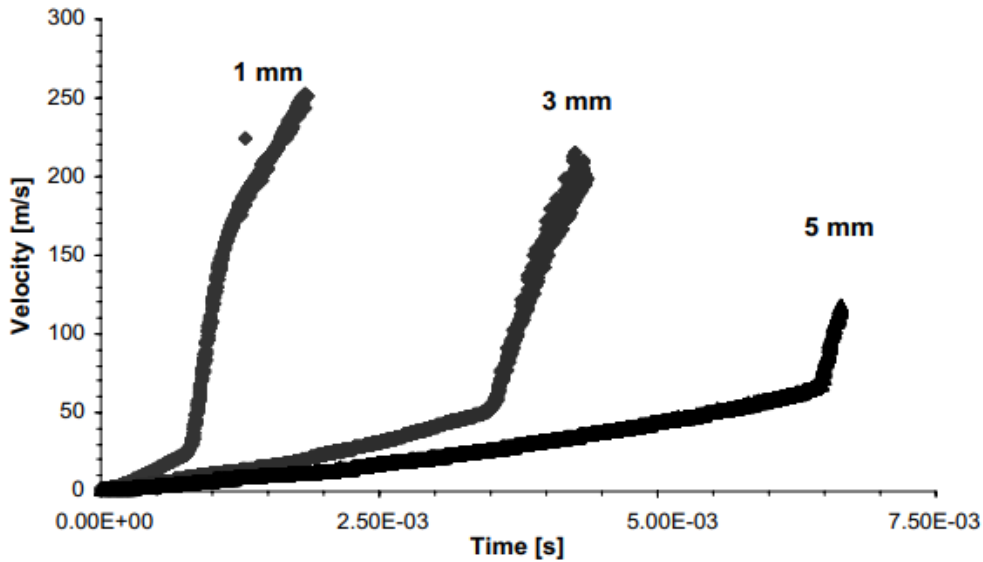
Zeoli ve Gu [22] çalışmasında, ikincil atomizasyon için parçalanma mekanizmasını ve ergiyik metal katılaşma proseslerinin tasarımını analiz etmiştir. Ayrıca ısı ve momentum denklemlerini kullanarak damlacık ve gaz akışı analizi yapılmıştır. Şekil 2.19'da bulunan gaz atomizasyon analizinin literatürdeki sıkıştırılabilir akış ve yüksek hızlı jetlerin teorik açıklamalarıyla uyumlu olduğu belirtilmiştir [35, 36, 41]. Şekil 2.19'da görüldüğü üzere gaz yüksek basınçta nozula girdiği zaman, nozulla oluşan keskin açılı akışın duvardan ayrılmasına neden olacak ve Şekil 2.20(a)'da belirtildiği gibi boğazın köşesinde sirkülasyon bölgesi oluşturacaktır. Ardından nozuldan çıkan gaz akışı besleme tüpüne çarpacak ve yansıtılacaktır. Bunun sonucunda, atomizasyonun gerçekleştiği bölgedeki atmosfer basıncıyla, gaz akış basıncı denge haline gelene kadar Prandtl-Meyer genişleme ve sıkıştırma dalgaları oluşacaktır. Eğer ortamdaki basınç, gaz basıncından küçükse gaz genişleyecektir. Diğer bir taraftan ortam basıncı gaz akışına sürekli basınç uyguladığından sıkıştırma gerçekleşecektir. Gaz akışı belirli bir süre sıkıştığında ise şok dalgaları oluşacak ve tekrar genişlemeye başlayacaktır. Sonuç olarak gaz basıncı, ortam basıncıyla denge haline gelene kadar bu durumun devam edeceği belirtilmiştir.

Şekil 2.20(b)'de görüldüğü üzere, ergiyik tüpü çıkışında oluşan gaz akışının ayrımı, ergiyik tüpünün altında sirkülasyon bölgesi oluşturacaktır. Sirkülasyon bölgesi ise yüksek hızlı gaz akışının oluşturduğu sonik bariyerler tarafından sınırlandırılacaktır. Sirkülasyon merkezindeki gaz akışı, besleme borusuna doğru hareket edecek ve yaklaştıkça radyal olarak dışa doğru yönelecektir. Ardından sirkülasyon bölgesindeki gaz akışı sonik sınırla temas ettiğinde, gaz akışı ile aynı yönde akışına devam edecektir. Sirkülasyon bölgesinin en sonunda ise gaz hızının sıfıra düştüğü durgun nokta bulunmaktadır. Durgun noktanın 15 mm altında ise mach diski oluşmuştur [22].

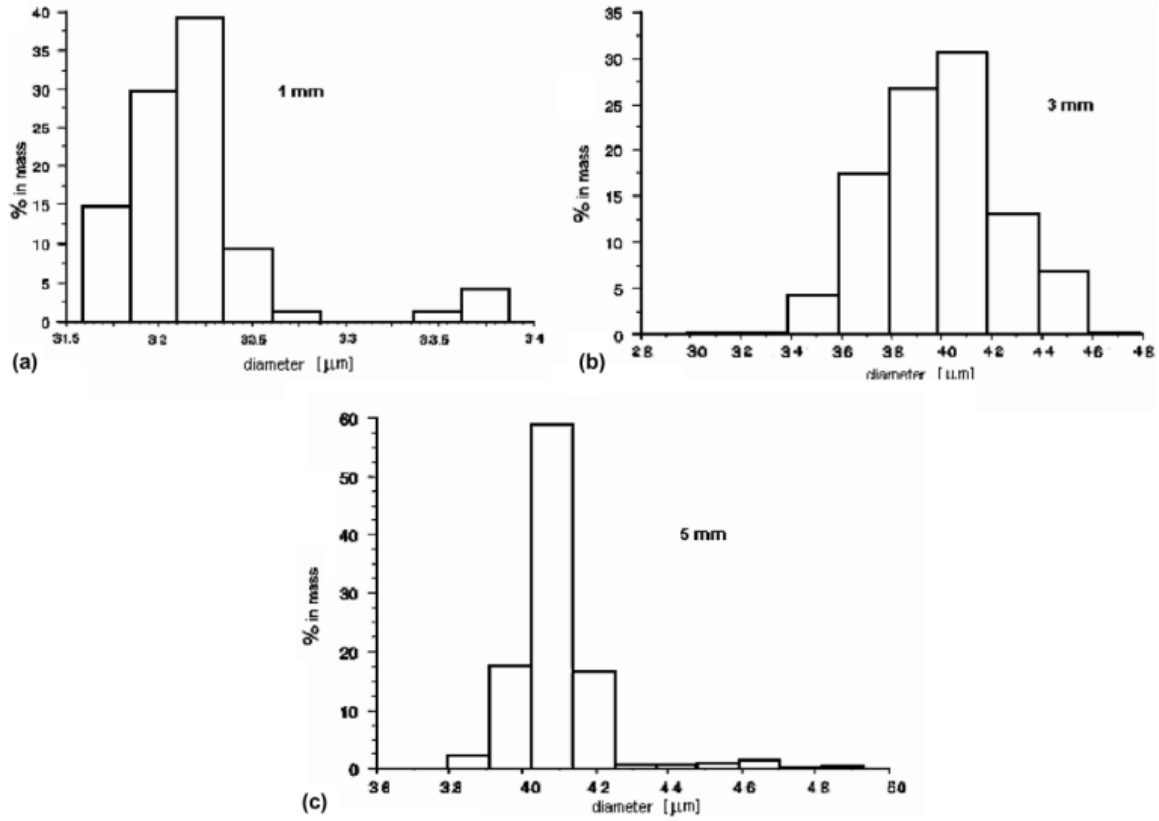


Şekil 2.20. a) Boğaz köşesinde oluşan sirkülasyon bölgesi, b) Ergiyik tüpü çıkışındaki sirkülasyon bölgesi [22]

Şekil 2.21’de görüldüğü üzere 1, 3 ve 5 mm belirlenen damlacıkların atomizasyon boyunca hız takibi yapılmıştır. Küçük damlacıkların daha çabuk hızlandığı ve çıkışta daha yüksek hızlara sahip olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.22’de ise farklı çaplara sahip damlacıkların parçalanma sonucunda toz partikül dağılımı incelenmiştir. İlk damlacık boyutu 1, 3 ve 5 mm olarak değişmesine rağmen sırasıyla toz partikül ortalaması 32 μm ; 39,9 μm ve 41 μm olarak gözlenmiştir [22].

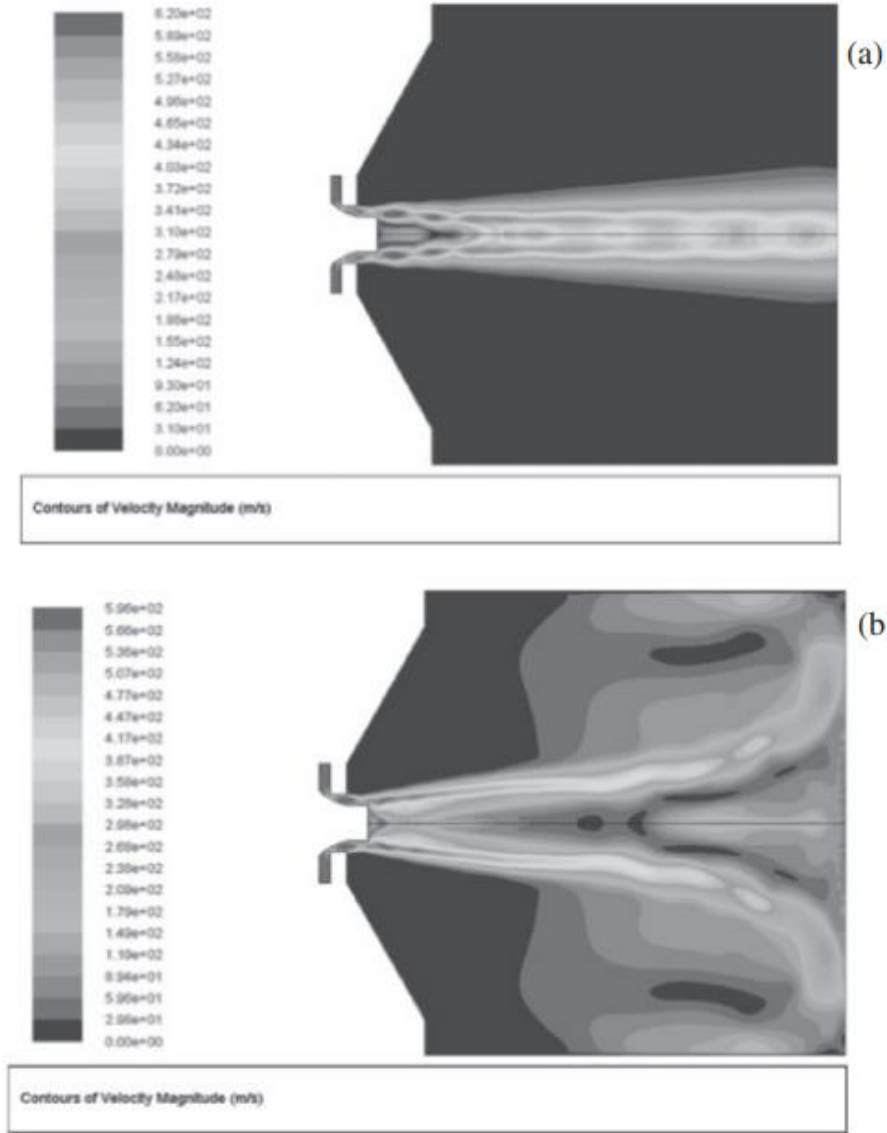


Şekil 2.21. 1, 3 ve 5 mm çapında damlacıkların zamana bağlı olarak hız analiz grafiği [22]



Şekil 2.22. 1, 3 ve 5 mm çapında damlacıkların toz partikül dağılımları [22]

Firmansayah vd. [12], atomizasyonda nihai partikül boyutunu belirleyen parametrenin ikincil atomizasyon olduğunu belirtmiş ve bu sebeple de 1 ve 5 mm arasındaki damlacıklara ikincil atomizasyon işlemi uygulayarak parçalanma işlemini sayısal olarak analiz etmiştir. Tek fazlı ve iki fazlı gaz-ergiyik metal olarak geliştirilen sayısal modelde kütle yükleme etkisinin en önemli parametre olduğu belirtilmiştir. Damlacık çapı 1 mm olan numunenin, deneysel sonuçlarla uyum sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca gaz basıncı ve sıcaklığın damlacık çapını küçülten en önemli parametre olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.23(a) ve (b)'de sırasıyla tek fazlı ve çift fazlı analiz sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 2.23. a) Tek fazlı gaz akış analiz sonuçları, b)Çift fazlı ergiyik metal-gaz akışı sonuçları [12]

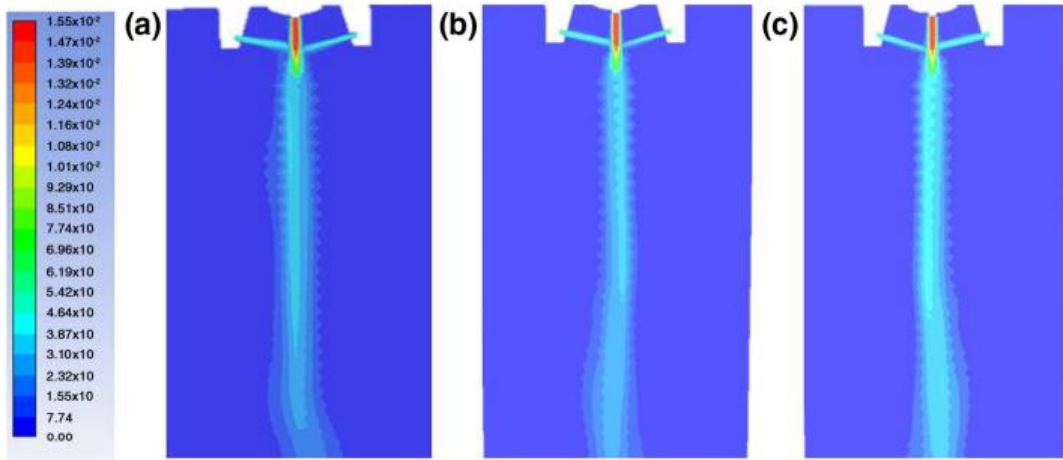
Şekil 2.23(a)'da görüldüğü üzere ergiyik olmadan yapılan tek fazlı gaz akış analizinde literatürdeki gaz akış analizlerine benzer olarak sıkışan-genişleyen Prandtl-Meyer dalgaları görülmektedir. Sıvı metal damlacıkları eklendiğinde çok daha küçük şok dalgaları görülmüş ve bu akış şeklinin kütle yükleme etkisine bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir [12]. Benzer bir çalışmada kütle yükleme etkisinin 0,1% gibi küçük oranda olsa daha bile atomizasyon işlemini önemli bir şekilde etkileyeceği belirtilmiştir [42]. Bu çalışmada, kütle yükleme oranı gaz-metal oranı 1:1 iken 95% oranında hesaplanmıştır. Kütle yükleme etkisinden dolayı Şekil 2.23(b)'de

görüldüğü üzere toplam gaz hızı azalmış ve gazın düzenli akış yerine daha dağınık bir akış izlediği gözlenmiştir. Çizelge 2.2’de simülasyon ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılan değerlerin literatürle uyum için de olduğu belirtilmiştir [12].

Çizelge 2.2. Geliştirilen Simülasyon Sonuçları [12, 22, 43]

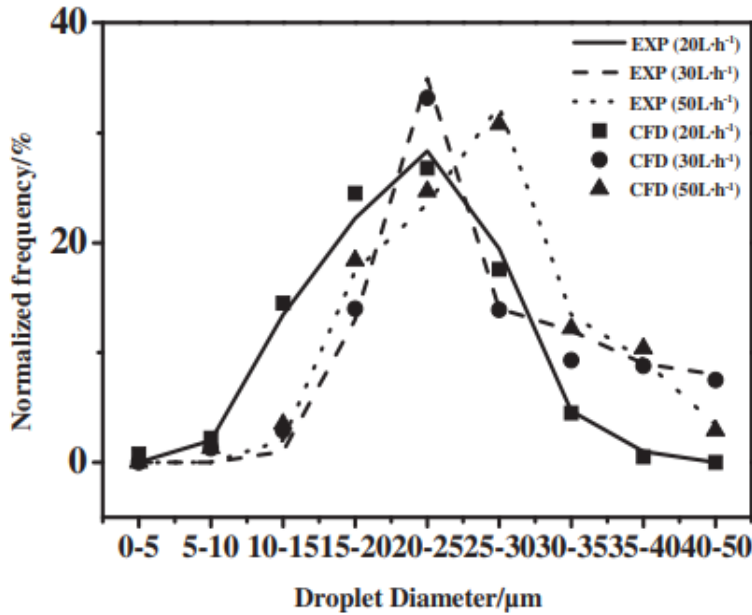
Damlacık Çapı	d_{50} (μm)	d_{84} (μm)	d_{84}/d_{50}
1 mm	37,3	79,6	2,1
3 mm	42,3	102	2,4
5 mm	44,8	117	2,6
Deneysel [43]	37,3	84,6	2,3
Simülasyon [22]	39,8	42,8	1,1

Li vd. [44], literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, farklı malzemelere sahip atomizerler kullanarak malzemelerin rezistans katsayısının damlacık boyutu ve dağılımına etkisini sayısal olarak incelemiştir. Parçalanma mekanizmasında kütle akış oranı ile Reynolds sayısının pürüzlülüğün etkisi ile değiştirebileceği belirtilmiştir. Sayısal modelde farklı kütle oranlarında kullanılan etil asetat (10%-20%) ve atomizasyon kulesi materyali ilk olarak alüminyum materyali seçilmiştir. Farklı kütle oranlarında karşılaştırılan analiz sonuçları Şekil 2.24’te gösterilmiştir. Sonuç olarak kütle oranı artıkça, gaz akış kontürlerinin değişmediği gözlenmiştir.



Şekil 2.24. Farklı kütle oranlarında (m.s^{-1}) hız kontür grafikleri a) 20 L.h-1, b) 30 L.h-1 c) 50 L.h-1 [44]

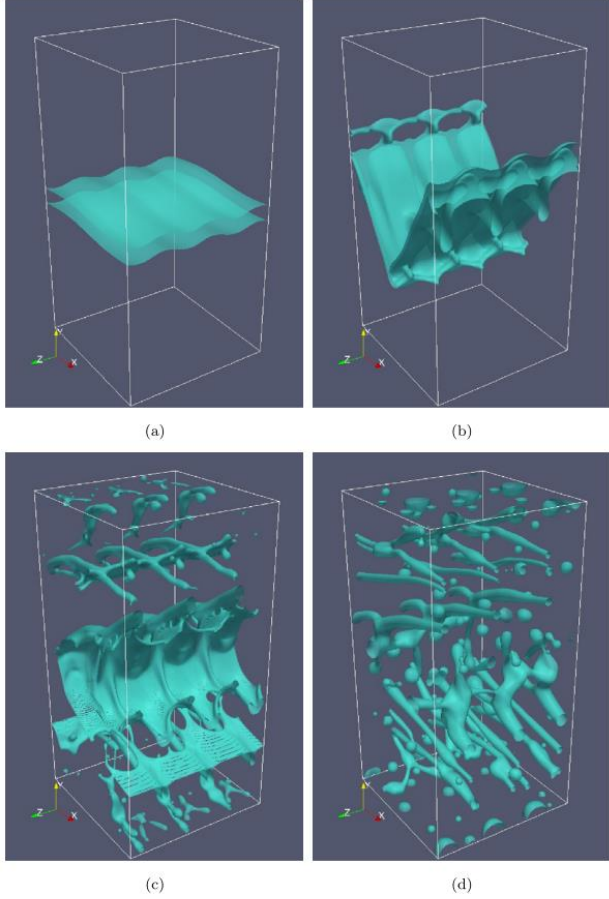
Şekil 2.25'te görüldüğü üzere farklı kütle oranlarına (20 L.h^{-1} ; 30 L.h^{-1} ; 50 L.h^{-1}) sahip analizlerde, damlacık parçalanma mekanizmasının deneysel ve sayısal model sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal model sonuçlarda damlacık çapları dağılımı $15\text{-}35 \mu\text{m}$ aralığında tespit edilmiştir. Kütle akış oranı 20 L.h^{-1} 'den 50 L.h^{-1} 'e çıkarıldığı zaman damlacık dağılımı $20,4 \mu\text{m}$ 'den $29,8 \mu\text{m}$ 'ye artmıştır. Besleyici etil asetat materyalin artmasıyla, atomizasyon işlemi için yeterince enerji aktarılamadığından damlacık boyutunda artış gözlenmiştir. Deneysel ve sayısal model arasındaki sonuçlarda damlacık dağılımının $2\text{-}5 \mu\text{m}$ arasında değiştiği, kısacası sonuçların oldukça yakın olduğu görülmüştür [44].



Şekil 2.25. 0.2 MPa atomizasyon basıncında damlacık dağılımlarının farklı kütle oranlarında deneysel ve sayısal analiz sonuçları (m.s-1 a) 20 L.h^{-1} , b) 30 L.h^{-1} c) 50 L.h^{-1} [44]

Zuzio vd. [45], CEDRE kodu ile atomizasyon sürecini simüle etmek için ONERA'da çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Hem gaz-metal arayüz yakalama hem de ayrıntılı arayüz algoritmaları test edilmiştir. CEDRE'nin mevcut çözücüsünün multi-fluid versiyonu uygulanmaktadır. Araştırmanın önemli noktalarından biri, multi-fluid yöntemini CEDRE'nin dağılık faz çözücülerinden biriyle birleştiren bir yöntemeye dayanmaktadır. Uzun vadeli amacın hem birincil hem de ikincil atomizasyonun sayısal simülasyonunu gerçekleştirebilmek olduğu belirtilmiştir. Çalışma atomizasyonda parçalanma mekanizmasını simüle etmek için ONERA'da kullanılan sayısal yöntemlerin bir incelemesi ve ayrıca ONERA CEDRE koduna entegre edilerek yeni bir

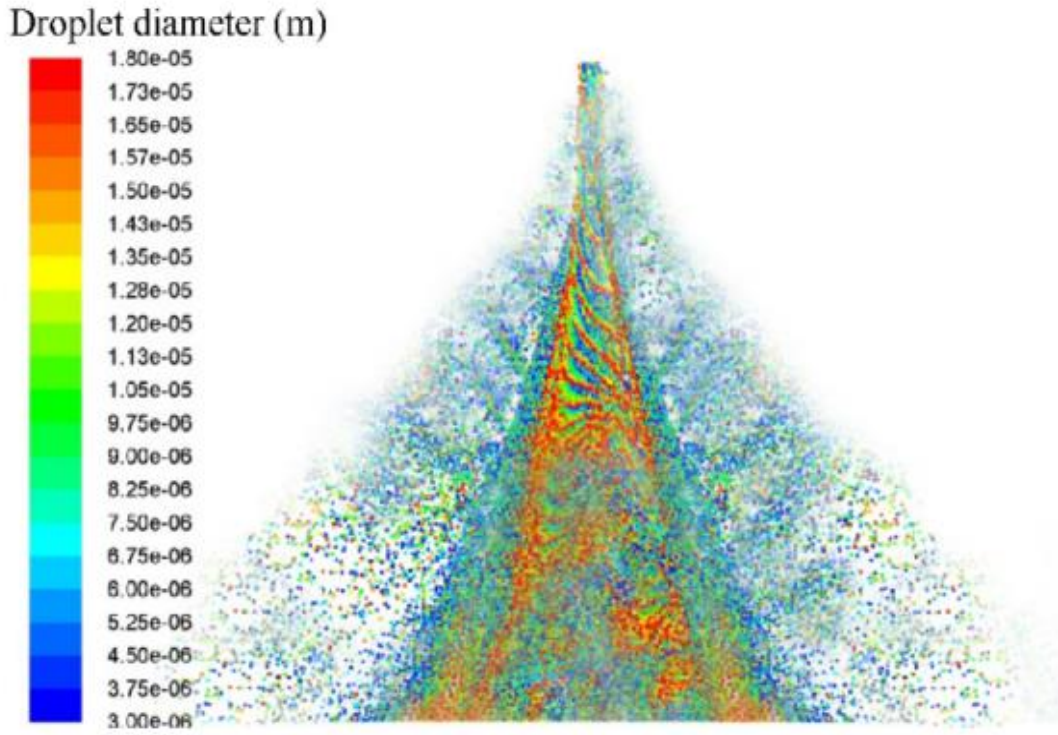
hibrit çözücünün geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. İlk aşamada birincil atomizasyonu simüle etmek için ONERA'da gerçekleştirilen ve deneysel olarak doğrulanmış olan iki ve üç boyutlu simülasyonlar üzerinde uygulanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise birincil ve ikincil atomizasyonun simülasyonunu gerçekleştirmeyi amaçlayan yeni bir hibrit çözücü üzerine çalışılmış ve Şekil 2.26'da analiz sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Yüksek çözünürlükte parçalanma mekanizmasının birincil ve ikincil atomizasyon sonuçları [45]

Mohammadi ve Ommi [46] çalışmalarında, ikiz-akışlı iki fazlı atomizerde damlacık dağılımında maksimum entropi methodu geliştirmek için analitik, sayısal ve deneysel olarak inceleme yapmışlardır. İç ve dış atomizerin atomizasyon modellemesi için iki fazlı Euler-Lagrange yöntemi kullanılırken, gölge grafiği yöntemiyle de simülasyondan elde edilen verileri deneysel olarak doğrulanmıştır. Geliştirilen türbülans akış ve maksimum entropi metodu arasındaki yüksek uyum sayesinde damlacık boyutu ve damlacık hız dağılımları tahmin edilebilmiştir.

Şekil 2.27’de görüldüğü üzere, damlacık dağılımı geliştirilen sayısal Lagrange metodu sayesinde partikül takibi yapılarak modellenmiştir. Artan gaz basıncı sayesinde daha küçük çapta damlacıklar elde edildiği belirtilmiştir. 2,58 g/s sıvı akış oranında, gaz-sıvı oranı 0,1; 800 kPa nitrojen giriş basıncında ve maksimum penetrasyon uzunluğu 350 mm olarak belirlenen parametrelerde partikül dağılımı 3-18 μm olarak bulunmuş ve Şekil 2.27’de simülasyon sonuçları gösterilmiştir [46].

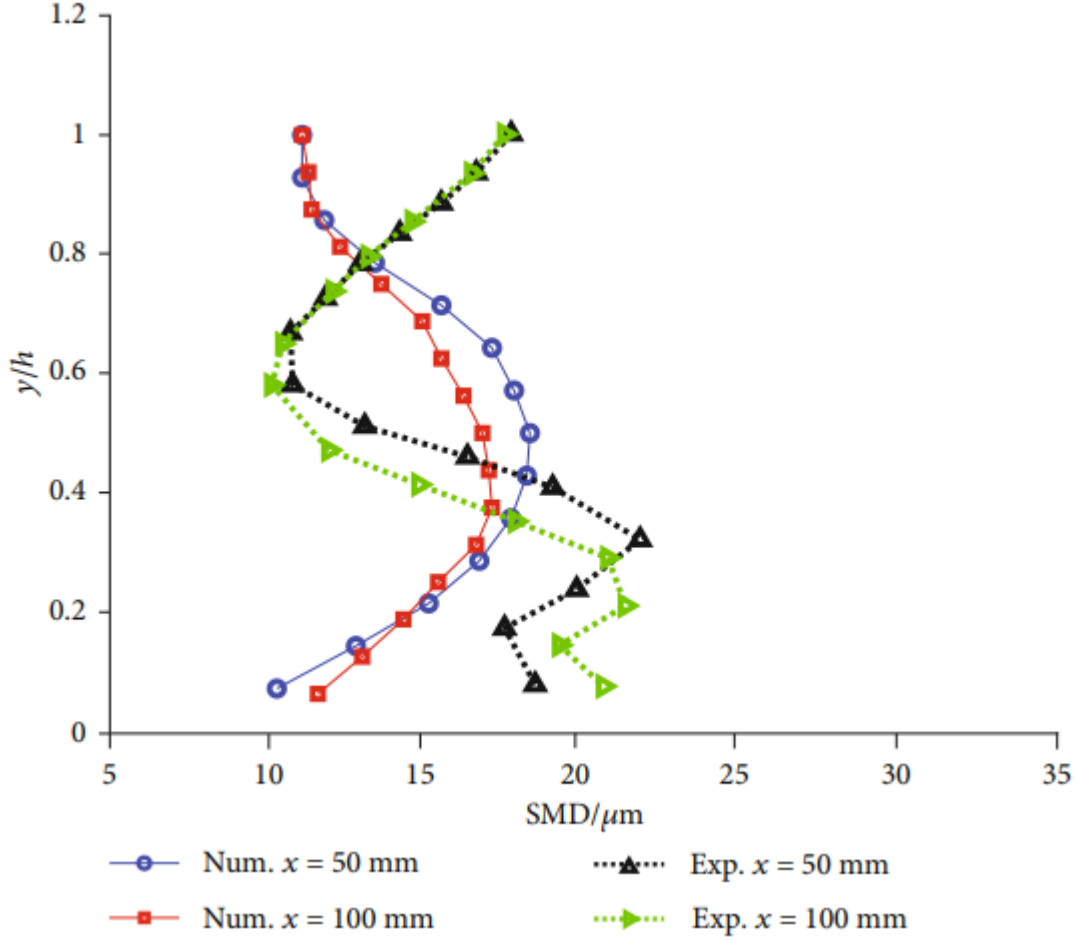


Şekil 2.27. Atomizasyon çemberinde damlacık çapı dağılımı [46]

Wang vd. [47] çalışmasında, süpersonik akışta atomizasyon prosesinde parçalanma mekanizmasının Euler-Lagrange methodu ile sayısal olarak incelemek için Kelvin-Helmholtz parçalanma modeli, ikincil atomizasyonda ise Kelvin-Helmholtz (KH) ve Rayleigh-Taylor modelleri (RT) kombine edilerek analiz gerçekleştirilmiştir. KH-RT modelinde ampirik sabitler değiştirilerek model geliştirilmiştir.

Simülasyonda aşağı yönlü akış profili ve damlacıkların dağılımları 1,94 Mach hızında başarı ile modellenmiştir. Kelvin-Helmholtz parçalanma modelinin Rayleigh-Taylor parçalanma

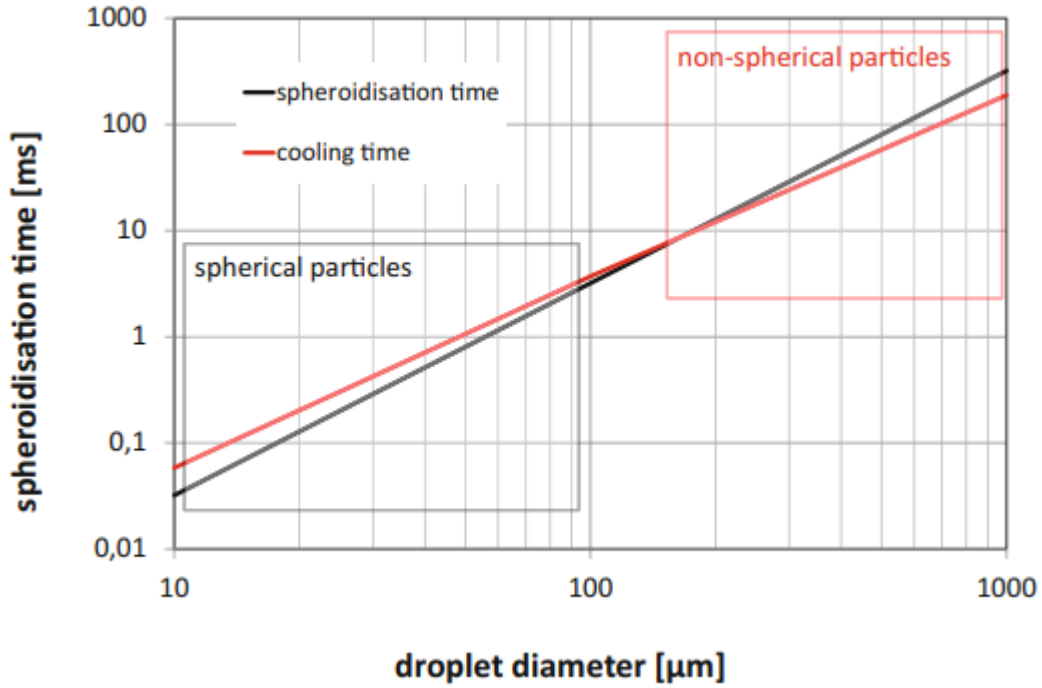
modeline göre daha verimli olduğu ve Sauter Ortalama Çap dağılımının başarı ile tespit edildiği belirtilmiştir. Merkez eksenin farklı bölgelerinde Sauter Ortalama Çap değerleri Şekil 2.28’de gösterilmiştir [47].



Şekil 2.28. Merkezi düzlemde farklı konumlarda Sauter ortalama çap dağılımında model doğrulanması [47]

Tomar vd. [48], damlacıkların dağılımını simüle etmek için sıvıların hacmi algoritmasını Lagrange partikül takibi metodu ile bir araya getirerek birincil atomizasyonda parçalanma mekanizmasını simüle etmiştir. Spatial-hashing algoritması sayesinde partikül arası çarpışma başarılı olarak tahmin edilmiştir. Geliştirilen model sayesinde Lagrange parçacıkları ve sıvı-gaz arasındaki çift yönlü analiz sayesinde sıvıdaki momentum kazanımını ve kaybını içerdiği ve analiz sonuçlarının başarılı olduğu belirtilmiştir.

Dopler [49] çalışmasında, ilk olarak, ergiyik özelliklerinin küreselleşme üzerindeki etkisini ayrı ayrı tahmin etmek için ergiyik damlasına 4-kuvvetli bir model (viskozite, yüzey gerilimi, dış dinamik ve atalet kuvvetleri) uygulamıştır. İkinci olarak ise bakır, demir ve titanyum gibi farklı malzemeler için küreselleştirme işlemini hesaplamıştır. Şekil 2.29'da görüldüğü gibi, geliştirilen modelde büyük damlacıklarda küçük damlacıklara göre küreselleşme işlemi için daha fazla zaman gerektiği ve aynı zamanda soğuma süresinde daha uzun sürdüğü belirtilmiştir.

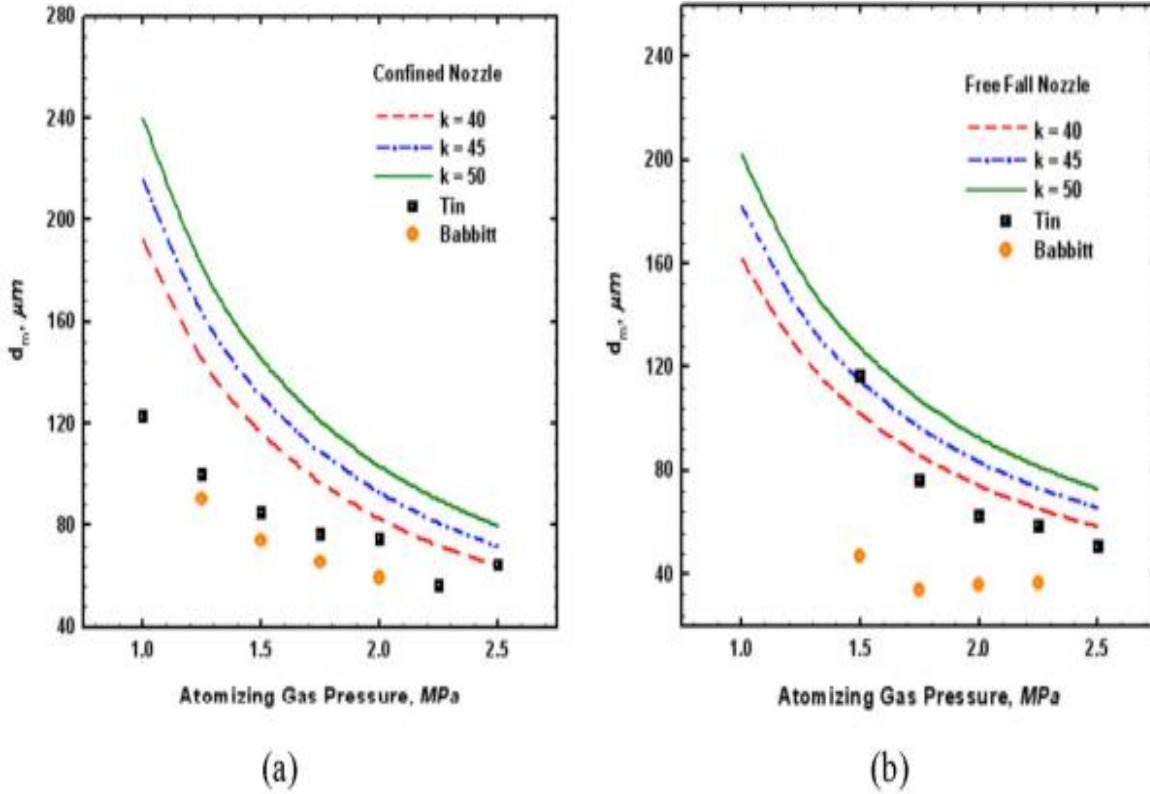


Şekil 2.29. 200K sıcaklıkta çelik damlacıklar için küreselleşme ve soğuma süresi [49]

Lena vd. [50], gaz atomizasyon toz üretim yöntemini iki fazlı Lagrange-Euler yöntemiyle analiz eden modelde, partikül boyutuna ve aşırı soğutmaya bağlı olarak katılaşmanın konumunu tahmin edebilmektedir. Parçacıkları çevreleyen argon gazı ile ergiyik metal arasında momentum, ısı ve türbülans denklemleri çözümlenmiştir. Ayrıca uydu kusurlarının oluşumunu hesaplamak için, partiküllerin birbiri ile çarpışma haritaları çıkarılmıştır. Araştırmacılar tarafından geliştirilen Multi-Physics FV kodu PHYSICA'yı kullanan modelde partikül çapı dağılımı Gauss yasasına göre hesaplanmış olup 50 μm olarak belirtilmiştir.

2.2.4. Deneysel araştırmalar

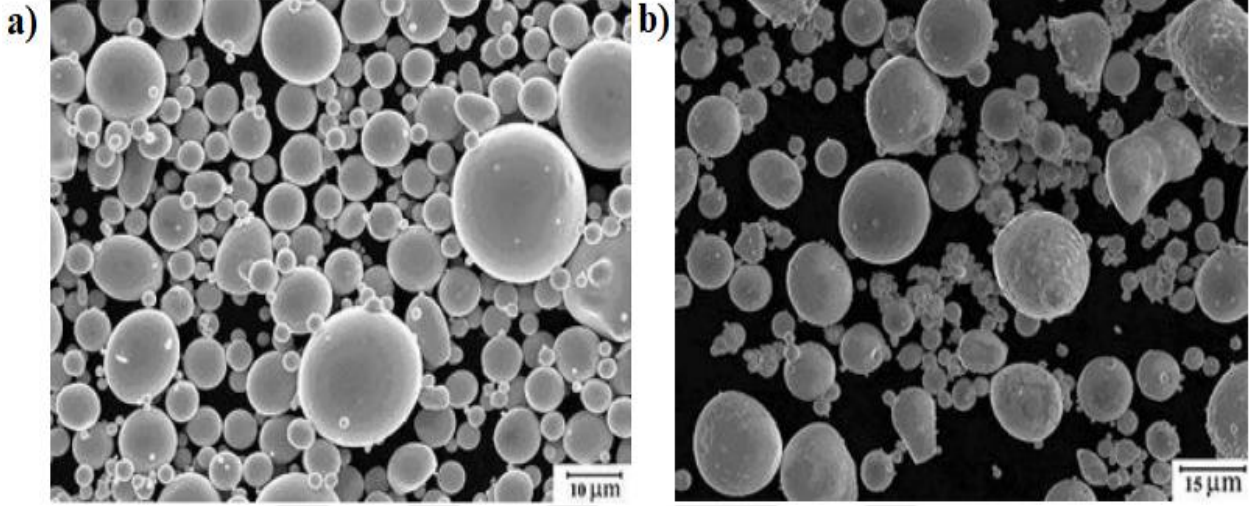
Morakotjında vd. [51], düşük ergime noktasına sahip kalay ve babbitt metalinde akış oranı, partikül boyutu ve mikroyapısını incelemişler ve geliştirdikleri analitik model ile sonuçları karşılaştırmışlardır. Tozların boyut dağılımı Lubanska denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Lubanska denklemiindeki “K” sabiti 40 olarak değıştirildiğinde, deneysel ve analitik sonuçların oldukça yakın olduğu belirtilmiştir. Farklı “K” sabiti için elde edilen sonuçlar iki farklı nozul tipi için karşılaştırılmış ve şekil 2.30’da gösterilmiştir.



şekil 2.30. a) İzole edilmiş nozul b) Serbest düşmeli nozul için Lubanska “K” sabitine göre karşılaştırılması [51]

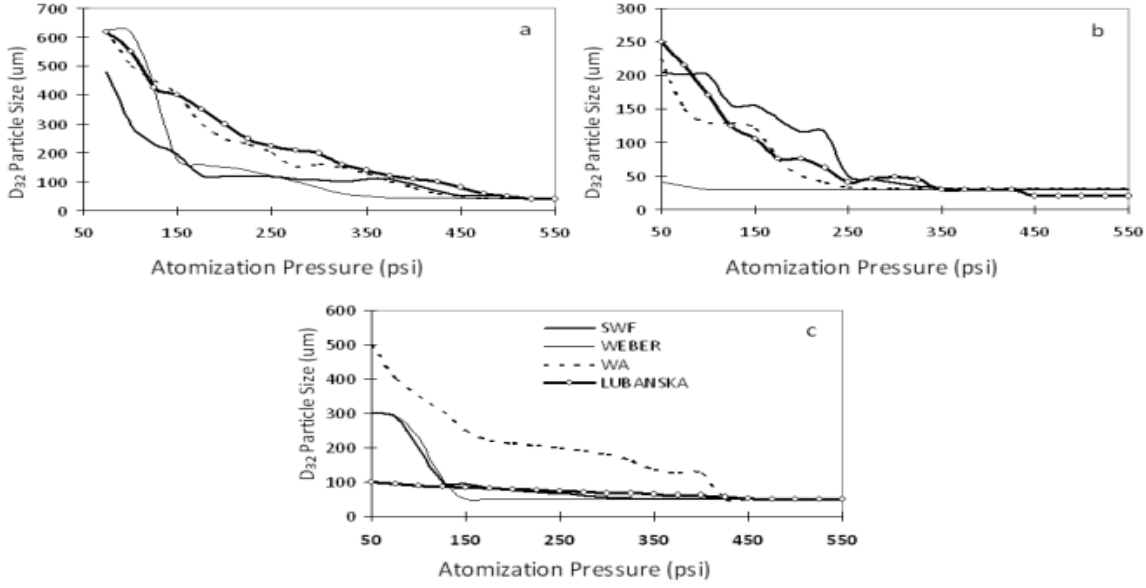
Çalışmada gaz atomizasyon işleminde metal tozları küresel şekilde üretilmiştir. Gaz atomize toz partiküllerin mikroyapısı incelendiğinde katılaşmanın çekirdeklenme ve büyüme yoluyla gerçekleştiği belirtilmiştir. Ayrıca atomize edilmiş babbitt metalinde, matris katılaşmasına ek

olarak intermetalik bileşiklerin çökmesi meydana gelmiştir. Şekil 2.31’de Kalay ve Babbitt metal tozları için morfolojileri gösterilmiştir [51].



Şekil 2.31. a) Kalay Tozları b) Babbitt metal tozları morfoloji görüntüleri [51]

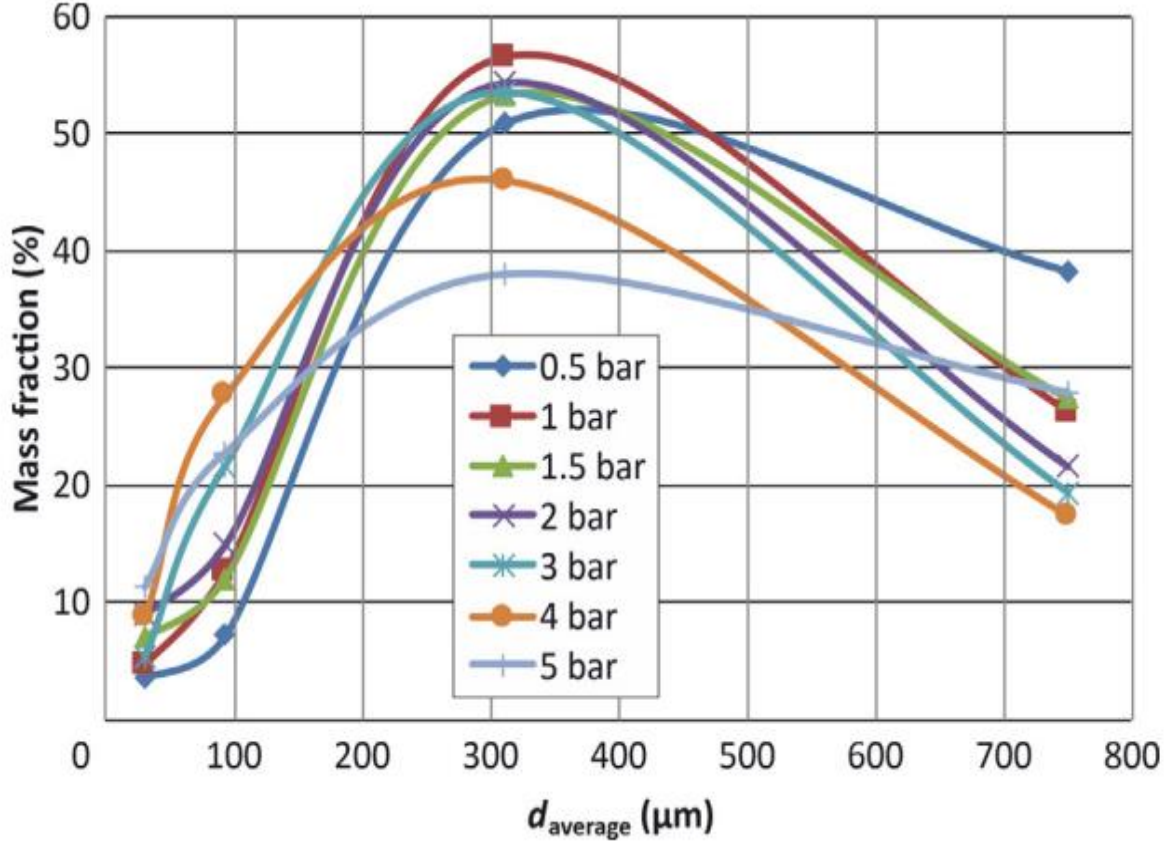
Antipas [52], alüminyum alaşımlarının azot, helyum ve argon gazı ile atomizasyonunu araştırmış ve partikül dağılımını tahmin eden analitik modeller geliştirmiştir. Yakından eşlemeli gaz atomizasyonda en küçük partikül boyutu dağılımının enerji aktarımının en yüksek seviye olduğu konisel bölgenin merkezine yakın konumda olduğu gözlenmiştir. Artan gaz atomizasyon basıncı sayesinde partikül çaplarının küçüldüğü ve yeterli yüksek gaz basıncı sağlandığı zaman tüm partiküllerin kolloidal dağılımda aynı özellikte ve büyüklükte olduğu atomizasyon işlemi gerçekleşmektedir. Helyum ile atomizasyonda, argon ve azota göre daha küçük partiküller üretilbildiği ve azotun en büyük partikül dağılımına sahip olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.32’de Sauter D_{32} partikül dağılımında atomizasyonda kullanılan gaz türüne bağlı olarak analizler gösterilmiştir.



Şekil 2.32. D32 Partikül boyutunda atomizasyon gaz tipinin partikül boyutuna etkisi a) Azot b) Helyum c) Argon [52]

Yüzey Dalgası Oluşumu modeli, Weber ve Wolf-Andersen modelleri sayesinde iki-fazlı akışlarda parçalanma incelendiğinde, daha küçük partiküllerin merkez eksenin etrafında olduğu ve merkez eksenden uzaklaştıkça partikül boyutunun büyüdüğü tespit edilmiştir. Parçalanma modelleri karşılaştırıldığında Yüzey Dalgası Oluşumu modeli Kelvin-Helmholtz modeline dayandığından partikül boyutu dağılımı hakkında daha kapsamlı bilgi verirken, Wolf-Andersen modeli tekil dağılım modellerinde başarılı olmadığından partikül boyutu tahmininde yeterli olmadığı belirtilmiştir [52].

Tsirlis ve Michailidis [53], venturi etkisine dayanan gaz atomizasyonda venturi nozulunun dar kısmında düşük statik basınçta sıvı metal emilimi ve gaz etkileşimi ile atomizasyon sağlanmıştır. Bu yöntem ile diğer atomizasyon yöntemlerine göre 30 kat kadar daha düşük gaz basıncında atomizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Gaz basıncının 0,5 Bar'dan 4 Bar'a yükseltilmesiyle daha ince alüminyum partiküller üretilmiş ve parçacıkların ortalama toz boyutu dağılımı 150 μm olarak belirtilmiştir. Karbondioksit ile gerçekleştirilen atomizasyonda, parçacıklıkların küresel ve neredeyse pürüzsüz olduğu ayrıca gaz basıncı artırıldıkça alüminyum tozunun küreselliği ve boyut dağılımında iyileşme olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.33'te gaz basıncı artışına bağlı olarak, atomize tozların partikül dağılımı gösterilmiştir.

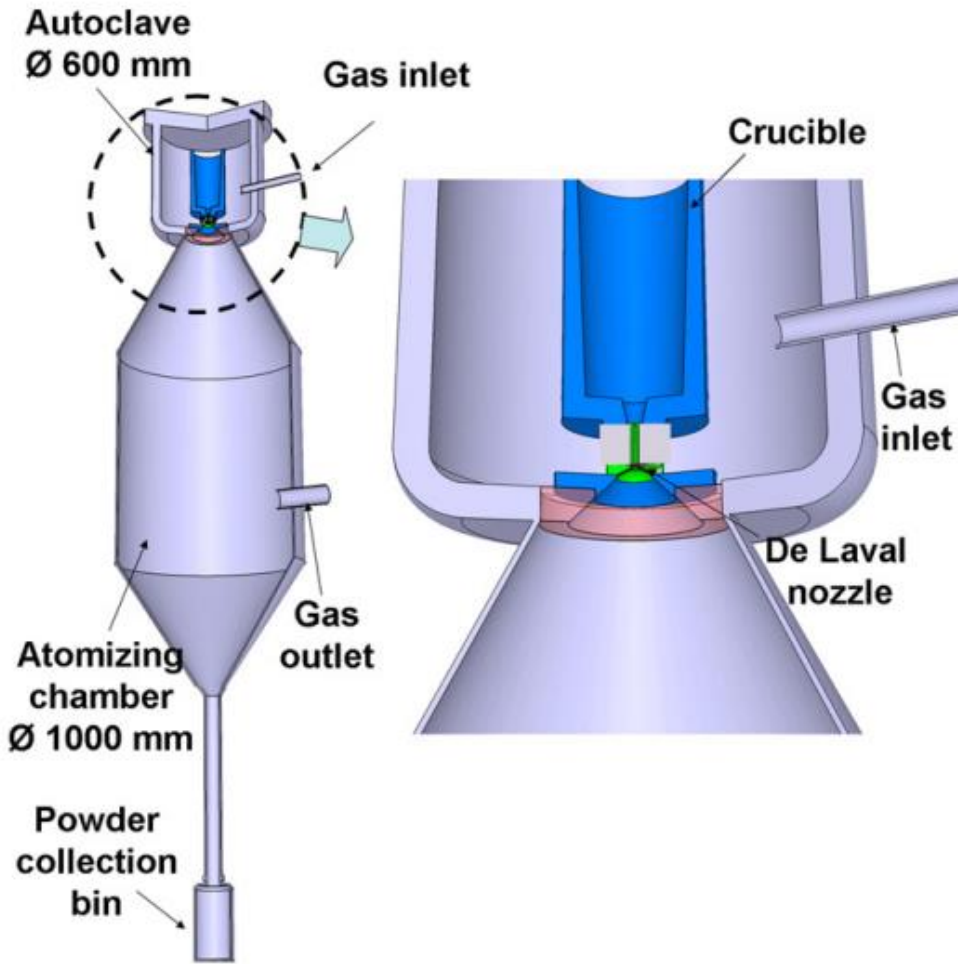


Şekil 2.33. Farklı basınç dağılımlarında metal tozlarının toz dağılımı [53]

Atomizasyonda tozlarının şekli küreselleşme süresi ve katılaşma süresine bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Eğer küreselleşme süresi katılaşma süresinden kısa ise düzensiz partiküller, tam tersi durumda daha küresel parçacıklar elde etmişlerdir. Eleme analizi sonucunda medyan çapı D_{50} 141 ile 245 μm arasında ve dağılım aralığı 410 – 550 μm aralığında olduğu belirtilmiştir [53].

Allimant vd. [24] çalışmasında, atomizasyon işlemi sırasında zamana bağlı olarak potadaki ergiyik metalin miktarı azalmasının kütle akış oranını etkilediği ve bu sebeple de gaz basıncının kütle akış hızı değişimiyle oranını sabit tutmak için bir model geliştirilmiştir. Bu sayede zamana bağlı olarak gaz-ergiyik metal oranı istenilen şekilde ayarlanacak ve böylece atomizasyonda artan verim sayesinde ortalama parçacık boyutu dağılımı daha küçük metal tozları elde edilebilecektir. Proses sırasında gelişmeleri anlamak için modelleme çalışması deneysel sonuçlarla birleştirilmiş ve potanın boşalmasını tahmin etmek için basitleştirilmiş bir model

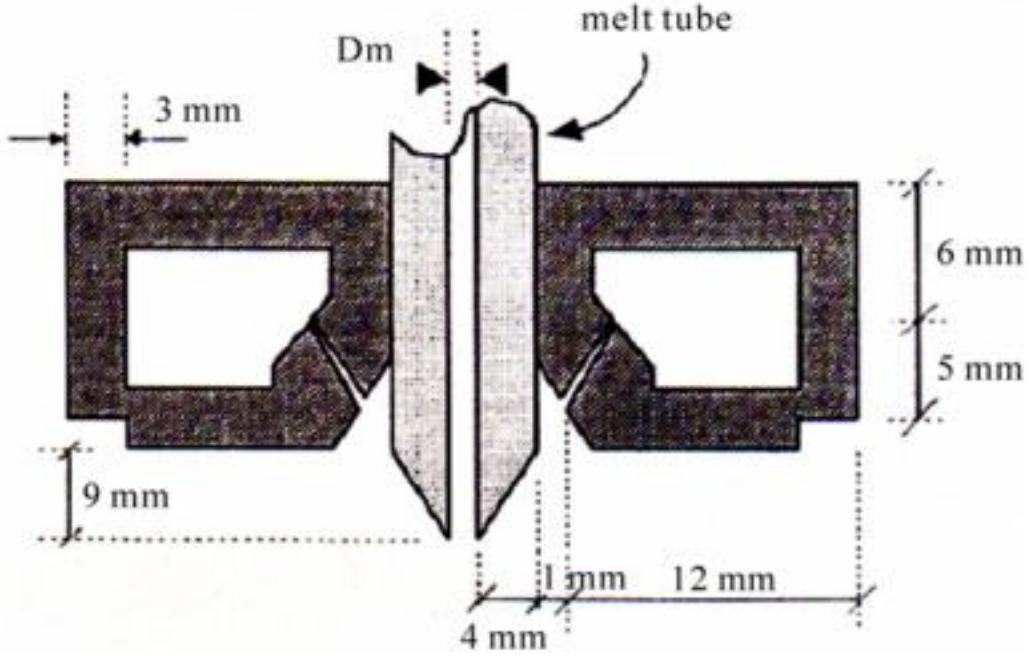
kurulmuştur. Ergiyik kütle akışı azalmasının etkilerini azaltmak için atomizasyon basıncının ayarlanmasına yönelik kurulan sistemde, otoklav içerisindeki basınç 4×10^5 Pa'dan 14×10^5 Pa'a arttırıldığında ortalama partikül çapının $59 \mu\text{m}$ 'den $44 \mu\text{m}$ 'ye azaldığı belirtilmiştir. Ortalama partikül boyutunun zamanla azalmasının sebebinin ise, atomizasyon havzası ve otoklav içerisindeki basınç sabit tutulurken ergiyik basıncının azalması olduğunu gözlemişlerdir. Şekil 2.34'te görüldüğü üzere, geliştirilen yöntem sayesinde gaz-ergiyik metal oranı zamana bağlı olarak artacak ve partikül boyutlarında azalma oluşacaktır.



Şekil 2.34. Geliştirilen Atomizasyon Sistemi [24]

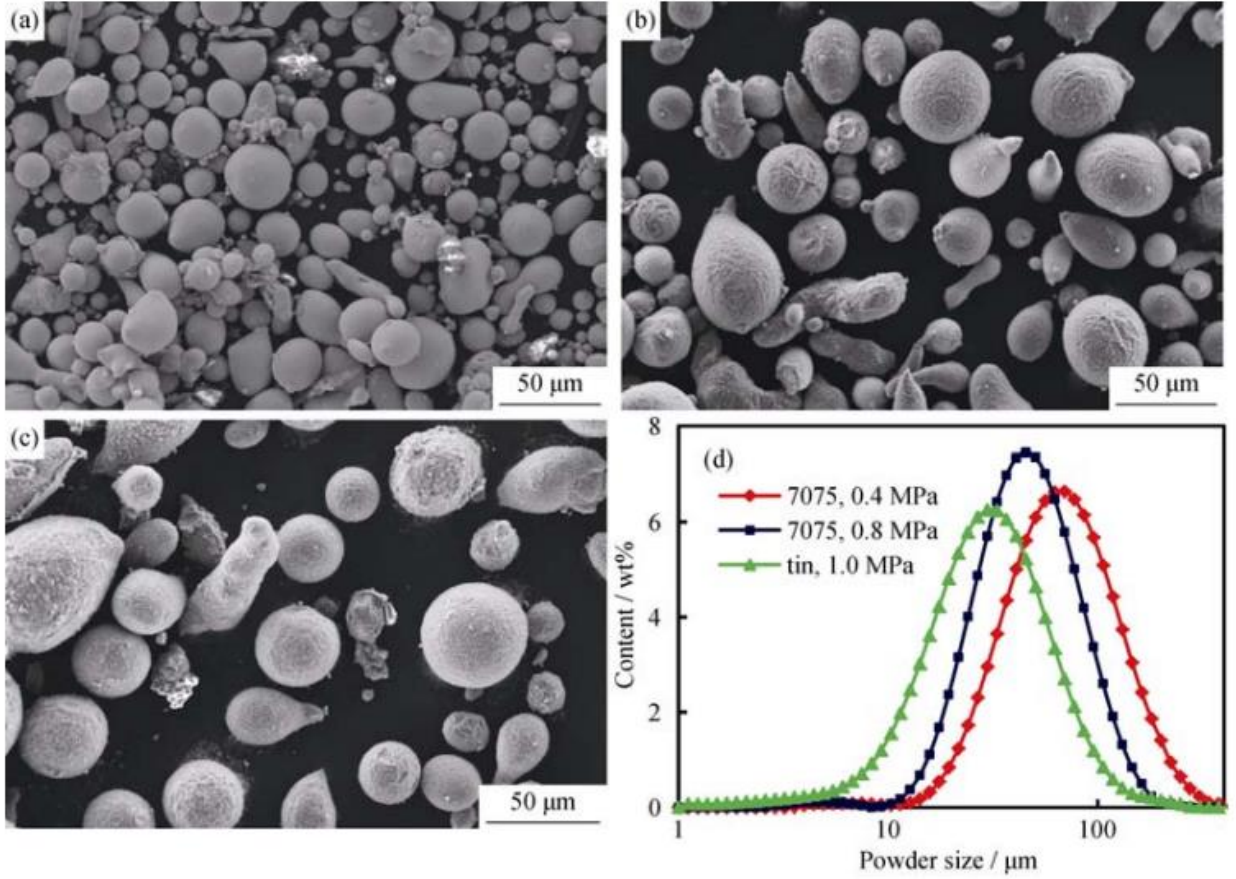
Antipas [54], Şekil 2.35'te görüldüğü üzere 3 mm çıkış çapına sahip atomizerde suyun, 0,68 MPa'da nitrojen, argon ve helyum gazlarının atomizasyonunu incelemiş ve yüksek hızda görüntüleme ve faz-doppler anemometrisi ile gözlemlemişlerdir. Düşük viskozitesi sayesinde

suyun atomizasyonu sırasında daha büyük yüzey dalgaları gerçekleşeceği belirtilmiş ve su kolonunun parçalanma mekanizması incelenmiştir. Parçalanma boyunca parçacık boyutu dağılımı, simetrini ekseninden uzaklaştıkça parçacık boyutlarında azalma eğilimi göstermiştir.



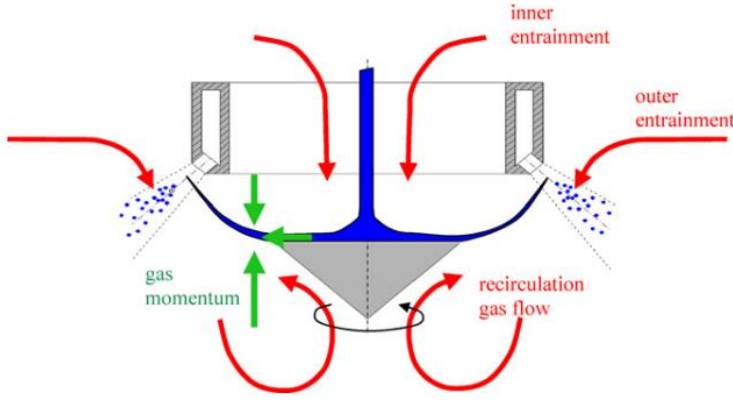
Şekil 2.35. Yakından eşlemeli gaz atomizer tasarımı [54]

Si vd. [55], düşük gaz basıncında ergiyik metalin atomizasyonu için yakınsak-ıraksak süpersonik gaz atomizeri tasarlamışlar ve farklı parametrelerde gaz atomizasyon verimliliğini test etmişlerdir. Analizler sonucunda maksimum gaz hızı 0,7 MPa P_0 basıncında, 440 m/s olarak elde edilmiştir. P_0 basıncı 1,1 MPa ulaştığı zaman, ergiyik tüpü altında oluşan durma basıncının minimum seviyede olduğu belirtilmiştir. Saf kalayın atomizasyonu 1 MPa'da ve 7055 Alüminyum alaşımı atomizasyonu ise $P_0=0,8$ MPa ve $P_0=0,4$ MPa'da gerçekleştirilmiş elde edilen sonuçlarda toz partikül ortalama çapları sırasıyla 28,6 μm ; 43,4 μm ve 63,5 μm olarak elde edilmiştir. Şekil 2.36'da atomizasyon sonucunda elde edilen tozların TEM görüntüleri gösterilmiş, tasarlanan atomizer düşük basınçta diğer atomizelere göre çok daha verimli olduğu belirtilmiştir.



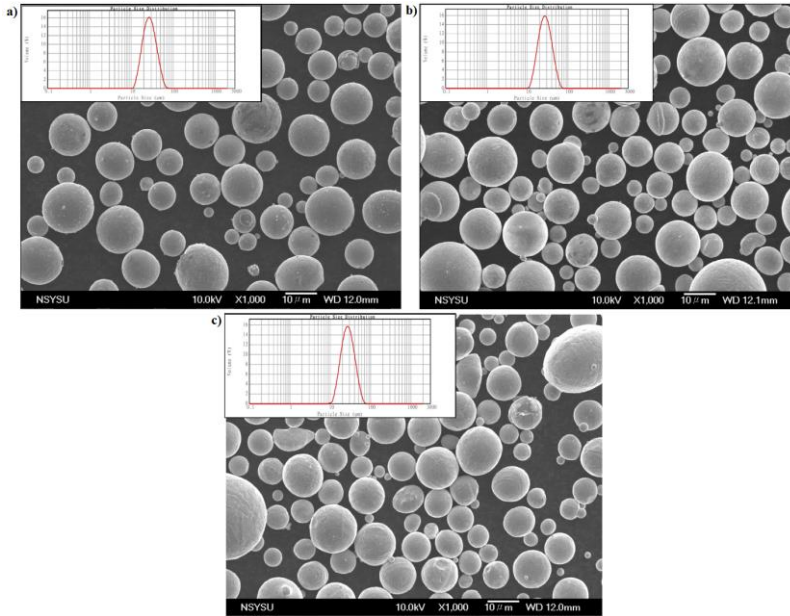
Şekil 2.36. Atomize tozların (a–c) TEM görüntüleri ve toz boyutu dağılımları (d): (a) kalay/1,0 MPa; (b) 7075 Alüminyum/0,8 MPa; (c) 7075 Alüminyum/0,4 MPa [55]

Fritsching ve Uhlenwinkel [27], viskoz sıvıların ve ergiyiklerin verimli bir şekilde parçalanması için karakteristik akış etkilerinden yararlanan dış karıştırıcı gaz atomizer ile klasik döner atomizasyonun kombine edildiği bir gaz atomizasyon ünitesi geliştirmişlerdir. Tasarım sayesinde atomizasyon işlemi gerçekleşmeden önce, sıvı akışı ilk olarak ince bir çarşaf tabakaya dönüşür ve özgül yüzey enerjisi parçalanma gerçekleşmeden önce artırılır. Yüksek viskoziteye sahip sıvıların parçalanması için tasarlanan atomizer deneylerinde, sıvı olarak gliserol ve atomizer gaz olarak hava kullanılmıştır. Literatürde, su gibi düşük viskoziteli sıvıların atomizasyonunda verimsiz olduğu belirtilen hibrit atomizasyon modelinin, yüksek viskoziteli sıvılarda geleneksel harici karıştırma atomizerlerine göre daha yüksek verimliliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ortalama parçacık boyutunun 210 μm olduğu, bu ortalama partikül dağılımının gaz sıcaklığı parametreleri değiştirilerek optimize edilebileceği belirtilmiştir. Şekil 2.37’de gaz atomizerin çalışma prosesi ve tasarımı gösterilmiştir.



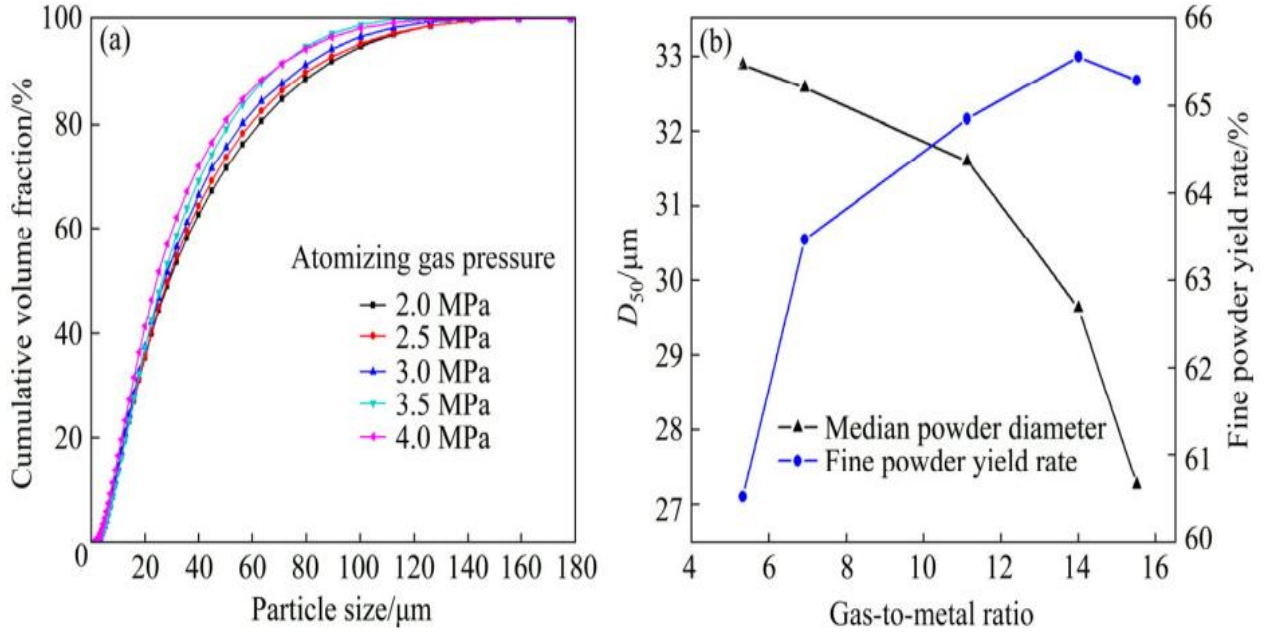
Şekil 2.37. Gaz atomizer tasarımı ve prosesi [27]

Yang vd. [56], Şekil 2.38’de taramalı elektron mikroskobu (TEM) mikrografları gösterilen yüksek entropiye sahip $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$, $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNiSi}_{1.2}$ ve $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNiSi}_{2.0}$ alaşımlarını pürüzsüz ve küresel bir şekilde üretmişler ve ortalama partikül boyutu D_{50} 27 μm olarak hesaplanmıştır. Silikon eklenmesi ile yüksek soğuma oranları elde edilmiş bu sayede daha düşük segregasyona sahip ve alaşımın kristallliği azaltılmadan tozların sertliği 200,5 HV’den 751,8 HV’ye çıkarılmıştır. Üretilen tozların eklemeli imalat teknolojisini kullanan üretim yöntemlerinde kullanılabileceği belirtilmiştir.



Şekil 2.38. a) $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$, b) $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNiSi}_{1.2}$ ve c) $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNiSi}_{2.0}$ alaşımlarının TEM mikrografları ve partikül dağılımı [56]

Gao vd. [57], çift-nozula sahip gaz atomizasyonda AlSi10Mg tozunu üretmiş, ergiyik tüpü çapının, gaz basıncının ve ergiğin aşırı ısıtılmasının toz karakteristiğine etkisine incelemiştir. Toz küreselliği ve uydulaşmayı kavramları körlük ve aşırı büyüme miktarı olarak incelenmiştir. Sonuçlarda tozların medyan çapları 25 ve 33 μm arasında olup, 50 μm 'den küçük çapa sahip yüksek kalitede tozların 72,13% akma oranında ve 350 K'lık bir yüksek ısıtma miktarında elde edildiği belirtilmiştir. Toz partikül boyutu, ergiğin artan yüksek ısıtma miktarıyla birlikte azalmıştır. Tozların 60%'sinde körlük değerleri 96% ve 98% aralığında yer almakta ve ayrıca tüm tozların 70-85% aralığında uydulaşmayı içermediği belirtilmiştir. Şekil 2.39'da farklı gaz giriş basınçlarında parçacık boyutu dağılımı ve gaz-ergiyik oranına bağlı olarak D_{50} dağılımı gösterilmiştir.

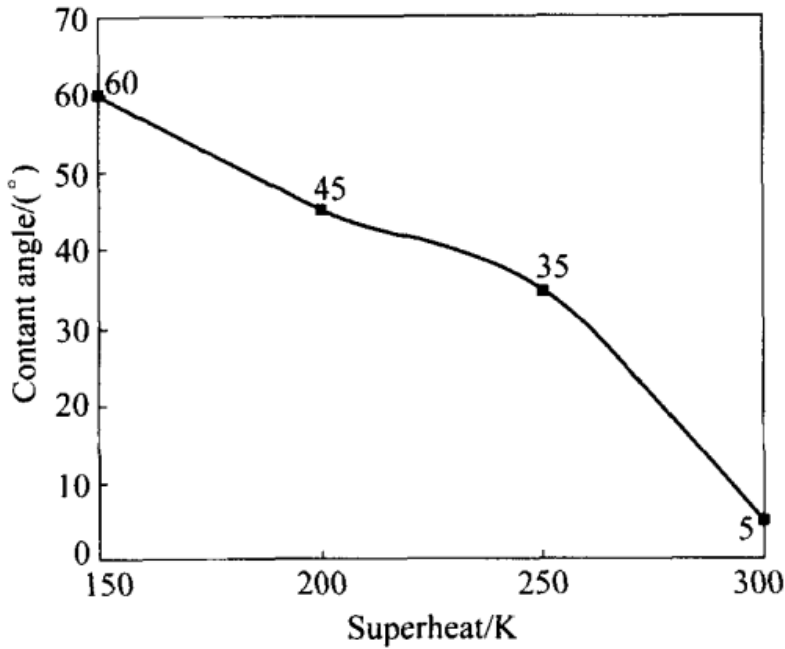


Şekil 2.39. Farklı gaz giriş basınçlarında gaz atomizasyonda partikül boyutu dağılımı a) Parçacık boyutunun kümülatif hacim oranı, b) Gaz-ergiyik metaline bağlı olarak D_{50} dağılımı [57]

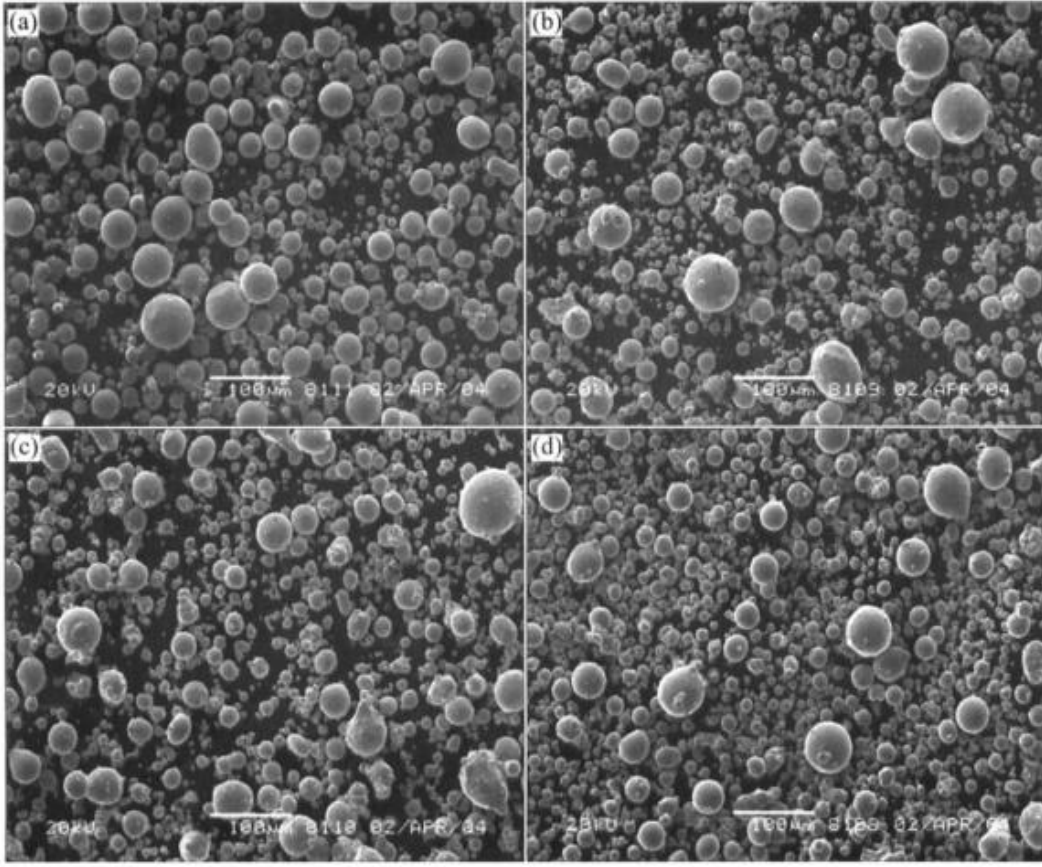
Singh ve Dangwal [58] serbest düşmeli gaz atomizasyonda, atomizerin tepe açısı, atomizasyon odak uzunluğu, nozul sayısı, nozulların çapı, ergiyik tüp besleme çapı, ergiyik metalin aşırı ısıtılması ve tipi gibi parametrelerin yüzey morfolojisi üzerine etkisini araştırmışlardır. Partiküllerin geometrik yapısının tepe açısı, ergiyik metalin aşırı ısıtılması, metal tipine ve partikül boyut dağılımına bağlı olduğu, atomizerin odak uzunluğu, nozul sayısı, nozul çapı ve

ergiyik metal φ apına bağlı olmadığı belirtilmiştir. 70, 110 ve 190 K'de 20° , 40° ve 60° tepe açıları için partiküllerin çoğunluğunun düzensiz olduğu, fakat 150 K'de 40° ve 60° tepe açılarında toz partiküllerinin büyük bir kısmı küresel olarak tespit edilmiştir.

Hong-wu vd. [59], bakırın atomizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada ergiyiğin aşırı ısıtılmasının parçalanma mekanizmasının olumlu yönde etkileyeceği belirtilmiştir. Bu sebeple yapılan çalışmada ergiyik 150, 200, 250 ve 300 K kadar aşırı ısıtılması sonucunda, ortalama partikül φ aplarını (D_{50}) sırasıyla 34,9; 32,3; 30,9 ve 19,7 μm olarak azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 2.40'ta görüldüğü gibi, gaz akış analizlerinde sıcaklık 250 K'den 300 K'e çıkartıldığında nozul ve ergiyik metal arasında oluşan kontak açışında lineer olmayan bir azalma oluşmuştur. Bu da birincil parçalanmada oluşan film kalınlığında belirgin bir düşüőe yol açmış bu da bakır tozlarının D_{50} 'sini keskin bir şekilde azaltmaktadır. Sonuç olarak ergiyiğin aşırı ısıtılması, daha küçük kontakt açısı ve daha ince bir film sağlayacak böylece artan birincil atomizasyon verimi sayesinde daha küçük boyutta partikül dağılımı elde edilebileceği belirtilmiştir. Şekil 2.41'de ise aşırı ısıtma miktarına bağlı olarak bakır tozlarının TEM morfolojileri gösterilmiştir.

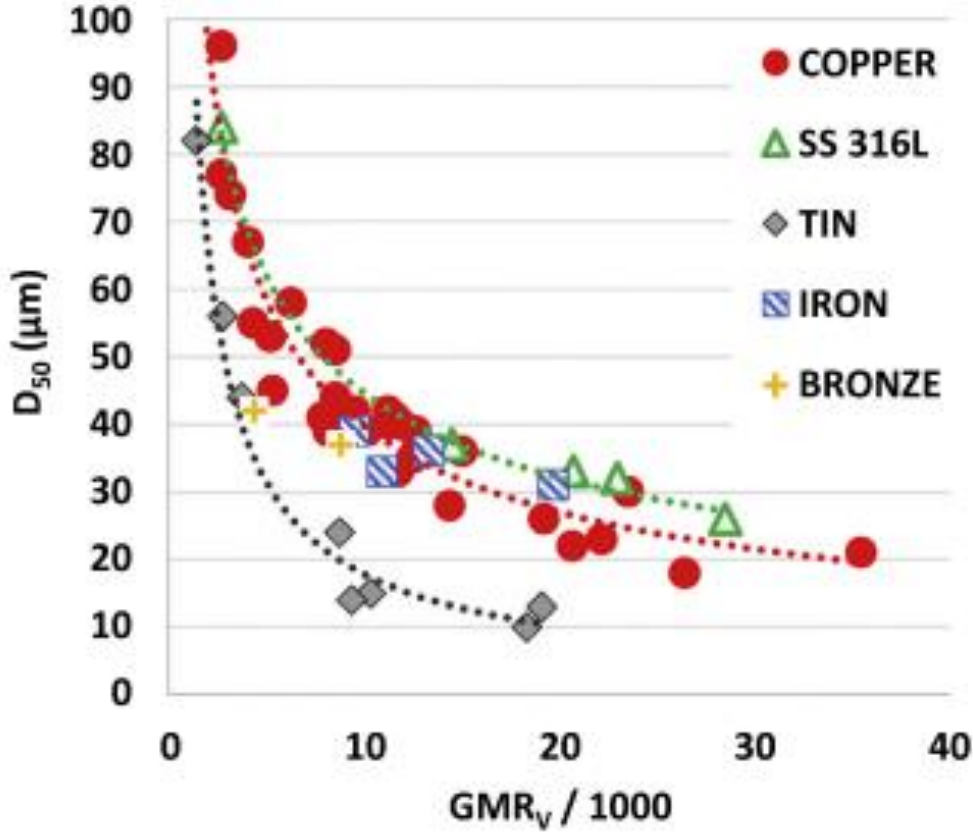


Şekil 2.40. Aşırı ısıtmaya bağlı olarak kontak açısı analizi [59]



Şekil 2.41. Bakır tozlarının farklı aşırı ısıtma miktarlarına bağlı olarak TEM morfolojileri a) 150K, b) 200 K, c) 250 K, d) 300 K [59]

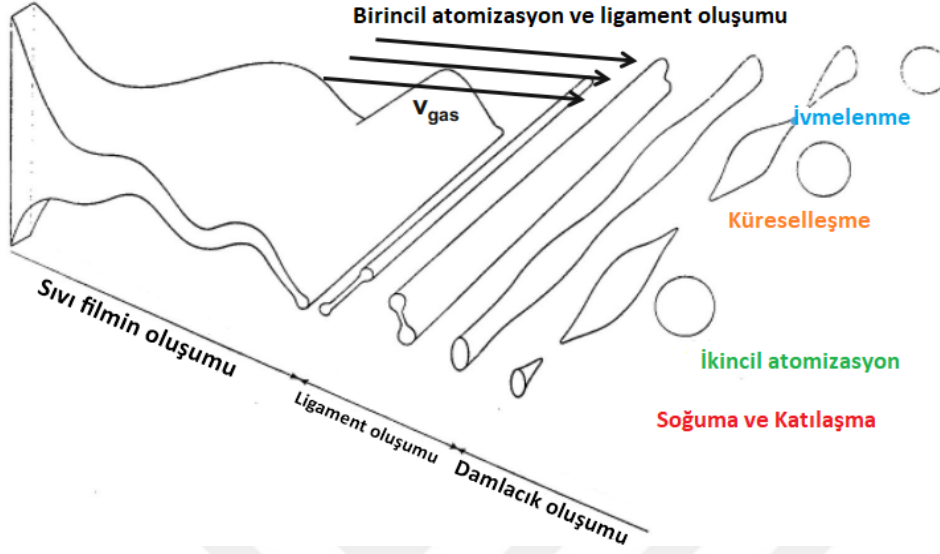
Urionabarrenetxea vd. [60], yakından eşlemeli gaz atomizasyon bakır, kalay, demir gibi saf metallerin ve Cu-15 wt% Sn ve SS 316L alaşımların nitrojen, argon ve helyum gazları kullanarak toplam 66 deneyle analizi yapılarak parametrelerin partikül dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 2.42’de GMR_v oranına bağlı olarak D_{50} değerleri gösterilmiştir. Hacimsel akış hızlarındaki GMR_v gaz-ergiyik metal oranının, kütle akış hızlarındaki gaz-ergiyik metal oranından partikül boyutuna çok daha fazla etkili olduğu gösterilmiştir. Kishidaka’nın su atomizasyonu için geliştirdiği parçacık boyutu tahmini denkleminde ampirik korelasyonlar değiştirilerek elde edilen yeni denklemle, Lubanska, Rao ve Mehrora’nın denklemleri karşılaştırıldığında, parçacık boyutu tahmini için en yakın sonuçların elde edildiği denklemin modifiye edilmiş Kishidaka denklemi olduğu belirtilmiştir. Üretilen tozların morfolojisi incelendiğinde ergiyik metalin ısıtılmasının 100 μm ’nin üzerindeki partiküllerin parçalanma miktarını artırdığı, böylece daha küçük çaplara sahip partiküller elde edildiğini gözlemişlerdir.



Şekil 2.42. GMR_v oranına bağlı olarak Cu, Sn, Fe, Cu-15 wt% Sn ve SS 316L alaşımlarının D₅₀ değerleri [60]

2.3.Parçalanma Mekanizması

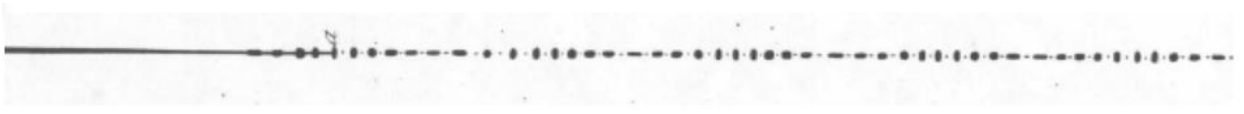
Gaz atomizasyon sırasında bir sıvı kolonu veya tabakası yüksek hızlı gaz akışı etkisiyle iki aşamalı olarak damlacıklara ayrılmaktadır. Birincil aşamada, ergiyiğin yüzeyi sinüsoidal bir salınım gerçekleşerek bozunur ve ardından büyük damlacıklara veya kararsız hacimli damlacıklara yani ligamentlere bölünmektedir. Bu işleme birincil atomizasyon işlemi denilmektedir [16, 61, 62]. İkincil atomizasyon sırasında ise damlacıklar düşük türbülanslı bir mekanizma ya da yüksek türbülanslı kaotik bir parçalanmaya uğramaktadır [63, 64]. Şekil 2.43'te parçalanma mekanizmasını şematik olarak görselleştirilmiştir [49].



Şekil 2.43. Gaz atomizasyon ergiyik atomizasyon süreci [49]

2.3.1. Birincil atomizasyon

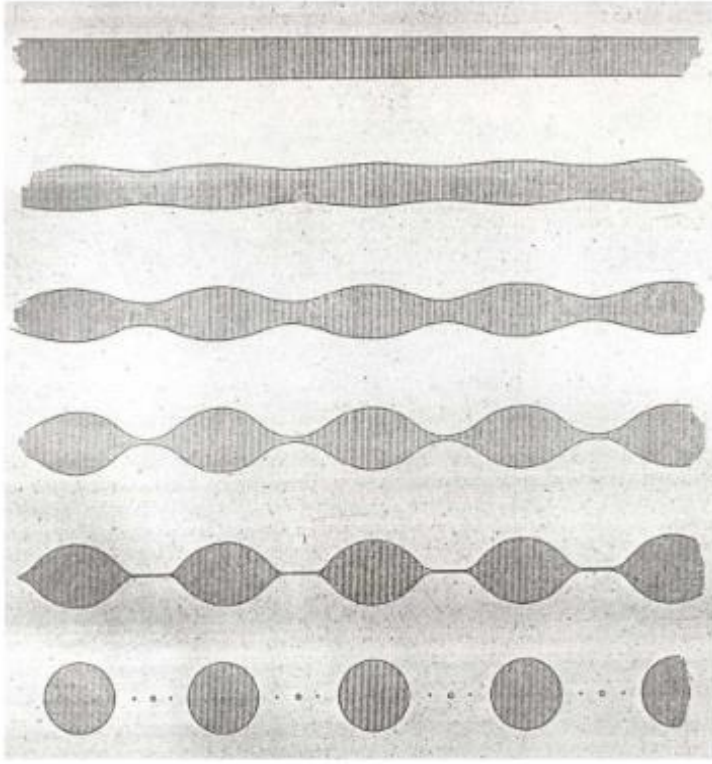
Damlacık oluşumu hakkında yapılan ilk araştırma 1833 yılında Savart [65] tarafından gerçekleştirilmiştir. Sıvı jetlerinin parçalanmasının jetin üretildiği koşullardan bağımsız olduğunu tespit eden Savart, analizlerini yalnızca gözünü kullanarak gerçek parçalanma sürecinin son derece doğru ve eksiksiz bir resmini çıkarabilmiştir. Şekil 2.44'te 6 mm sıvı çapına sahip jetin damlacık parçalanması gösterilmiştir.



Şekil 2.44. Savart'ın damlacık parçalanma modeli görseli [65]

Şekil 2.44'te görüldüğü gibi sıvı akışı nozul çıkışında belirlenen “a” noktasına kadar damlacık oluşumları göstermekte ve bu damlacıkların arasında uzun bir boyun oluşumu gerçekleştirmektedir. Parçalanma gerçekleştikten sonra ise damlacıkları takip eden daha küçük uydu damlacıklar görülmektedir. Daha sonra ise damlacıkların akış etkisi ile yaklaşık olarak küresel bir şekle dönüşümü devam etmektedir.

Teorik analizlerdeki temel problem damlacık parçalanmasını sağlayan temel etken yüzey geriliminin dikkate alınmıyor olmasıdır. Bu konu hakkında yapılan ilk çalışmalar Young [66] ve Laplace [67] tarafından gerçekleştirilmiştir. Savart'ın çalışmasında ise moleküller arasındaki karşılıklı çekime atıfta bulunulmuştur [65]. Geometrik şekillerin kararlılığını inceleyen Plateau [68] ise yüzey gerilimlerinin damlacık oluşumunda etkin bir rolü olduğunu tespit etmiştir. Bu çalışma sayesinde yüzeye uygulanacak herhangi bir kuvvetin yüzey alanının azalmasına neden olacağı ve böylece artan yüzey gerilimlerinin akışkanın genişlemesine sebep olacağı belirtilmiştir. Şekil 2.45'te damlacık oluşumu hakkındaki çalışmada ilk olarak küçük bozulmaların gerçekleştiği daha sonra artan yüzey gerilmeleri sonucunda oluşan her damlacığın, üç adet küçük uydurdu gözlenmiştir.



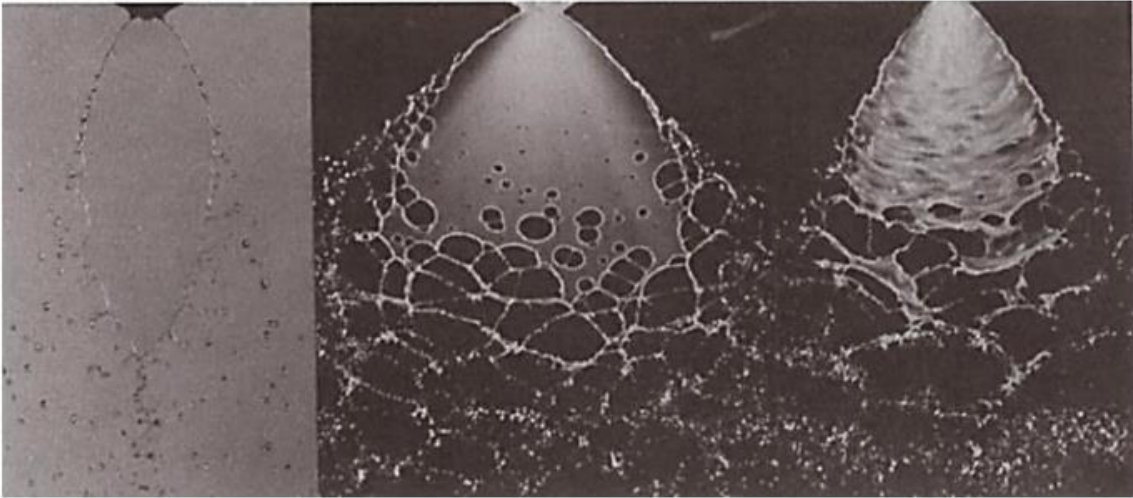
Şekil 2.45. Alkol ve su karışımı içinde süspanse edilmiş sıvı bir yağ sütununun parçalanması [68]

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde ise sıvı akışın parçalanması damlama, sütunların parçalanması, filmlerin parçalanması ve ligamentlerin parçalanması olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır [69, 70]. Sıvı damlama prosesi yer çekimi ile gerçekleştiği için ve gaz atomizasyon

işleminde etkisi çok fazla olmadığından üç aşamanın birleşimi birincil atomizasyon olarak adlandırılmaktadır [71].

Bu aşamalardan sıvı kolon parçalanması düşük gaz basıncı altında serbest düşmeli ve yakından eşlemeli neredeyse her atomizasyon prosesinde görülmektedir. Sıvı kolon parçalanması hakkında gerçekleştirilen ilk çalışma Rayleigh'e aittir ve daha sonra literatürde yer alan çalışmalar ile geliştirilmiştir [72-76].

Sıvı film parçalanması ise yakından eşlemeli gaz atomizasyon proseslerinin neredeyse hepsinde meydana gelirken parçalanma işleminde ergiyik metal, yüksek hızlı gaz akışı etkisi ile ergiyik nozul ucu boyunca sıvı ince bir film şeklinde yayılmaktadır. Aerodinamik kuvvetler yüzey geriliminden daha fazla olduğu zaman ise sıvı film parçalanmaya başlamaktadır [77]. Atomizasyon işlemlerinde film parçalanması esnasında oluşan kenar, delikli ve dalgalı parçalanma aşamaları Şekil 2.46'da görülmektedir [78].



Şekil 2.46. Film parçalanması kenar (solda), delikli (orta) ve dalgalı film parçalanması (sağda) [78]

Parçalanma tipinin, sıvının çevresinde oluşan hava akış hızına bağlı olduğu belirtilmiştir. Yüksek bağıl hızların, ya düşük hızda hareket eden yüksek hızlı damlacıklara ya da yüksek hızlı hava akışında hareket eden düşük hızlı damlacıklar ile oluştuğu gözlemlenmiştir [77]. Düşük hızlı sıvı akışında, sıvı tabaka delikli film parçalanma modelindeki gibi ayrılmakta ve daha

sonra damlacıklar oluşmaktadır [79]. Daha yüksek hızlarda ise dalgalı film parçalanması meydana gelmekte ve ardından damlacıklar halinde parçalanmaktadır [80]. Film kırılmasının son türü ise hem yüzey gerilimi hem de viskozite yüksek olduğunda meydana gelen kenar parçalanmasıdır [77].

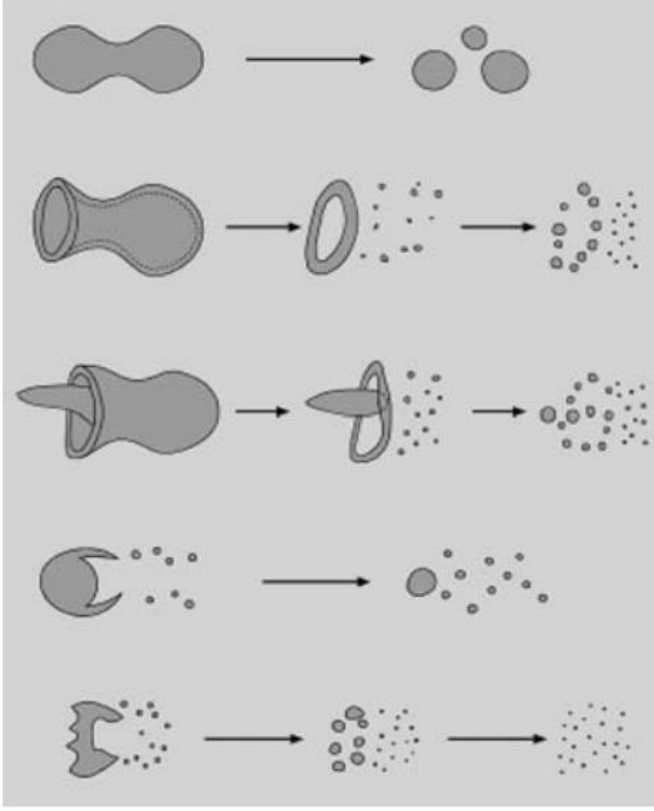
Film parçalanma aşamasında oluşabilecek farklı parçalanma modelleri nihai toz boyutunu belirlemede önemli bir etkiye sahiptir. Parçalanma aşamasında oluşan erken film oluşumu nozula yakın bölgede gerçekleşirse tabaka kalın olur ve daha büyük damlacıklar meydana gelmektedir. Eğer nozuldan uzak mesafede parçalanma meydana gelirse sıvı film daha ince olur bu sayede daha küçük damlacıklar oluşmaktadır [79].

Sıvı bağ parçalanma modeli ise Fraser [81], tarafından önerilen Rayleigh parçalanma modeli olduğu belirtilmiştir. Sıvı film parçalanmasını takip eden sıvı bağ parçalanma mekanizmasında bu bağların kalınlığı son damlacık boyutunu belirlemede önemli bir faktördür.

2.3.2. İkincil atomizasyon

Sprey oluşumu veya damla üretimi, çeşitli bilimsel ve mühendislik uygulamalarında yaygın bir uygulama olmakla beraber başlangıçta küresel bir damlanın bir akış ortamında aerodinamik kuvvetlerin etkisiyle parçalanmasına ikincil atomizasyon denmektedir. İkincil atomizasyon prosesi ise birincil atomizasyonda ergiyik metalin ilk kez parçalanması ile oluşan ligament, film veya kolon sıvıların ergiyik nozuldan daha aşağı bölgede ikinci defa parçalanma işlemidir. Birçok atomizasyon işleminin amacı, son damlacık boyutlarını kontrol etmek olduğundan, ikincil atomizasyonu incelemenin en önemli nedenlerinden biri, uygun partikül boyutunu sağlayan koşulları belirlemektir [64].

Parçalanma işlemi damla etkileşimlerinden kaynaklandığından, akış koşullarının bir fonksiyonu olarak belirtilmiştir. Farklı akış koşulları, Şekil 2.47'de şok tüpü deneylerinde ölçüldüğü üzere Newton damlacıklar için farklı parçalanma modlarına yol açmaktadır. Yukarıdan aşağıya doğru modlar, titreşimli, torbalı, çok modlu (genellikle torba ve ercik olarak adlandırılır), tabaka inceltme ve felaket olarak adlandırılmaktadır [64].



Şekil 2.47. Newton damlacıklarının parçalanma morfolojisi [64]

Titreşimli parçalanma her zaman görülmemekle beraber, damlacığın doğal frekansı sebebiyle parçalanmaktadır. Parçalanmış damlacık kendi boyutundan çokta küçük olmayan damlacıklara ayrışmaktadır [64].

Torba parçalanma mekanizması ise daha kalın halka kenara tutturulmuş ince içi boş bir torbadan oluşmaktadır. İlk önce torba kısım, daha sonra da halka kenar parçalanmaktadır. Ardından halka kenar ve torba kısımda parçalanmış partiküller, daha küçük partiküllere ayrışmaktadır [64].

Çok modlu (torba-ercik) parçalanma, torba parçalanma modeline benzer olmakla beraber parçalanma sırasındaki oluşan tek fark ercik mekanizmasının akış yönünün tam tersi yönünde gerçekleşmesidir. Bunun dışında parçalanma işlemi torba parçalanma ile benzerlik göstermektedir [64].

Tabaka inceltme veya diğerk bir adıyla levha sıyırma işleminde, damlacık yüzeyinin sürekli olarak erozyona uğraması sonucunda daha küçük damlacıklara ayrılma işlemidir [64].

Katastrofik parçalanmada ise Şekil 2.47'deki son aşamada görüldüğü üzere damlacık uzun ve büyük genlikli dalgalanma gösterdikten sonra partiküllere ayrılmaktadır. Bu partiküllerin devamında ise daha küçük damlacıklar görülmektedir [64].



3.MATERYAL VE YÖNTEM

ANSYS Fluent yazılımı çok çeşitli sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz problemleri, laminar ve türbülans akışların modellenmesini sağlayan gelişmiş bir yazılımdır. Zamana bağlı veya kararlı halde gerçekleştirilebilen analizlerde, ısı transferi, kimyasal reaksiyonlar gibi çok çeşitli matematiksel denklemleri modelleme yeteneğine sahiptir. ANSYS Fluent Newtonian olmayan akışlar, turbo makineler ve otomotiv motor bileşenlerinde ısı transferi, toz haline getirilmiş kömürün yanması, dış aerodinamik kompresörler, pompa ve fan akışları, akışkan yataklar vb. birçok uygulamanın modellenmesinde kullanılmaktadır [82].

ANSYS Fluent'in diğer bir avantajı serbest yüzey ve çok fazlı gaz-sıvı, gaz-katı, sıvı-katı ve gaz-sıvı-katı akışların analizi için kullanılabilmektedir. Bu tür problemler için ANSYS Fluent, sıvıların hacmi (VOF), Mix ve Eulerian modellerinin yanısıra, ayrık fazlar için partikül, damlacık ve kabarcık takibi yapılabilen ayrık faz modelini (DPM) geliştirmiştir. Çok-fazlı akış uygulamaları ise genel olarak kanal akışları, sprey, çökeltme, ayırma ve kavitasyon işlemleri yer almaktadır [82].

3.1. Süreklilik, Momentum ve Enerjinin Korunumu Denklemleri

ANSYS Fluent tüm akışlar için kütle ve momentum korunum denklemlerini çözümlenmektedir. Isı transferi veya sıkıştırılabilirlik dahil edildiği zaman ise enerjinin korunumu denklemi, akış türbülanslı olduğu durumda ise taşınma denklemlerini analiz etmektedir [82].

Kütlenin korunumu denklemi veya diğer bir adıyla süreklilik denkleminin sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamayan akışlar için en genel hali Denklem 1'de verilmiştir. S_m değeri ikinci fazdan, sürekli faza eklenen kütle miktarıdır [82].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

2 boyutlu eksenel simetrik geometriler için ise süreklilik denklemi Denklem 2’de verildiği gibidir. Burada x eksenel koordinatlar, r radyal koordinatlar, v_x eksenel hızı ve v_r radyal hızı tanımlamaktadır [82].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (2)$$

2 boyutlu eksenel simetrik geometriler için Denklem 3’te eksenel momentum korunumu denklemi ve Denklem 4’te radyal momentum korunumu denklemi korunumu verilmiştir. Enerjinin korunumu denklemi ise Denklem 5’te belirtildiği gibidir. Taşınım formülasyonları ise seçilen türbülans çözüm modeline bağlı olarak değiştiğinden, taşınım konusunu Bölüm 3.2 içerisinde inceleyeceğiz [82].

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) \\ = -\frac{\partial p}{\partial r} - 2\mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot (\vec{v})) + \rho \frac{v_z^2}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot (\vec{v})) \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + F_r \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left(\sum_j h_j J_j \right) + S_h \quad (5)$$

3.2. Türbülans Modelleri

Ansys Fluent yazılımında türbülans akışları analiz etmek için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Bu bölümde türbülans modellerinin çözüm yaklaşımları incelenecektir. Çözüm yönteminden bağımsızlık elde edebilmek için Standart k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε, Standart k-ω ve k-ω-SST türbülans modelleri karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Çözüm yöntemlerinden

en verimli ve doğru olanını seçebilmek için ilgili yöntemler alt başlıklar halinde incelenecektir [82].

3.2.1. Standart k-ε, RNG k-ε ve Realizable k-ε modelleri

Bu bölümde standart, RNG ve Realizable k-ε modelleri incelenecektir. Üç model k ve ε değerleri için benzer taşınma denklemlerine sahiptir. Çözüm modellerindeki temel farklılıklar türbülans viskoziteyi hesaplarken kullanılan metot, k ve ε 'un türbülanslı difüzyonunu yöneten türbülanslı Prandtl sayıları ve ε denklemindeki üretim ve yok etme terimleri bu yöntemlerde birbirinden ayrı yaklaşımlar kullanılmaktadır. İlgili farklılıklar her modele ait başlıkta ayrı ayrı sunulmuş ve her bir model detaylı olarak incelenmiştir [82].

Standart k-ε modeli

Standart k-ε modeli, iki ayrı taşınma denklemini çözerek hem türbülans uzunluğunun hem de zaman ölçeğinin belirlenmesini sağlayan ve Launder&Spalding tarafından önerildiğinden bu yana ise mühendislik hesaplamaları için yaygın bir şekilde kullanılan bir modelleme yöntemidir. Standart k-ε modeli, türbülans kinetik enerjisi (k) ve yayılma hızı (ε) için taşınma denklemlerine dayalı bir modeldir. Türbülans kinetik enerjisi “k” için taşınma denklemlerinden elde edilirken, yayılma hızı (ε) için ise matematiksel olarak karşılığına çok az benzerlik gösteren taşınma denklemlerinden akıl yürütme ile elde edilmekte ve sırasıyla Denklem 6 ve Denklem 7’de gösterilmektedir [82, 83].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (7)$$

Standart k-ε modelinde moleküler viskozite ihmal edildiğinden, bu model akışın tamamen türbülanslı olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Standart k-ε modelinin güçlü ve zayıf yönleri anlaşıldıkça RNG k-ε modeli ve Realizable k-ε modeli geliştirilmiştir [84, 85].

RNG k-ε modeli

RNG k-ε modeli re-normalizasyon grubu teorisi olarak bilinen istatistik hesaplama yöntemlerini kullanmaktadır. Standart k-ε modeli ile benzer formda olmasına rağmen bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bunlardan ilki yayılma hızı (ε) için yüksek hızlarda doğruluğu arttıran ek bir tanımlamanın yer almasıdır. Ayrıca girdabın türbülans üzerindeki etkisi, dönen akışlar için doğruluğu artıran RNG modeline dahil edilmiştir. Bir başka farklılıkta Prandtl türbülans değerleri için standart k-ε modelinde kullanıcı tarafından belirlenen sabit katsayılar tercih edilirken, RNG k-ε modelinde bu değerleri hesaplayan analitik bir formülasyon bulunmaktadır. Son olarak Standart k-ε modeli yüksek Reynolds sayılarında sadece tam türbülans akışı çözümleyebilirken, RNG k-ε modeli düşük Reynolds sayılarında viskozite etkisini de hesaba katan analitik bir diferansiyel formül kullanmaktadır. Denklem 8 ve Denklem 9’da RNG k-ε modeli formülasyonları yer almaktadır [82].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_{eff} \alpha_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_{eff} \alpha_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (9)$$

Realizable k-ε modeli

Realizable k-ε Modeli, standart k-ε modelinden farklı olduğu iki durum bulunmaktadır. Bunlardan ilki türbülans viskozite hesaplamaları için alternatif bir formülasyon içermektedir. İkincisi ise yayılma hızı (ε) için modifiye edilen taşıma denklemi, ortalama-kare girdap dalgalanmasının taşınması denkleminde türetilmiştir [82].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1e} \frac{\epsilon}{k} C_{3e} G_b + S_\epsilon \quad (11)$$

Denklem 10 ve Denklem 11’de gösterilen Realizable k-ε model formülasyonları jetler ve karışım katmanları dahil serbest akışlar, kanal ve sınır tabaka akışları, homojen kayma akışlar ve ayrık akışlar gibi birçok problemin modellenmesine başarılı olduğu belirtilmiştir. Tüm bu problemler için realizable modelinin, standart k-ε modelinden daha başarılı olduğu özellikle döner-jet anomalisini çözmede ve düzlemsel jetler için olduğu kadar eksenel jetlerin yayılma hızı tahmininde de oldukça başarılı olduğunu gözlemlemişlerdir [82, 85, 86].

Genel olarak k-ε modellerini incelediğimizde hem realizable hem de RNG k-ε modeli, standart k-ε modeline göre girdap gibi karmaşık akışlarda daha başarılı olduğu belirtilmiştir. Realizable modeli ve RNG k-ε modeli karşılaştırıldığında ise realizable modeli henüz yeni bir model olduğu için hangi durumlarda daha iyi performans gösterdiği henüz tespit edilememiştir. Ancak yapılan ilk araştırmalarda k-ε modelleri arasında Realizable modelinin, karmaşık akışları modellemede en iyi performansı gösterdiği belirtilmiştir. Genel olarak k-ε modellerinin en zayıf yönü ise, yayılma hızı (ε) için kullanılan denklemin yeterince verimli olmamasıdır [82].

3.2.2. Standart k-w, BSL ve SST k-w modeli

Standart k-w modeli

Denklem 12 ve Denklem 13’te gösterilen Standart k-w modeli, düşük Reynolds sayıları, sıkıştırılabilirlik ve kayma akış yayılımı için modifikasyonları içeren Wilcox k-w modeline dayanmaktadır [87]. Wilcox modelinin zayıf noktalarından biri, çözümlerin kesme tabakası dışındaki k ve w değerlerine duyarlılığıdır. Ansys Fluent’teki yeni formülasyon bu bağımlılığı azaltsa da, özellikle serbest kayma akışları çözüm üzerinde hala önemli bir etkiye sahiptir [88].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + G_k - Y_k + S_k + G_b \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho w u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\Gamma_k \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) \right] + G_w - Y_w + S_w + G_{wb} \quad (13)$$

BSL k-w modeli

Wilcox tarafından geliştirilen, Standart k-w modelinin en zayıf yönü serbest akışa karşı aşırı duyarlılığı olduğu belirtilmiştir [87]. Menter tarafından geliştirilen BSL k-w modeli ise k-w modelinin duvar yakınındaki kuvvetli analizini ve serbest akış bölgesindeki akışı hesaplamak için k-ε modelini yüksek doğrulukta analizini kombine ederek hesaplamaktadır [89]. Bunu sağlamak için k-ε modeli, k-w modelinin formülasyonuna dönüştürülmüştür. İki modelin kombinasyon işleminde duvar yakınındaki bölgelerde k-w modeli hala aktif olurken, yüzeyden sıfır birim uzaklıkta ise k-ε modelini aktif edecek şekilde tasarlanmıştır. Denklem 14 ve Denklem 15'te BSL k-w modelinin formülasyonu gösterilmiştir [82].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + G_k - Y_k + S_k + G_b \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho w u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\Gamma_k \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) \right] + G_w - Y_w + D_w + S_w + G_{wb} \quad (15)$$

SST k-w modeli

SST k-w modeli, BSL k-w modeli ile aynı çözüm yaklaşımına sahiptir ve ek olarak SST k-w modeli türbülans viskozitesinin hesaplanmasında türbülans kesme geriliminin taşınmasını da çözümlenmektedir. Bu iyileştirme sayesinde SST k-w modeli ters basınç gradyan akışları, kanat profilleri, transonik şok dalgaları gibi birçok akış analizinde Standart ve BSL k-w modelinden daha doğru ve güvenilir analizler yapabildiği belirtilmiştir [82, 89].

Bölüm 3.2.1.'de incelenen BSL modeli, Wilcox ve k-ε modelinin avantajlarını birleştirmesine rağmen pürüzsüz yüzeylerden akış ayrılmasının başlangıcını ve miktarını tahmin etmede başarısız olduğu görülmüştür. Bunun ana nedeni, her iki modelin de türbülanslı kayma gerilmesinin taşınmasını hesaba katmaması olduğu belirtilmiştir. Bunun sonucunda, vortex viskozitesinin aşırı tahmin edilmesiyle sonuçlanmaktadır [82].

Bu çalışmada Standart k- ϵ , RNG k- ϵ , Realizable k- ϵ , Standart k-w, BSL k-w ve SST k-w modellerinin her biri analiz edilip çözüm yönteminden bağımsızlık testi yapılmıştır. RNG k- ϵ ve SST k-w modelleri karşılaştırıldığında sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Çözme süresi ve hesaplama yükü açısından daha avantajlı olduğu için RNG k- ϵ modeli analizlerde kullanılmıştır.

3.3. Multi-Faz Modelleri

Doğada ve teknolojiye karşılaşılan çok sayıda akış fazların bir karışımı sonucu ortaya çıkmıştır. Maddenin fiziksel fazları gaz, sıvı ve katı iken, çok fazlı akış sisteminde faz kavramı farklı bir anlam ifade etmektedir. Çok-fazlı akışta faz kavramı akışa ve daldırıldığı potansiyel alana belirli bir atalet ve etkileşimde olan bir malzeme sınıfı olarak tanımlanmaktadır. Örnek olarak aynı malzemenin farklı büyüklükteki katı parçacıkları farklı fazlar olarak tanımlanabilmektedir. HAD analizlerinde çok fazlı akışların hesaplanmasında Euler-Lagrange ve Euler-Euler yaklaşımları mevcuttur [82].

3.3.1. Euler-Lagrange yaklaşımı

Ansys Fluent'te yer alan ayrık faz modeli Euler-Lagrange yaklaşımını incelemekte olup; akışkan faz Navier-Stokes denklemleri çözülerek ele alınırken, ayrık faz hesaplanan akış alanı boyunca çok sayıda partikül, kabarcık veya damlacık takibi yapılarak çözülür. Ayrıca ayrık faz, sıvı faz ile momentum, kütle ve enerji transferi yapmaktadır [82].

Euler-Lagrange yaklaşımı ile parçacık veya damlacık yörüngeleri, akışkan fazın hesaplaması sırasında belirli aralıklarla ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bu durum ikinci fazın hacimsel oranının ihmal edilemediği durumlarda örnek olarak püskürtmeli kurutucular, kömür veya sıvı yakıt yanması ve bazı parçacık yüklü akışkanların modellenmesi gibi uygulamaların modellenmesinde kullanılmaktadır. Kısacası partiküller arası etkileşimin olduğu uygulamalarda Ayrık Eleman Modeli kullanılabilmektedir [82].

3.3.2. Euler-Euler yaklaşımı

Euler-Euler yaklaşımında, iç içe geçen süreklilik kavramı ele alındığından aynı hücrede bulunan fazlar arasında hacim kesri kavramı bulunmaktadır. Bu hacim kesirlerinin uzay ve zamanın sürekli fonksiyonları olduğu varsayılır ve bunların toplamı bire eşittir. Her faz için korunum denklemleri benzer yapıya sahip bir dizi denklemden türetilmektedir. Ansys Fluent'te sıvıların hacmi (VOF), Mixture model ve Eulerian Model olmak üzere üç farklı Euler-Euler çok-fazlı model bulunmaktadır [82].

Mixture model

İki veya daha fazla fazın analizini gerçekleştirebilen modelde, Euler modelinde olduğu gibi fazlar iç içe geçen süreklilik olarak ele alınır. Karışım modeli, karışım momentum denklemini çözmekte ve ayrık fazları tanımlamak için bağıl hızları analiz etmektedir. Karışım modelinin uygulamaları, düşük yüklemeli parçacık yüklü akışları, kabarcıklı akışları, çökelmeyi ve siklon ayırıcıları içermektedir. Ayrıca karışım modeli, dağılmış fazlarda homojen çok-fazlı akışı modellemek için bağıl hızlar olmadan da simüle edilebilmektedir [82].

Eulerian modeli

Eulerian modeli çok fazlı modeller arasında en karmaşık yapıya sahiptir ve her bir faz için bir dizi momentum ve süreklilik denklemlerini çözmektedir. Eşleşme, basınç ve fazlar arası değişim katsayılarıyla sağlanırken, fazların granül (akışkan-katı) veya granül olmaması (akışkan-akışkan) durumuna göre farklı şekilde ele alınmaktadır. Eulerian çok fazlı modelinin uygulamaları arasında kabarcık kolonları, yükselticiler, parçacık süspansiyonu ve akışkan yataklar bulunmaktadır [82].

VOF modeli

VOF modeli ile tek bir momentum denklemi çözümlenerek ve etki alanı boyunca her bir akışkanın hacimsel değişimini takip ederek iki ya da daha fazla birbirine karışmayan akışkan

modellenebilmektedir. VOF modeli ile jet kırılması tahmini, bir sıvıdaki büyük gaz baloncuklarının takibi, bir barajın yıkılmasından sonra gerçekleşen sıvı hareketini ve herhangi bir sıvı-gaz arayüzeyinin modellenmesini zamana bağlı ya da bağımsız olarak gerçekleştirilebilmektedir [82].

ANSYS Fluent VOF modelinde bazı sınırlandırmalar bulunmaktadır. Bunlardan ilki VOF modelini kullanırken dikkat edilmesi gereken kesinlikle basınç-tabanlı çözücü kullanmaktır. VOF modelinde akışkanın bulunmadığı bölgede yani boş bölgelerde analiz gerçekleştirmedeğinden, kontrol hacmi kesinlikle tek bir sıvı faz veya fazların kombinasyonu şeklinde doldurulmalıdır. Analiz sırasında fazlardan sadece bir tanesi ideal gaz olarak tanımlanabilirken, ekstra durumlarda kullanıcı tanımlı olarak da sıkıştırılabilir fazlar eklenebilmektedir. VOF yöntemi ile akış yönündeki periyodik akış modellenememekte ve ikinci dereceden dahili zaman analizleri kullanılamamaktadır. VOF modeli ile Discrete Phase Method modeli kombine edildiğinde paylaşılmış hafıza kullanılamamaktadır. Polihedral ağ yapıları ile VOF modeli analizi gerçekleştirilememektedir. VOF modeli önceden karıştırılmamış, kısmen önceden karıştırılmış ve önceden karıştırılmış yanma modelleriyle uyumlu olmadığı belirtilmiştir [82].

Zamana bağlı ya da bağımsız hesaplamalar

VOF formülasyonunda genelde zamana bağlı analizler gerçekleştirilmekte olup, zamandan bağımsız kararlı durumlar için ise yalnızca çözüm başlangıç koşullarından bağımsız olduğu durumlarda kullanılmasının mantıklı olduğu belirtilmiştir. VOF formülasyonunda, iki ya da daha fazla akışkan fazın iç içe geçmediği durumlarda analiz işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Modele eklenen her bir faz için ise hesaplama hücrelerinde yeni bir faz hacmi tanımlanmaktadır. Her kontrol hacminde, tüm fazların hacimsel kesir toplamalarının 1'e eşit olduğu belirtilmiştir. Tüm fazlar için hesaplama alanı paylaşılr ve her bir fazın hacim oranı her bir konumda bilindiği sürece hacim ortalamalı değerleri temsil etmektedir. Bu nedenle, herhangi bir hesaplama alanındaki değişkenler ya hacim oranı değerlerine bağlı olarak fazların ya da fazlardan sadece birini belirtmektedir [82].

Hacimsel oran denklemi

Fazlar arasındaki arayüz takibi, fazların hacimsel oranı için bir süreklilik denkleminin çözümü ile gerçekleştirilir. Faz q_{th} için süreklilik denklemi Denklem 16'da gösterilmiştir. $\dot{m}_{pq}$ q fazının p fazına kütle transferini, $\dot{m}_{qp}$ p fazının q fazına göre kütle transferini temsil etmektedir [82].

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q p_q) + \nabla \cdot (\alpha_q p_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (16)$$

Hacim oranı denklemi, implicit veya explicit zaman formülasyonları ile çözülebilmektedir. Sıradaki bölümde Implicit ve Explicit denklemleri incelenmiştir [82].

Implicit denklemi

Mevcut zaman adımındaki hacim oranı, mevcut zaman adımındaki diğer niceliklerin bir fonksiyonu olduğundan, her zaman adımımda ikincil faz hacim fraksiyonlarının her biri için skaler taşıma denklemleri çözümlenmektedir. Implicit formülasyon zamana bağlı veya bağımsız kararlı durumlar için kullanılabilmekte ve Denklem 17'de belirtilmiştir [82].

$$\frac{\alpha_q^{n+1} p_q^{n+1} - \alpha_q^n p_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (p_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = [S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})] V \quad (17)$$

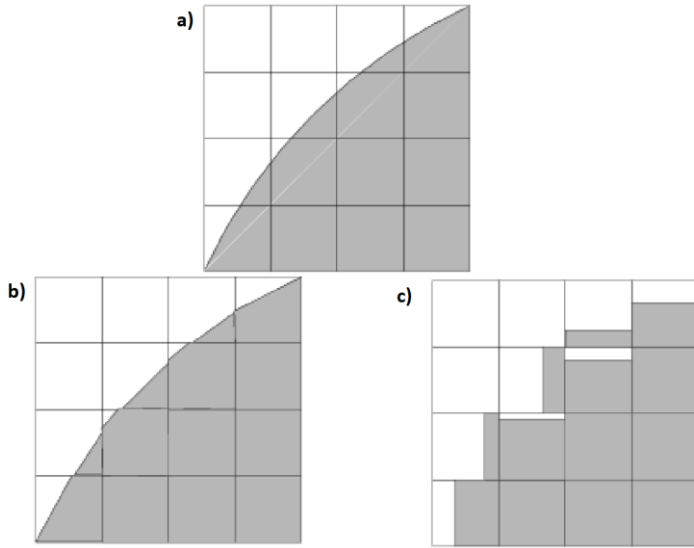
Explicit denklemi

Explicit denklemi zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hacimsel fraksiyonu Denklem 18'de gösterilmiştir. Mevcut zaman adımındaki hacim oranı, önceki zaman adımındaki bilinen miktarlara dayalı olarak doğrudan hesaplandığından, formülasyon her adım sırasında taşıma denkleminin yinelemeli çözümünü gerektirmemektedir [82].

$$\frac{\alpha_q^{n+1} p_q^{n+1} - \alpha_q^n p_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (p_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = [S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})] V \quad (18)$$

Arayüzey yakınında interpolasyon

ANSYS Fluent'in kontrol hacim formülasyonu, kontrol hacmi yüzeylerinden geçen konveksiyon ve difüzyon akışlarının hesaplanmasını ve kontrol hacminin kendi içindeki terimlerle dengelenmesini gerektirir. ANSYS Fluent'te geometrik yeniden yapılandırma ve donör-alıcı şemaları iki faz arasındaki arayüze yakın bulunan hücrelerde özel bir interpolasyon işlemi uygulamaktadır. Şekil 3.1'de ise bu iki yöntemle hesaplama sırasında arayüzlerin gerçek arayüz ile karşılaştırmasını içermektedir. Şekil 3.1.(a)'da gerçek arayüz geometrisi, Şekil 3.2.(b)'de geometrik yeniden yapılandırma (parçalı-doğrusal) şeması ile temsil edilen arayüz şekli ve Şekil 3.1.(c)'de donör-alıcı şemalarını temsil eden arayüz şeması gösterilmiştir [82].



Şekil 3.1. Arayüz hesaplamaları a) Gerçek arayüz, b) Geometrik yapılandırma ve c) Donör-Alıcı şematik görüntüleri [82]

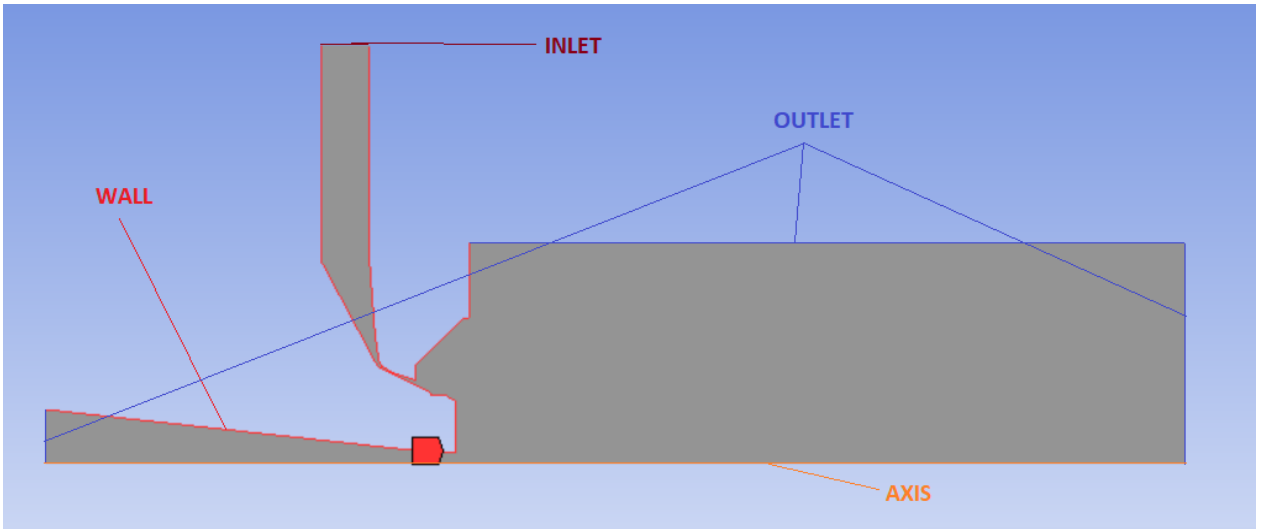
Explicit ve Implicit çözücüler ise bu hücrelerde bir faz veya diğer bir First-Order Upwind Scheme, Second-Order Upwind Scheme, Quick Scheme, Modified HRIC, The Compressive Scheme and Interface-Model-based Variants veya CICSAM şeması ile doldurulmuş fazlar arasında interpolasyon ile gerçekleştirmektedir [82].

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yakından eşlemeli gaz atomizasyon işleminde nihai toz partikül boyutunun birçok parametreye bağlı olduğu Bölüm 2’de detaylı olarak anlatılmıştır. Bu sebeple gaz atomizasyon işleminde ergiyik ve gaz arasındaki etkileşimi detaylı olarak anlayabilmek için üç farklı aşamada analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.2’de ilk adım olarak sadece gaz akışı HAD yardımı ile modellenmiş ardından Bölüm 4.3 ve 4.4’te birincil atomizasyon ve ikincil atomizasyon prosesleri HAD yardımı ile modellenmiş ve atomizasyon prosesi detaylı olarak incelenmiştir.

4.1. Modelin ve Ağ Yapısının Oluşturulması

Analiz edilen geometrinin nozulu dairesel yarık yapıya sahip olduğu için analiz işlemi eksenel simetrik olarak gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bilgisayar hesaplama yükünü ve analizi hesaplama süresini azaltmak için iki boyutta modellenmiştir. Model ve sınır koşulları Şekil 4.1’de gösterilmiştir. “Inlet” gaz girişini, “Outlet” gaz çıkışını, “Wall” duvarları ve son olarak “Axis” eksenini tanımlamaktadır.

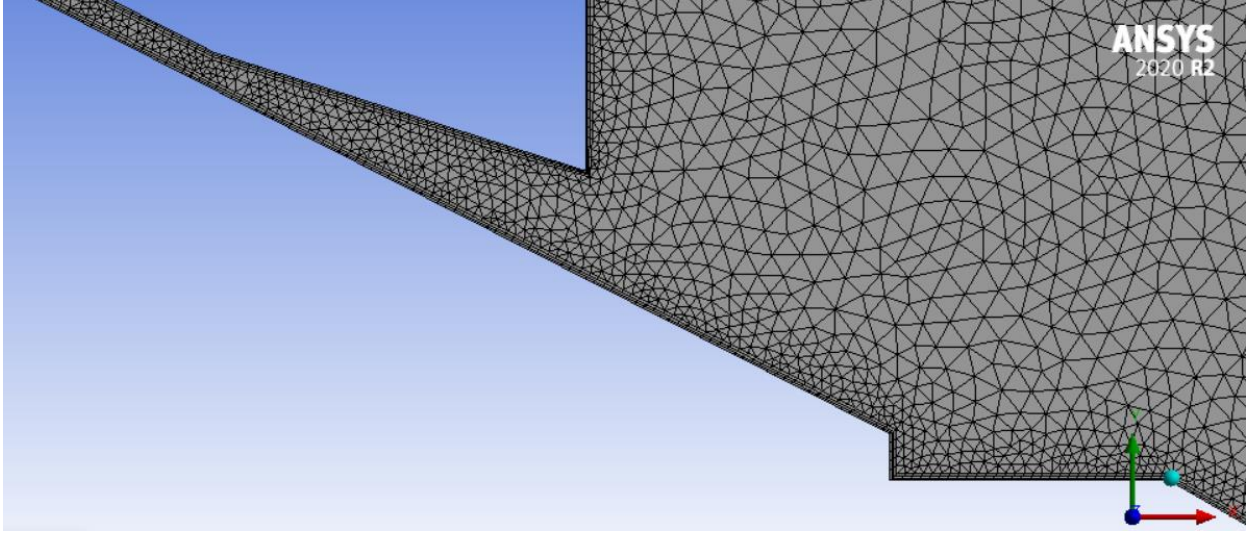


Şekil 4.1. Sınır Koşulları ve Geometrinin Modeldenmesi

HAD yardımıyla geliştirilen simülasyon modelinde doğru sonuçları elde edebilmek için ağ yapısından bağımsızlık çalışmasının yapılması gerekmektedir. Bu amaçla yapılan analizde

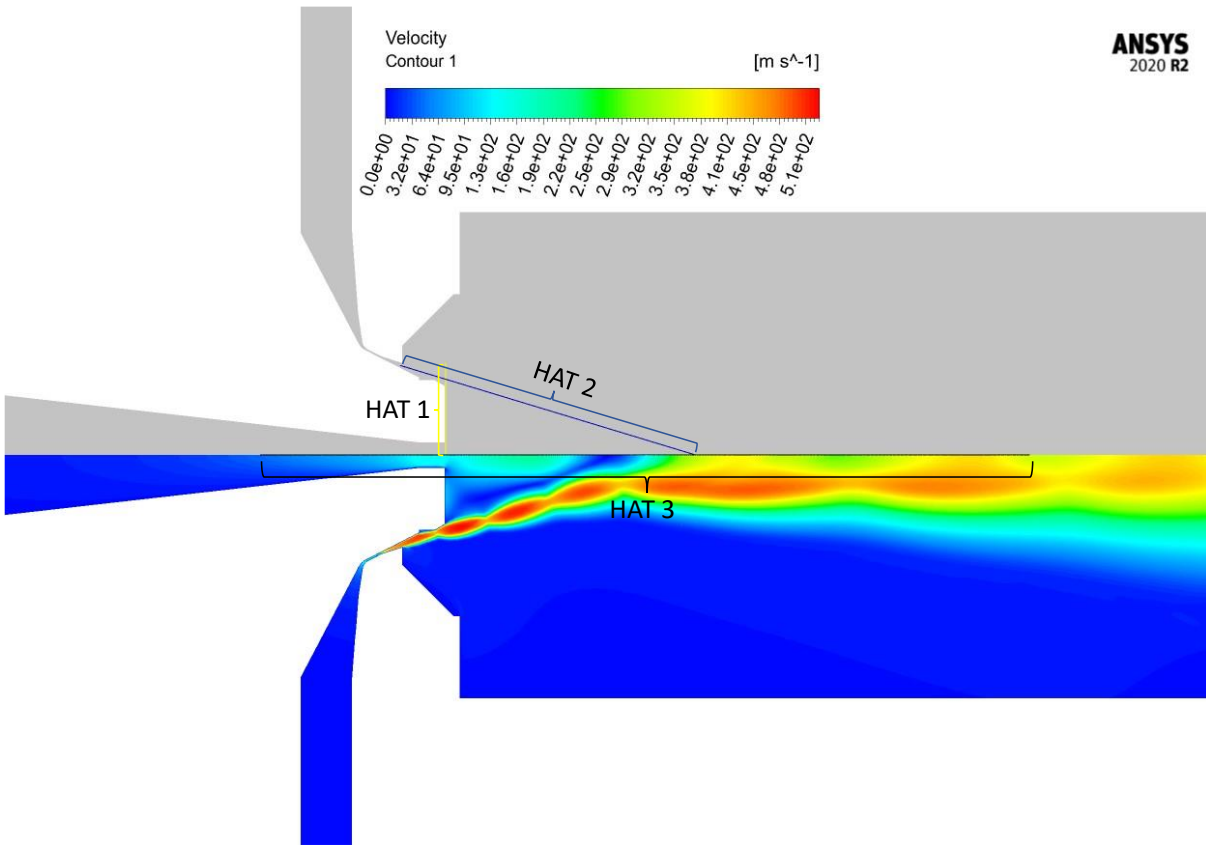
deneysel çalışmalarda da uygulayabildiğimiz maksimum basınç olan 3,7 MPa argon gazı giriş basıncında, farklı eleman sayılarına sahip ağ yapısında bağımsızlık testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı hem bilgisayar hesaplama kaynaklarını hem de hesaplama süresini verimli bir şekilde kullanabilmektir.

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere duvar kenarlarında ağ yapısı sıklaştırılmıştır. Bunun sebebi gaz akışı sınır tabakasına yaklaştıkça, akış hızı keskin bir şekilde düşecektir. Bu nedenle duvar kenarındaki bölgelerde ağ yapısı sıklaştırılmış ve kenar boyutlandırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.2. Ağ yapısının Modellenmesi

Ağ yapısından bağımsızlık testlerinde belirli bir eleman sayısından sonra ölçüm yapılan parametrelerin değişmeyeceğinden emin olmak gerekmektedir. Bu sebeple Hat 1, Hat 2 ve Hat 3 olarak adlandırılan üç farklı hatta, ağ yapısının eleman sayısına bağlı olarak gaz hızları ölçülmüştür. Düğüm sayısına ve eleman sayısına bağlı olarak gerçekleştirilen analizler Çizelge 4.1’de ve ölçüm yapılan hatlar Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



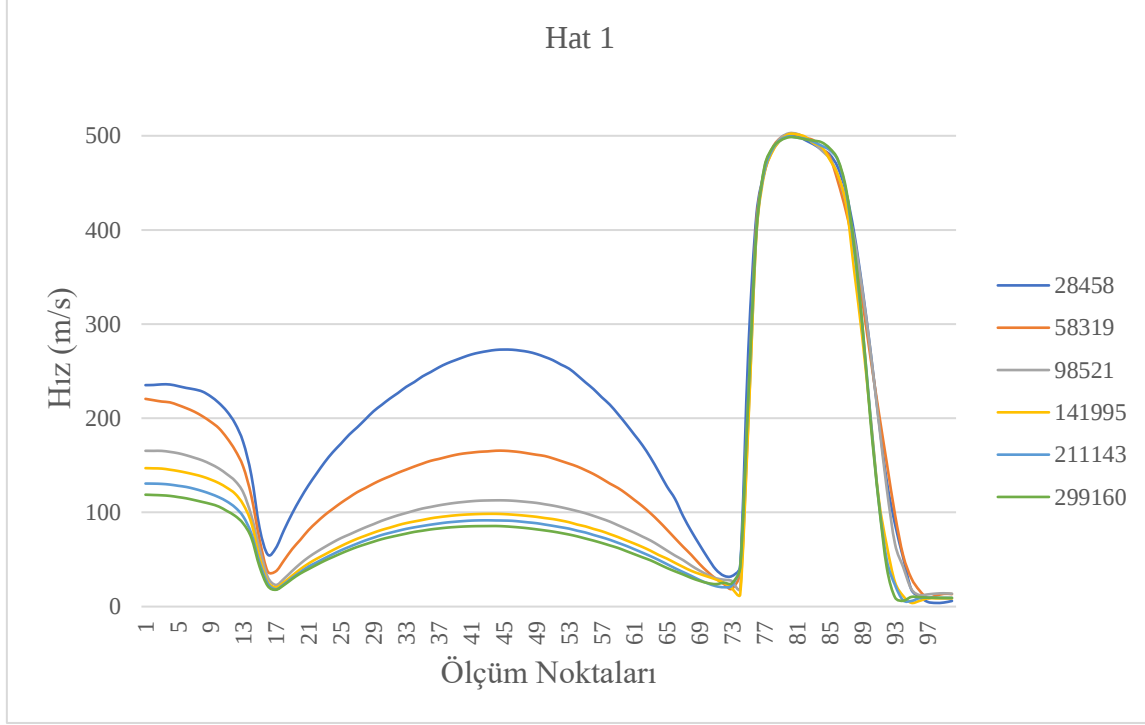
Şekil 4.3. Ağ yapısından bağımsızlık için ölçüm yapılan hatlar

Çizelge 4.1. Ağ yapısından bağımsızlık testi için kullanılan eleman sayıları

Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı
18 143	28 458
33 349	58 319
53 650	98 521
75 535	141 995
110 298	211 143
154 487	299 160

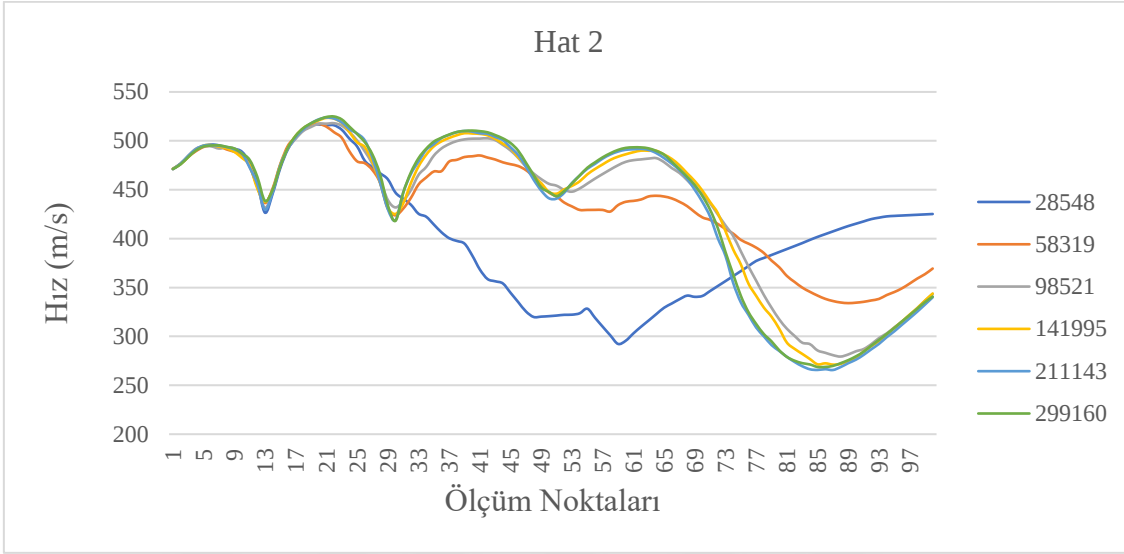
Hat 1 boyunca gerçekleştirilen gaz hızı ölçümleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Ölçümlerde gaz maksimum hızı yaklaşık olarak aynı olmasına rağmen hat boyunca yapılan ölçümlerde gaz

hızında büyük farklılıklar görülmektedir. 28458 eleman sayısında hat boyunca gaz hızları en yüksek değerde iken, 211143 ve 299160 eleman sayısında hız değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu tespit edilmiştir.



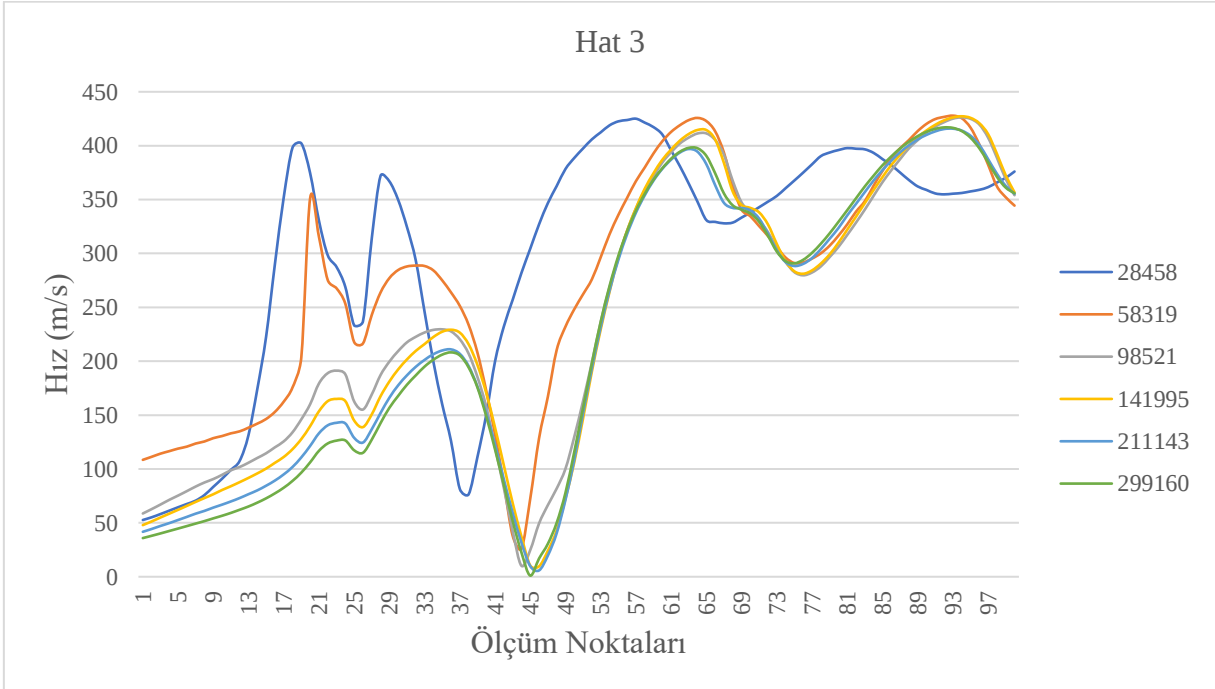
Şekil 4.4. Hesaplama alanı boyunca Hat 1 sonuçları

Şekil 4.5’de ise gaz akışının nozul boyunca izlediği yolu yaklaşık olarak takip eden hatta hız ölçümleri yapılmıştır. 28548 eleman sayısında maksimum gaz hızı nozul çıkışında diğer eleman sayılarıyla aynı değerdedir. Ancak hat boyunca eleman sayısı artıkça, ağ yapısının yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple artırılan eleman sayısında 211143 ve 299160 eleman sayısının benzer trendi izlediği görülmüştür.



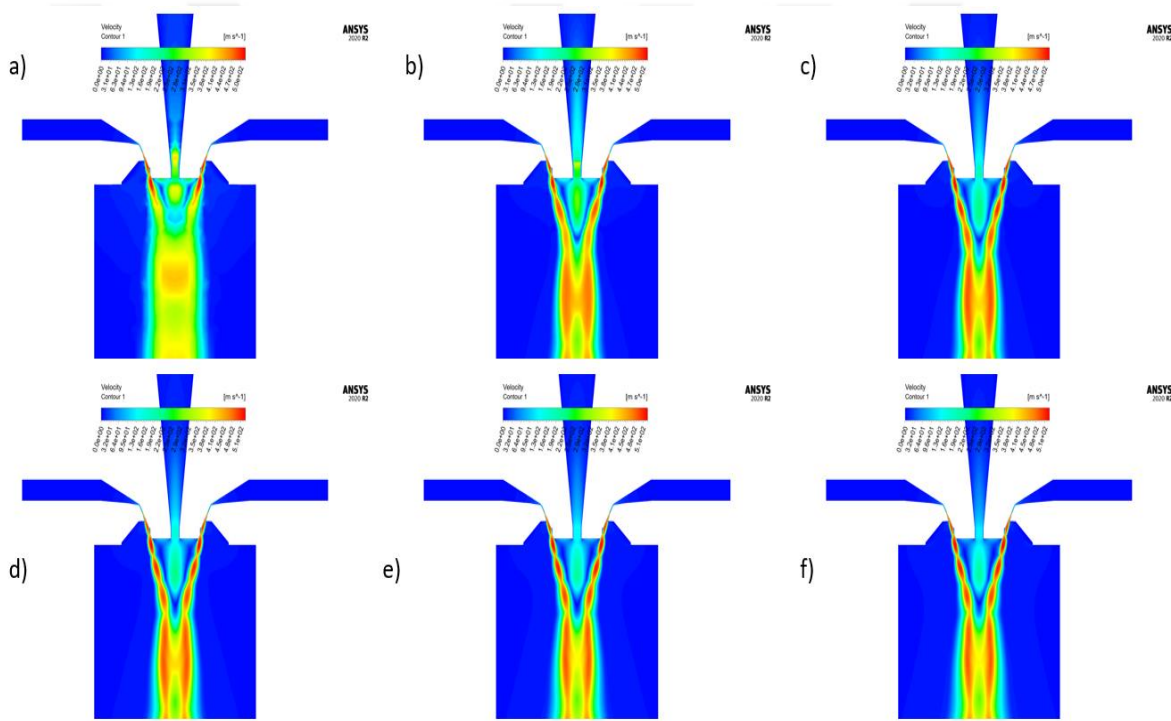
Şekil 4.5. Hesaplama alanı boyunca Hat 2 sonuçları

Şekil 4.6’da ise Hat 3 boyunca eleman sayısı artışına bağlı olarak incelendiğinde gaz akış hızında belirgin farklılıklar görülmüştür. Ancak birbirlerine en yakın trendi izleyen iki değer 211143 ve 299160 eleman sayısı olduğu görülmüştür. Bu sebeple 211143 eleman sayısında karar kılınmıştır.



Şekil 4.6. Hesaplama alanı boyunca Hat 3 sonuçları

Şekil 4.7’de ise a, b, c, d, e ve f görselleri sırasıyla 28458, 58319, 98521, 141995, 211143 ve 299160 eleman sayılarını temsil etmektedir. 28458 eleman sayısında sirkülasyon bölgesinin tam olarak belli olmadığı ve gaz akış dinamiğinin hesaplanamadığı görülmüştür. 58319 ve 98521 eleman sayılarında Prandtl-Meyer dalgalarının henüz tam belirginleşmediği ve geri basıncın oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. 141995, 211143 ve 299160 eleman sayıları benzer görünümlere sahipken, üç hattın incelenmesi sonucunda aralarındaki farklılıklar belirlenmiş ve bu sebeple bilgisayar yükünü azaltmak için 211143 eleman sayısına karar kılınmıştır.



Şekil 4.7. a) 28458, b) 58319, c) 98521, d) 141995, e) 211143 ve f) 299160 eleman sayısı kullanılarak 3,7 MPa giriş basıncında gaz akış dinamiği analizleri

4.2. Tek Fazlı Gaz Akışının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi

Gaz atomizasyonda toz boyunu etkileyen birçok parametre olduğu Bölüm 2’deki literatür çalışmalarında belirtilmiştir. Bu parametrelerin en önemlilerinden biride gaz basıncıdır. Çünkü gaz giriş basıncı artmasıyla beraber kinetik enerji artacak ve gazdan ergiyik metale aktarılan yüzey gerilimi daha fazla olacaktır. Artan enerji sayesinde daha küçük boyutta partiküller üretilebilecektir. Bu çalışmada da 2,5 MPa; 3 MPa; 3,5 MPa ve 3,7 MPa gaz giriş basıncında

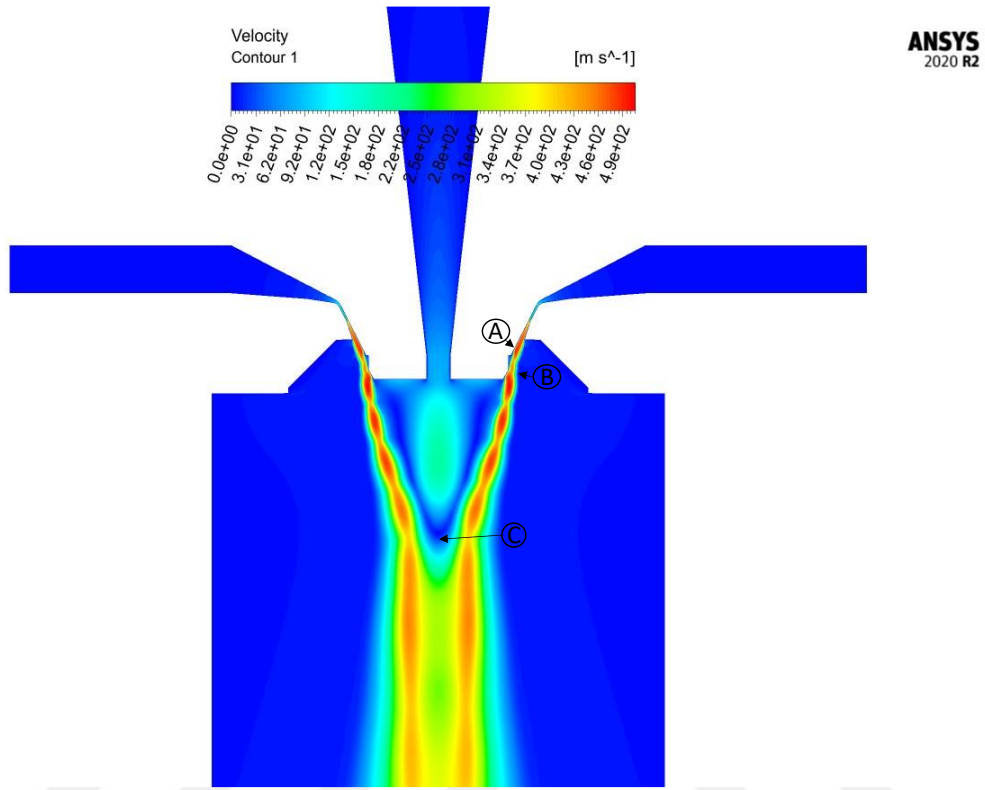
gaz akış dinamiği bölgesi incelenmiştir. HAD yöntemini kullanan ANSYS programıyla gerçekleştirilen analizin parametreleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Seçilen ANSYS Fluent analiz parametreleri

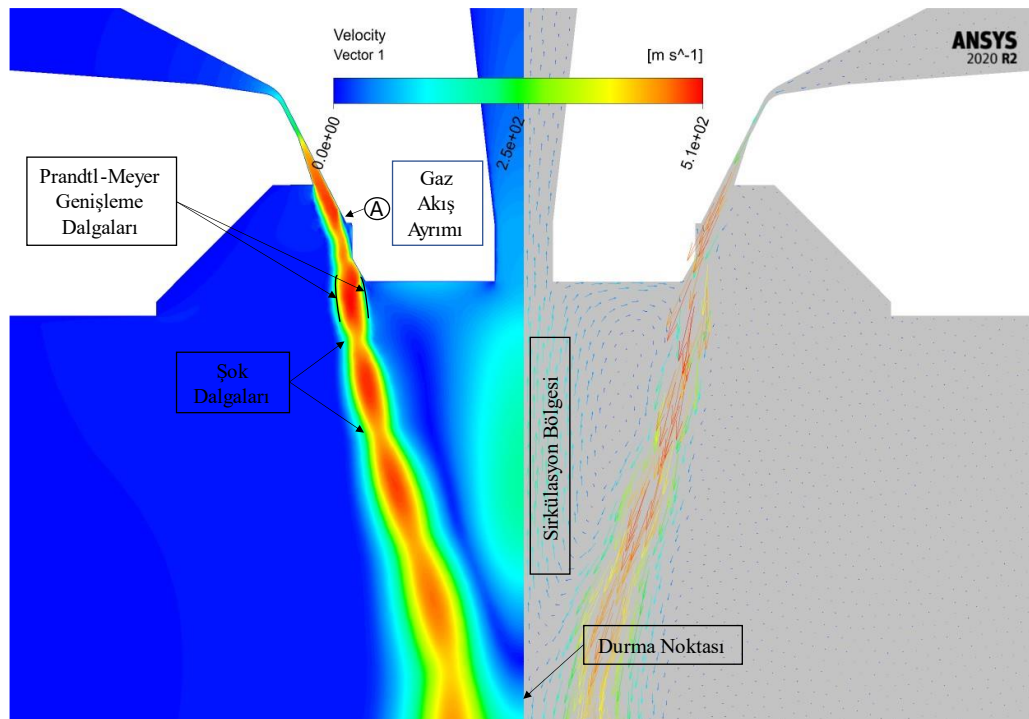
ANSYS PARAMETRE	SEÇENEK
Çözücü Tipi	Basınç Tabanlı
Hız Formülasyonu	Mutlak
Zaman	Kararlı
2D	Eksenel Simetrik
Enerji	Açık
Türbülans Modeli	k-ε RNG
Formülasyon	Implicit
Başlatma	Hibrit

Gaz atomizasyonda ilk olarak 2,5 MPa argon giriş basıncında gaz akış dinamiği incelenmiştir. Şekil 4.8’de Prandtl-Meyer dalgaları ve eğik şok dalgalarının 2,5 MPa gaz akışında belirgin bir şekilde görülmektedir. Ancak Şekil 4.8’de “A” noktasından görüldüğü üzere gaz akışı nozuldaki ilk çıktığı anda ortam basıncından çok yüksek bir basınca sahip olmadığı için yeterince genişleme gösterememiştir. Şekil 4.8’de “B” noktasında ise gazın ergiyiğin döküldüğü tandiş duvarına çarptığı andan itibaren Prandtl-Meyer dalgalarının net bir şekilde oluştuğu görülmüştür.

Ergiyik nozulun alt bölgesinde incelendiğinde sirkülasyon bölgesi ve bu bölgede durma noktası oluştuğu görülmüştür. Şekil 4.8’de “C” noktasında gaz akış hızının sıfır ve basıncın maksimum durumda olduğu durma noktası gösterilmiştir. Ayrıca bu noktaya ulaşan gaz akış basıncı Şekil 4.9’daki vektörlerden görüldüğü üzere tandişe doğru negatif basınç olarak yönelmektedir.

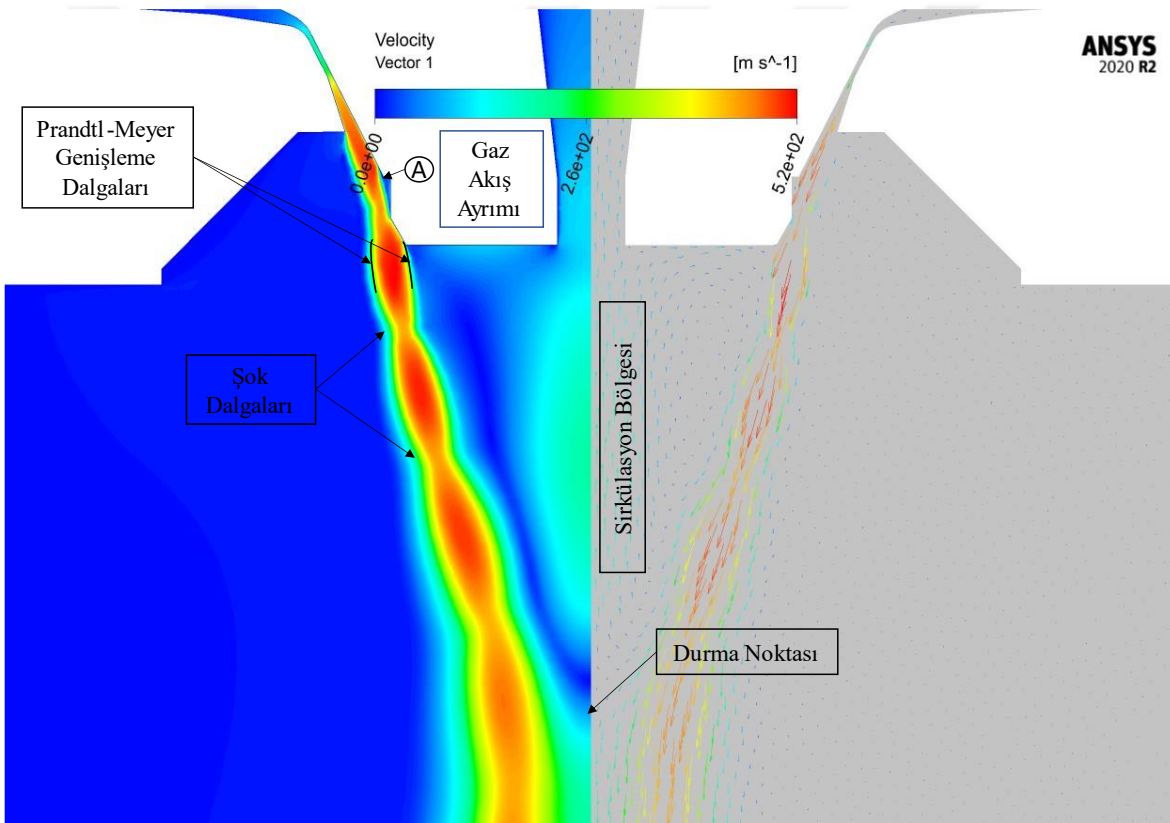


Şekil 4.8. 2,5 MPa argon gaz giriş basıncında gaz akış dinamiği



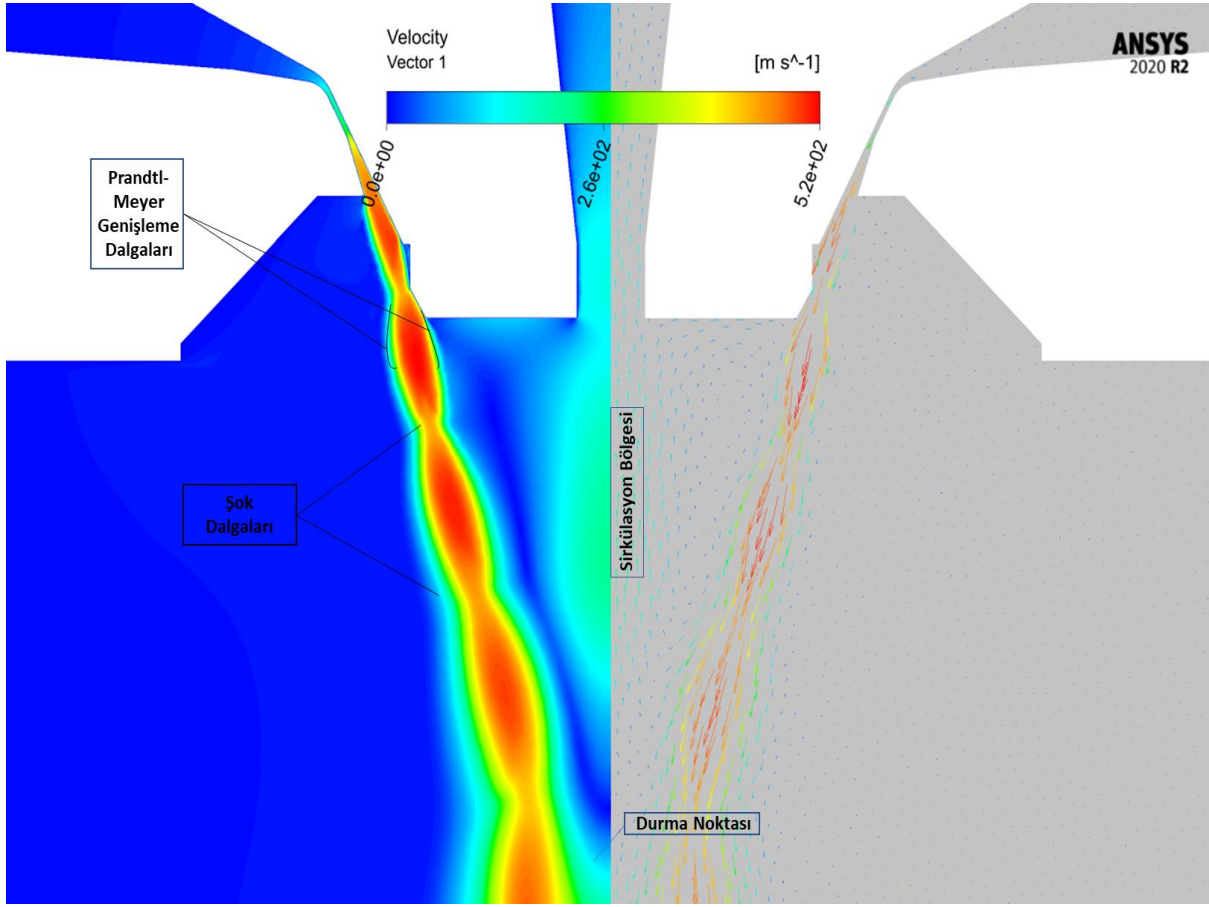
Şekil 4.9. 2,5 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği

3 MPa argon gaz giriş basıncı ile 2,5 MPa giriş basıncı karşılaştırıldığında, nozul çıkışında gaz akışı düzgün bir şekilde genişlememiştir. Bunun sebebi her iki gaz giriş basıncı içinde Şekil 4.9'da "A" ve Şekil 4.10.'da "A" noktasında görüldüğü üzere gaz akış ayrımı neden olmaktadır. Ancak buna rağmen Şekil 4.9'daki "A" ve Şekil 4.10'daki "A" bölgesi karşılaştırıldığında oluşan gaz akış ayrımı, basınç artışıyla beraber azalmaktadır. Ayrıca 3 MPa 'da basınç farkı ve momentum sayesinde şok dalgalarının gücünün 2,5 MPa basınca göre daha fazla olduğu görülmüştür.



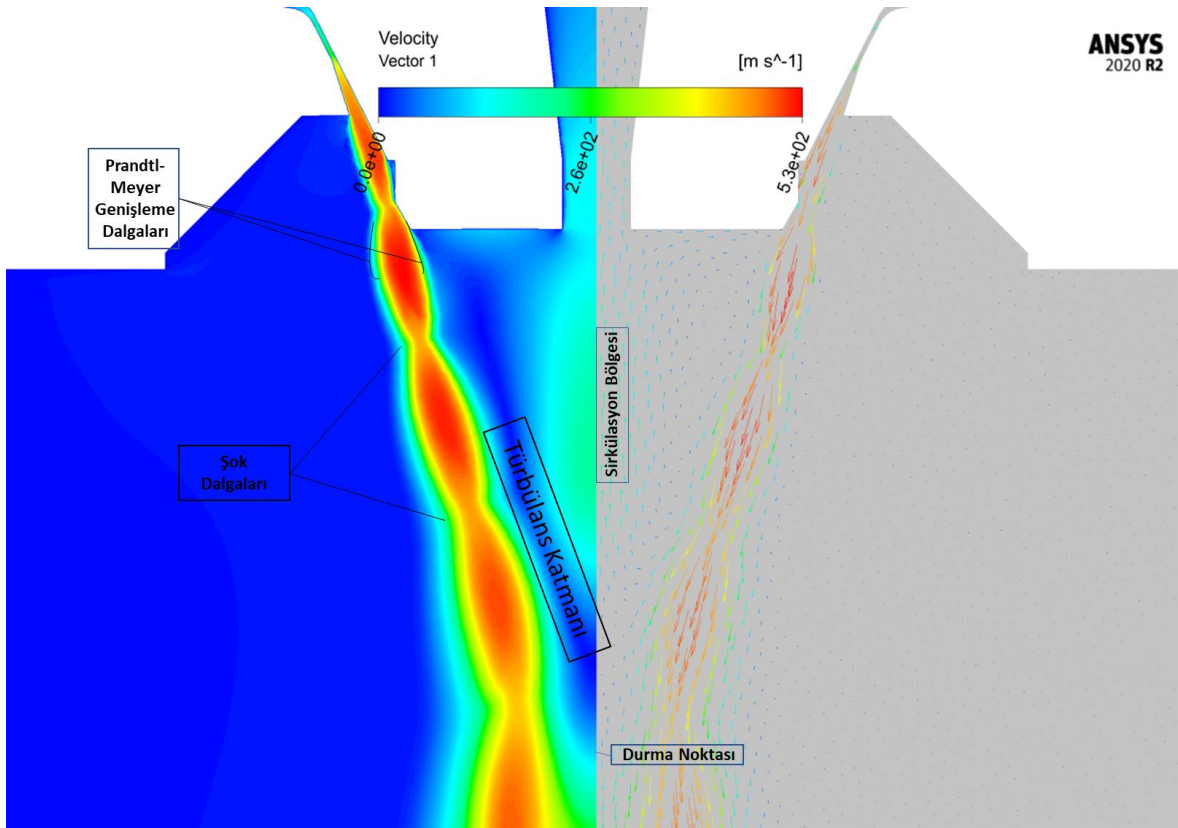
Şekil 4.10. 3 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği

Şekil 4.11'de ise 3,5 MPa argon gaz giriş basıncında akış ayrımı görülmemekle beraber, Prandtl-Meyer genişleme dalgaları nozuldan çıkış anından itibaren belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca sirkülasyon bölgesi etrafında oluşan türbülans katmanının en alt kısmında durma noktası oluşmuştur. Negatif basınç ise 2,5 MPa ve 3 MPa basınca göre nispeten daha yüksek miktarda olduğu tespit edilmiştir.

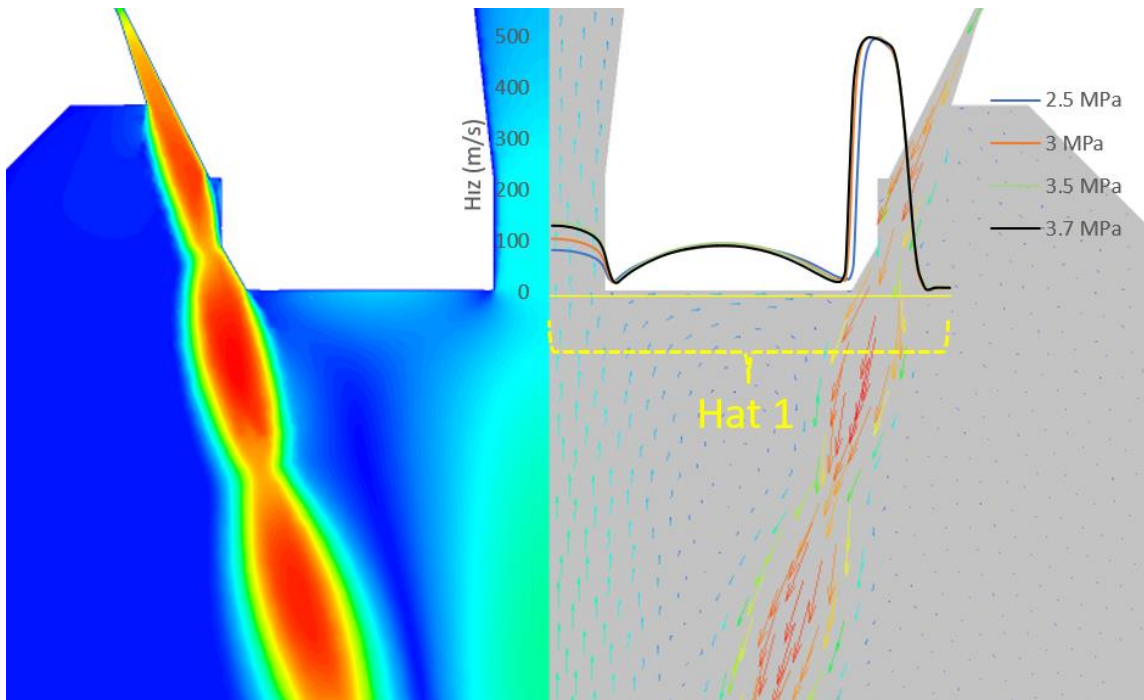


Şekil 4.11. 3,5 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği

Deneyssel olarak gerçekleştirdiğimiz çalışmalarda basınç regülatörünün kapasitesi maksimum 4 MPa olduğu için, bu kapasitenin altında uygun bir basınç olarak 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında son analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te 3,7 MPa giriş basıncında gaz atomizasyon havzasındaki gaz akış dinamiği gözlenmektedir.



Şekil 4.12. 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği



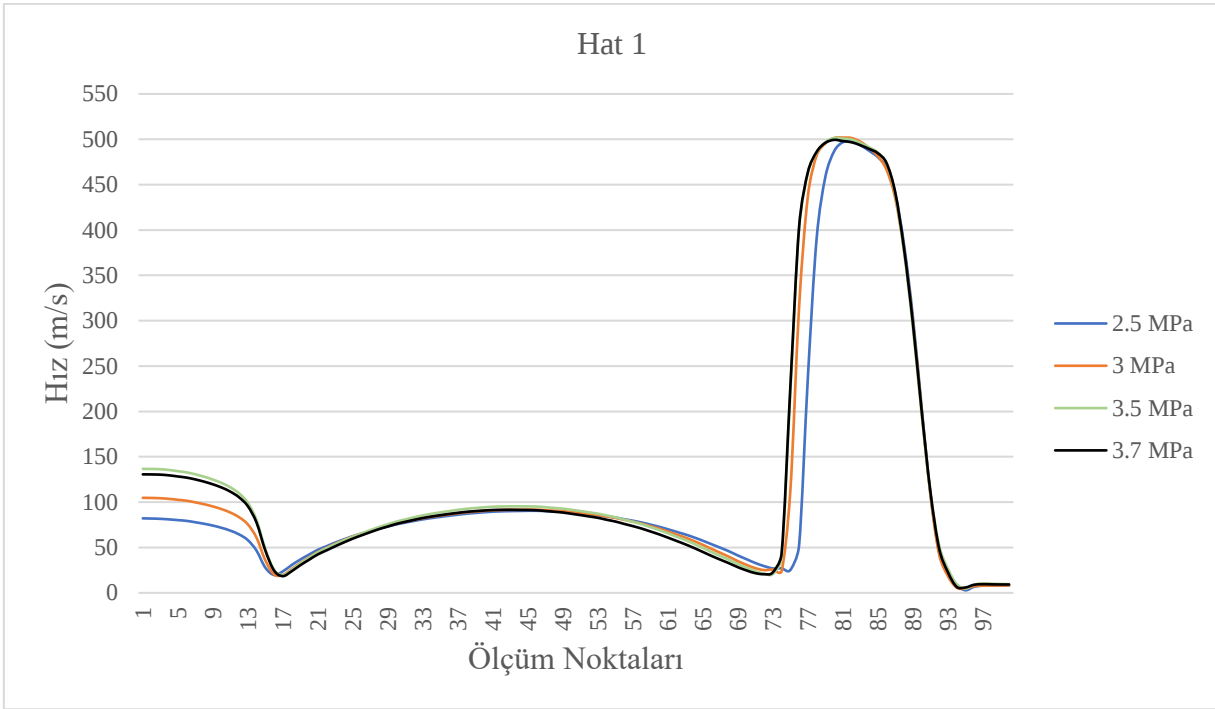
Şekil 4.13. 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği

Şekil 4.13’de görüldüğü üzere Hat 1 hattı 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa giriş basıncında elde edilen değerlerin grafiği, görselde aynı hat üzerine ölçeklendirilerek konumlandırılmıştır. Mavi hat 2,5 MPa, turuncu hat 3 MPa, yeşil hat 3,5 MPa ve siyah hat 3,7 MPa basıncı tanımlamaktadır. Görselde belirtilen sarı hat ise Hat 1’i temsil etmektedir. Grafiğin sol tarafında yer alan değerler ise belirtilen basınçlarda analiz edilen argon gaz hız değerlerini belirtmektedir.

Siyah hattı temsil eden 3,7 MPa gaz giriş basıncının nozuldan çıkış anında en geniş Prandtl-Meyer genişleme dalgasına sahip olduğu görülmektedir. Çünkü ilk anda aynı noktada başlayan gaz giriş basınçlarında siyah hattın merkez eksene yaklaşmasına rağmen diğer gaz giriş basınçlarına göre hızını hala korumaktadır. Mavi hattı temsil eden 2,5 MPa giriş basıncı ise en düşük Prandtl-Meyer genişleme dalgasına sahip olduğu bunun sebebi de Şekil 4.9’da A bölgesinde oluşan gaz akış ayrımı ve daha düşük gaz giriş basıncı olduğu tespit edilmiştir.

Gaz atomizasyonda 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa gaz giriş basınçlarına bağlı olarak Şekil 4.14’de görüldüğü üzere ölçülen noktalarda maksimum hız değerleri incelendiğinde sırasıyla 458,38 m/s; 495,44 m/s; 496,76 m/s ve 496,09 m/s değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu değerler dikkate alındığında maksimum hızlarda 3; 3,5 ve 3,7 MPa gaz giriş basınçları yaklaşık olarak aynı değere sahiptir. Ancak bu noktaya göre alınan değerlerden ziyade, yüksek hızdaki gaz akışının sürekliliği önemlidir. Bu sebeple tek bir noktadan alınan değerler yerine Hat 1, Hat 2 ve Hat 3 ölçümlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Hat 1 sirkülasyon bölgesini temsil eden gaz atomizasyon ekseninde ise 3,5 MPa ve 3,7 MPa basınçların sırasıyla 136,67 m/s ve 130,65 m/s değerlerinde yaklaşık olarak aynı hız değerlerine ve en yüksek hız miktarına sahip olduğu görülmektedir. 3 MPa ve 2,5 MPa giriş basıncının merkez eksende sırasıyla 104,78 m/s ve 82,15 m/s hız değerlerine sahip olduğu Şekil 4.14’den görülmektedir. Gaz atomizasyonda tandış altı bölgede negatif basınç istendiği için yüksek hızlarda gaz basıncı tercih sebebi olmaktadır. Ancak bu durumda da deneysel çalışmalarda yüksek hızlı gaz basıncından kaynaklı negatif basıncın ergiyik nozulda donmaya sebep olmamasına dikkat etmek gerekmektedir.

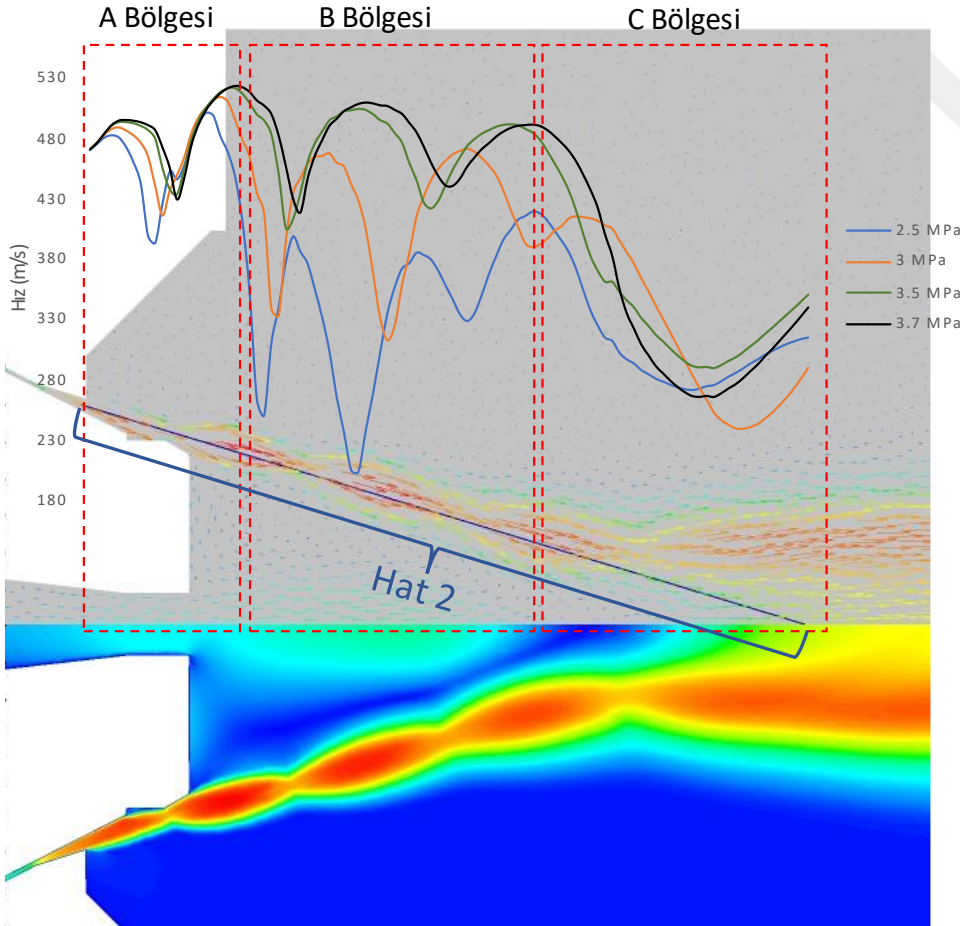


Şekil 4.14. Hat 1 hattında 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basınçlarında hız ölçüm değerleri

Şekil 4.15’de ise Hat 2 görüldüğü üzere nozul çıkışından atomizasyon eksenine doğru çizilmiştir. Bu eksen 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa gaz giriş basınçlarında argon gaz hızları ölçülmüştür. Ölçülen değerlerde 2,5 MPa mavi hattı, 3 MPa turuncu hattı, 3,5 MPa yeşil hattı ve 3,7 MPa siyah hattı temsil etmektedir. Hat 2 yatay ve dikey koordinatlarda çizilmiş bir hat olmasına rağmen ölçülen değerler atomizasyon eksenine paralel olan hız değerleridir. Ayrıca gaz akış dinamiği yorumlanırken kesik çizgilerle belirtilen kırmızı renkli hat içerisinde A, B ve C bölgelerine ayrılmıştır.

Şekil 4.15’de A bölgesinde nozul çıkış anında 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basınçları sırasıyla 470,84 m/s; 471 m/s; 471,13 m/s ve 471,20 m/s hız değerlerine sahiptir. Bu değerlere bakınca 2,5 MPa gaz basıncı 3; 3,5 ve 3,7 MPa gibi daha yüksek basınçlarla yaklaşık olarak aynı hız değerine sahip olduğu görülmektedir ancak belirtildiği gibi önemli olan gaz akışının atomizasyon hattı boyunca daha küçük boyutta partiküller elde edebilmek için yüksek kinetik enerji miktarını koruyabilmesidir.

Şekil 4.15’de A bölgesinde bulunan 2,5 MPa gaz basıncının en düşük noktası Şekil 4.9’de A noktası olarak gösterilen gaz akış ayrımının olduğu bölgedir. Bu bölgede gaz akış ayrımından dolayı gaz kinetik enerjisinde önemli bir düşüş görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.15’de A bölgesinin sonuna doğru bakıldığında 2,5 MPa gaz giriş basıncı maksimum noktasına ulaştıktan sonra ortam basıncının etkisiyle tekrar azalmaya geçmiştir. Şekil 4.15’de B bölgesine bakıldığında ise ilk tepe noktası 399,17 m/s, ikinci tepe noktası 385 m/s ve üçüncü tepe noktası 419,85 m/s hız değerlerine sahiptir. Bu bölgeden sonra ise Şekil 4.15’de C bölgesinde argon gazını çevreleyen basınç, gaz basıncına yaklaştığı için gaz hızının düştüğü görülmektedir. Sonuç olarak 2,5 MPa gaz basıncı başlangıç anında diğer gaz giriş basınçlarıyla neredeyse aynı gaz hızına sahip olmasına rağmen, atomizasyon boyunca kinetik enerjisinin en düşük değere sahip olduğu tespit edilmiştir.

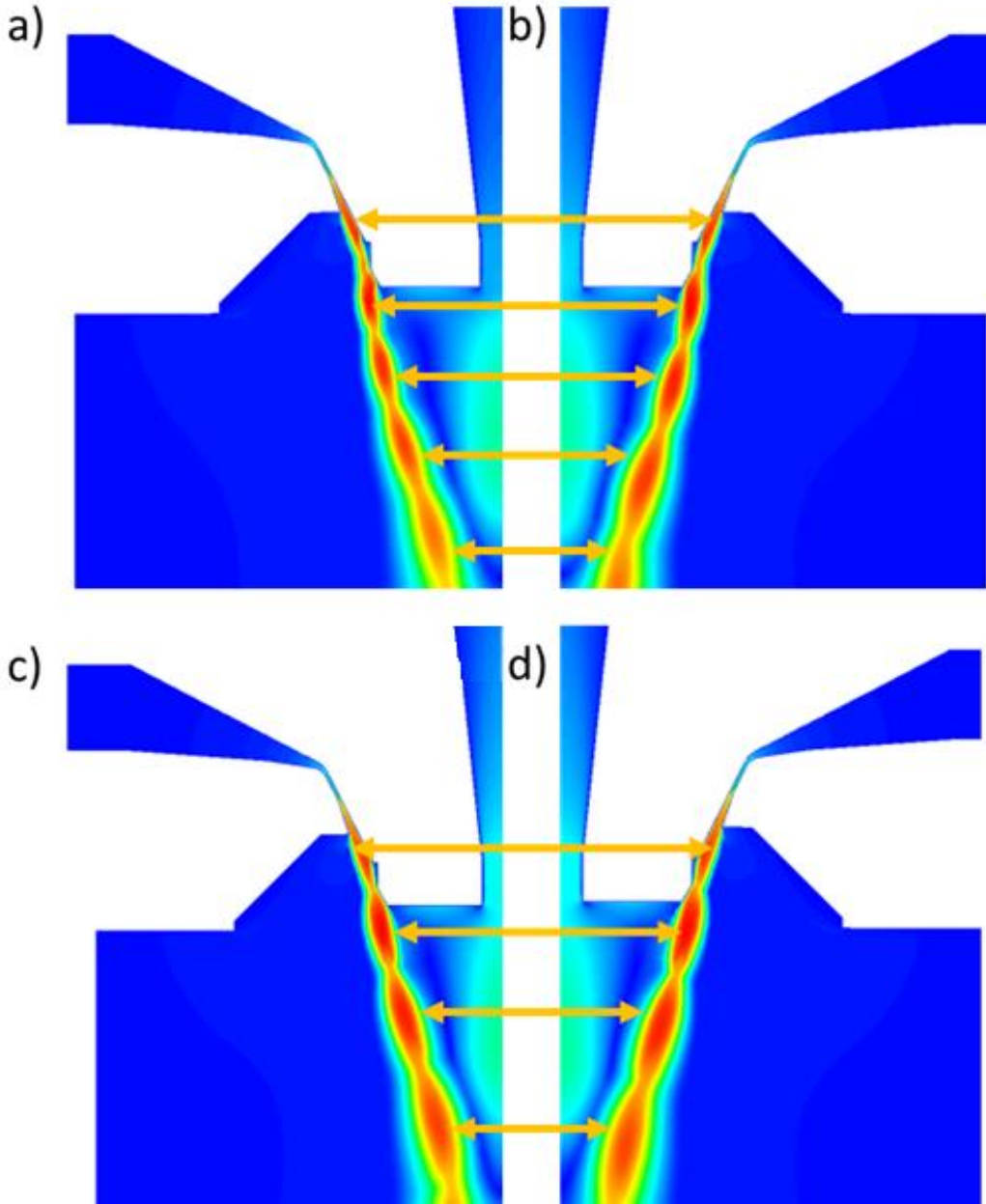


Şekil 4.15. Hat 2 hattında 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği

Çizelge 4.3'te farklı gaz giriş basınçlarında Şekil 4.15'de belirtilen Hat 2 boyunca oluşan argon gazı için tepe noktalarında oluşan hız değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.16'da ise 2,5 MPa ve 3 MPa için beş tepe noktası, 3,5 ve 3,7 MPa için dört tepe noktası olduğu turuncu renkteki hatlar ile görülmektedir. Bunun sebebi 2,5 ve 3 MPa gaz giriş basınçlarında gaz basıncı, çevreleyen gaz basıncına daha yakın olduğu için daha sık Prandtl-Meyer genişleme dalgalarına sahip olmaktadır. 3,5 MPa ve 3,7 MPa gaz giriş basıncı için ise kinetik enerji değeri hat boyunca daha yüksek olduğu için ortam basıncıyla eşitlenmesi daha uzun sürecektir. Bu sebeple hat boyunca oluşan Prandtl-Meyer dalgalarında dört adet tepe noktası oluşmuştur. Ayrıca gaz basıncının, ortam basıncıyla eşitlenmesi uzun sürdüğünden şok dalgaları arasındaki mesafe 2,5 ve 3 MPa'a göre daha fazladır, bir diğer deyişle daha uzun Prandtl-Meyer genişleme dalgalarına sahiptir. Bu durumda atomizasyon işlemi boyunca 3,5 MPa ve 3,7 MPa gaz giriş basıncının 2,5 ve 3 MPa'a göre daha yüksek kinetik enerjiye sahip olduğu anlamına gelmektedir.

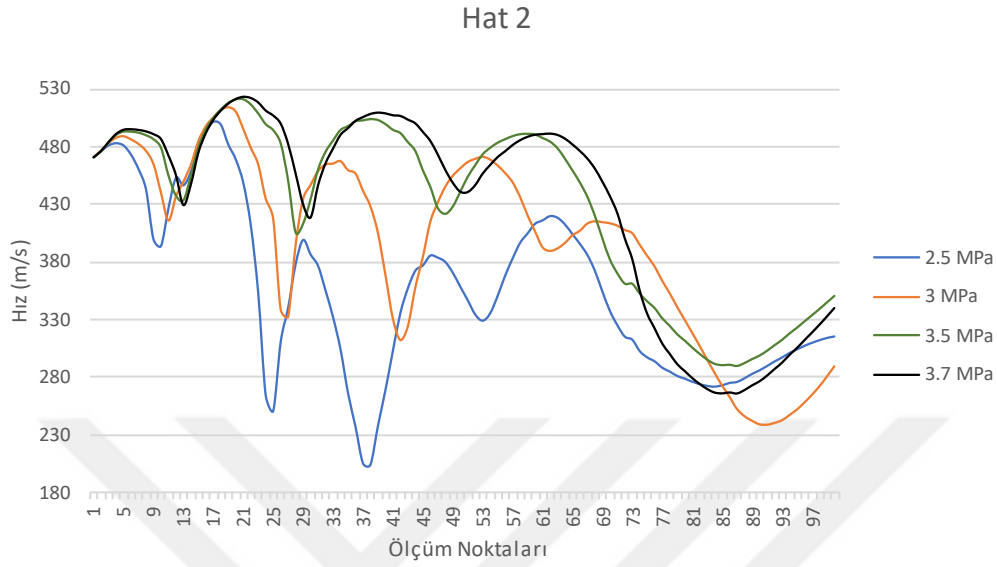
Çizelge 4.3. Farklı gaz giriş basınçlarında Hat 2'e göre maksimum gaz hızları

Gaz Giriş Basıncı	1.Tepe Noktası	2.Tepe Noktası	3.Tepe Noktası	4.Tepe Noktası	5.Tepe Noktası
2,5 MPa	483,13 m/s	501,68 m/s	399,17 m/s	385,59 m/s	419,85 m/s
3 MPa	488,92 m/s	514 m/s	467,37 m/s	471,19 m/s	415,29 m/s
3,5 MPa	493,56 m/s	521,79 m/s	504,48 m/s	491,66 m/s	-
3,7 MPa	495,60 m/s	523,81 m/s	510,06 m/s	491,79 m/s	-



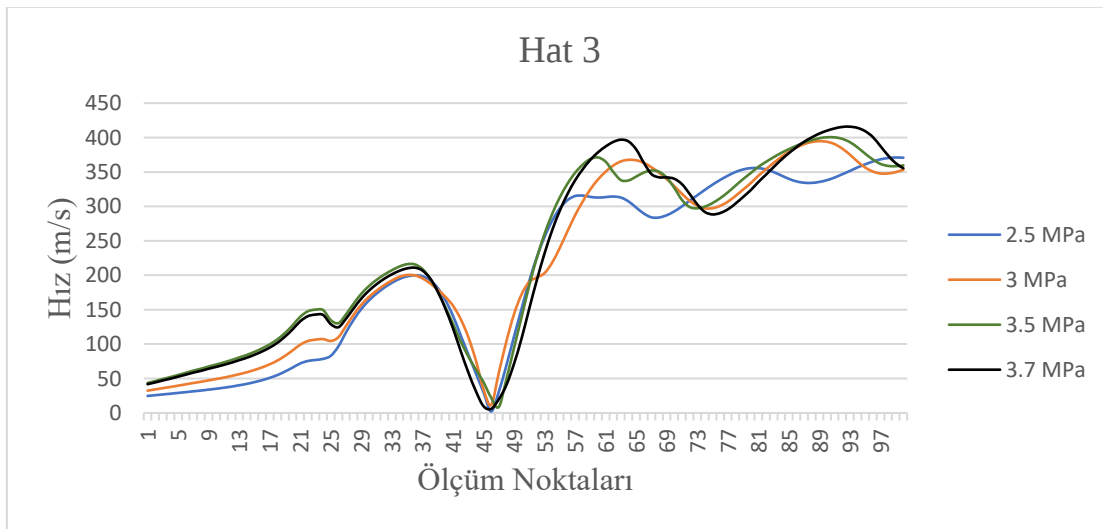
Şekil 4.16. Turuncu hatlar ile belirtilen Prandtl-Meyer genişleme dalgaları sırasıyla a) 2,5 MPa; b) 3 MPa, c) 3,5 MPa ve d) 3,7 MPa

Şekil 4.17’de ise Hat 2 hattı 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basınçlarında hat boyunca en yüksek kinetik enerjiye 3,7 MPa giriş basıncının sahip olduğu görülmektedir. Yüksek kinetik enerjisi sayesinde daha yüksek yüzey gerilimleri oluşturacaktır. Böylece daha küçük toz boyutta toz partikülleri elde edilecektir.

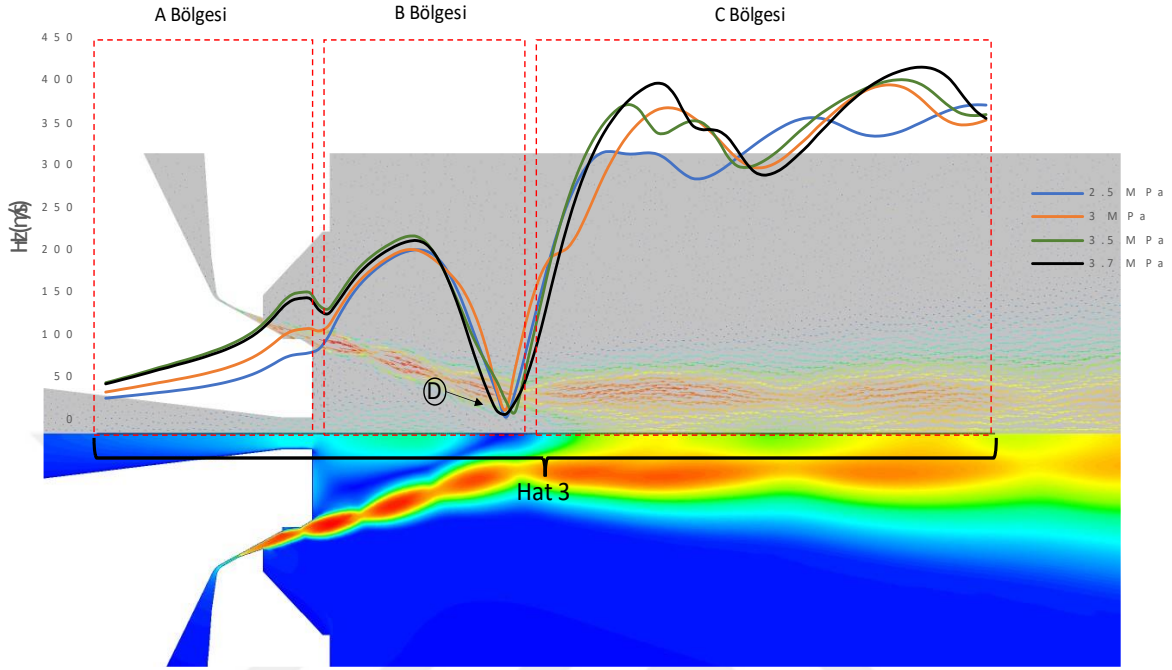


Şekil 4.17. Hat 2’de 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basınçlarında hız ölçüm değerleri

Şekil 4.19’da belirtilen Hat 3 gaz atomizasyon eksenini boyunca çizilmiştir. 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa giriş basıncında Şekil 4.18.’de grafikten elde edilen değerler, Hat 3 üzerinde ölçeklendirilerek Şekil 4.19’da konumlandırılmıştır. Şekil 4.19’da A bölgesinde ergiyik nozuldaki en yüksek geri akış hızı 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa için sırasıyla 76,88 m/s; 106,45 m/s; 149,98 m/s ve 142,83 m/s hızı sahiptir. Gaz atomizasyonda negatif basınç istenilen bir parametre olduğu için, bu durumda da 3,5 ve 3,7 MPa’daki giriş basınçları 2,5 ve 3 MPa’a göre daha avantajlı bir durumdadır.



Şekil 4.18. Hat 3’te 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basınçlarında hız ölçüm değerleri



Şekil 4.19. Hat 3 için 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında vektörel hız grafiği

Şekil 4.19’da B bölgesi incelendiğinde hız grafiğinde tepe noktası 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa için sırasıyla 199,89 m/s; 200,39 m/s; 216,05 m/s ve 210,98 m/s olarak ölçülmüştür. Bu değerler sirkülasyon bölgesinin merkez noktasını temsil etmekte olup hızın bu bölgedeki maksimum değerleridir. Gaz giriş basınçlarına göre maksimum hızlar karşılaştırıldığında yaklaşık olarak aynı hız değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca “D” noktası olarak gösterilen kısım ise durma noktasını temsil etmektedir. Durma noktası farklı giriş basınçları için yaklaşık olarak ergiyik nozuldan aynı mesafede oluşmuştur. Ancak bu duruma bağlı olarak gaz giriş basınçlarını karşılaştırmak doğru bir tercih olmayacaktır. Çünkü Şekil 4.19 “A” bölgesinde 3,5 MPa ve 3,7 MPa’da gaz geri basınçları 2,5 MPa ve 3 MPa basınca göre çok daha yüksektir. Şekil 4.19’da “C” bölgesi incelendiğinde ise 3,7 MPa gaz basıncını temsil eden siyah hattın açıkça iki farklı tepe noktasıyla 396,91 m/s ve 415,78 m/s ile en yüksek gaz akış hızına sahip olduğu görülmektedir. Aynı bölgede 3,5 MPa gaz giriş basıncında oluşan 371,10 m/s ve 400,39 m/s oluşan iki farklı tepe noktası 3,7 MPa basınca en yakın olan değerlerdir.

Sonuç olarak gaz atomizasyonda tek fazlı gaz akış analizlerinde üç farklı Hat 1, Hat 2 ve Hat 3 için gaz akış hızları incelenmiştir. 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa gaz giriş basınçlarında yukarıda belirtildiği gibi bazı noktalarda maksimum gaz akış hızları birbirlerine oldukça yakın olmasına

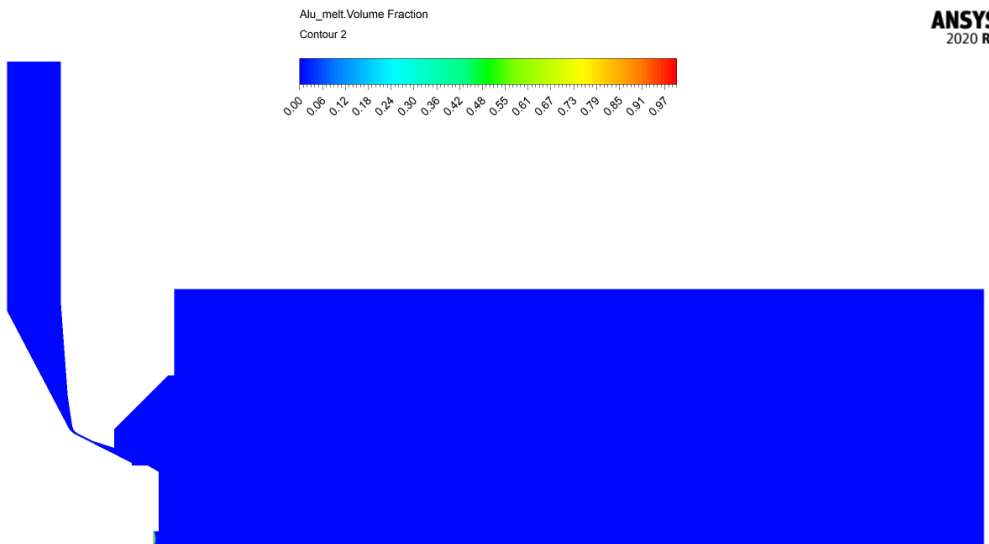
rağmen önemli olan yüksek kinetik enerjinin atomizasyon işlemi boyunca sürdürülebilir olmasıdır. Bu sebeple dört farklı gaz giriş basıncı incelendiğinde en yüksek kinetik enerjiye sahip gaz giriş basıncının 3,7 MPa olduğu tespit edilmiş ve Bölüm 4.3'te ergiyik nozul ile gaz akışının iki-fazlı analizi HAD yöntemiyle analiz edilmiştir.

4.3. İki Fazlı Ergiyik Metal-Gaz Akışının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi

Gaz atomizasyonda tek fazlı gaz akış analizleri Bölüm 4.2'de detaylı olarak incelenmiştir. 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basınçlarında gaz akış dinamiği atomizasyon prosesi boyunca analiz edilerek en yüksek kinetik enerjiye 3,7 MPa gaz giriş basıncının sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında ergiyik-gaz akış analizleri iki fazlı olarak HAD yöntemini kullanan ANSYS Fluent programı ile modellenerek incelenmiştir.

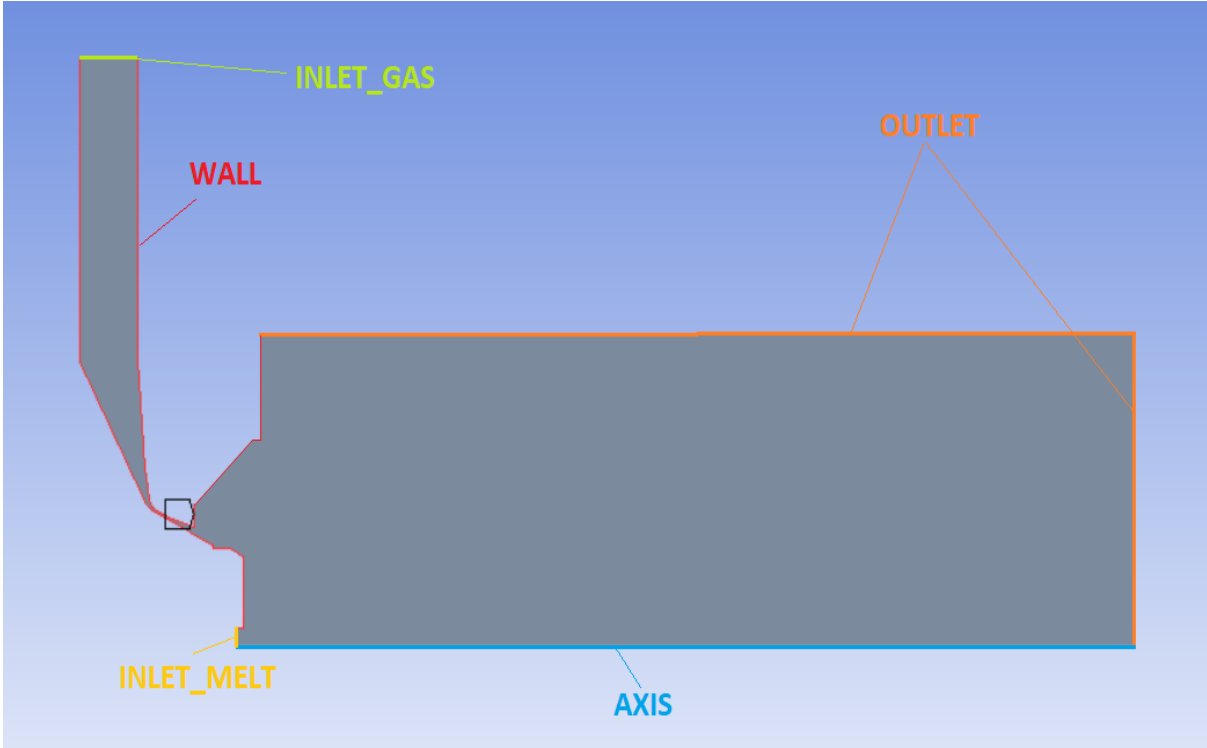
4.3.1. Ağ yapısının oluşturulması ve analiz kabulleri

Gaz atomizasyonda iki-fazlı analizlerde bilgisayarın hesaplama süresi ve yükü tek fazlı analize göre oldukça fazla miktarda artmaktadır. Bu sebeple zamana bağlı olarak gaz atomizasyon işlemi modelleneceği için tandış mesafesi kısaltılmıştır. Şekil 4.20'de hesaplama alanı gösterilmektedir.



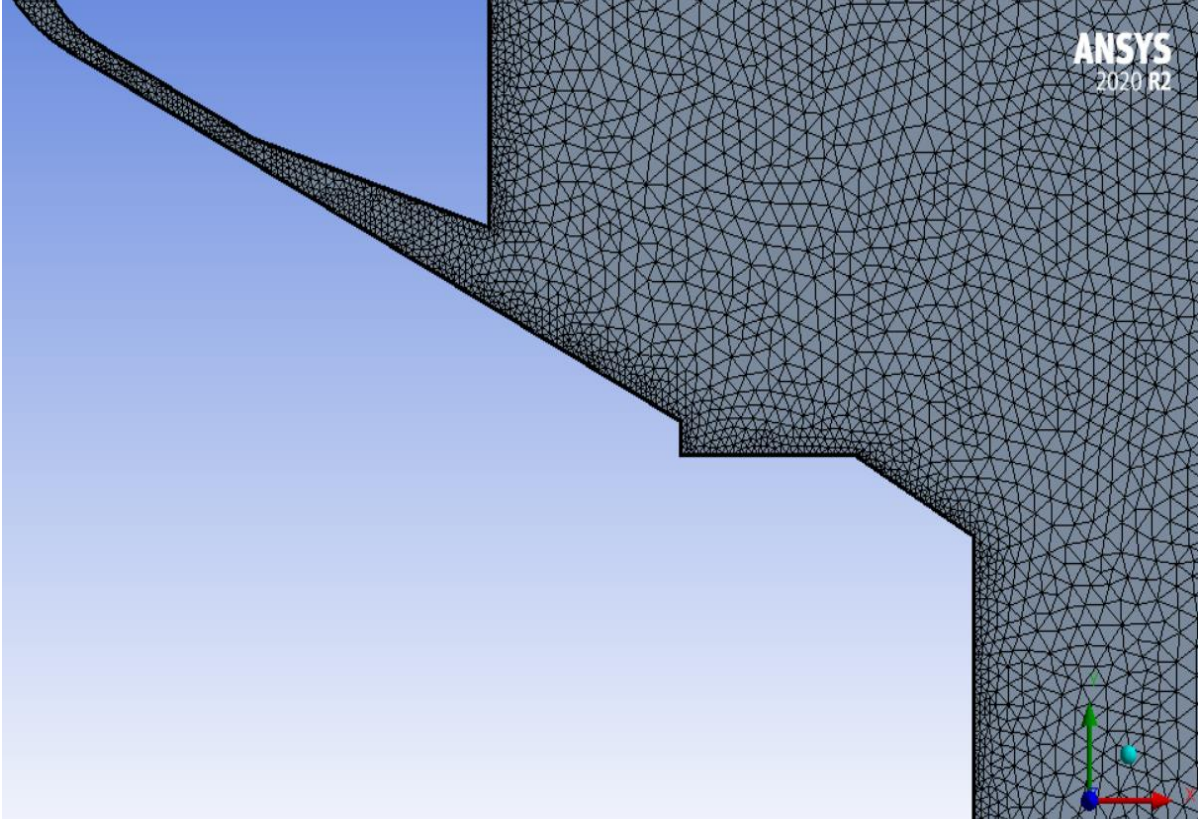
Şekil 4.20. İki Fazlı Analizler için Hesaplama Alanının Geometrisi

Şekil 4.20’de görüldüğü üzere dairesel yarık nozula sahip atomizasyon kulesi simetrik bir yapıya sahip olduğu için eksenel simetrik olarak modellenmiştir. Ayrıca kullanılan bilgisayar sisteminde hesaplama işlemlerini yapabilmek için atomizasyon prosesi analizi iki boyutta gerçekleştirilmiştir. Analizdeki sınır koşulları ise Şekil 4.21.’de gösterilmiştir. “INLET_GAS” gaz girişini, “INLET_MELT” ergiyik girişini, “WALL” duvarları, “AXIS” atomizasyon eksenini ve “OUTLET” çıkışı tanımlamaktadır.



Şekil 4.21. İki fazlı analizler sınır koşulları

Bölüm 4.1’de belirtildiği gibi ağ yapısından bağımsızlık testleri gerçekleştirilen ve Şekil 4.22’de gösterilen ağ yapısı, iki fazlı analizlerin modellenmesinde kullanılacaktır. 201783 eleman sayısı, 105340 düğüm noktası ve $3e-4$ m eleman boyutu tercih edilmiştir. Ayrıca ağ yapısında duvar kenarlarında sıklaştırma uygulanarak hızın sınır tabakaya yaklaşıncaya hızı radikal bir şekilde düşeceğinden bu bölgede analizi doğru yapabilmek için ağ yapısı sıklaştırılmıştır.



Şekil 4.22. İki fazlı analizlerde kullanılan ağ yapısı

Yakından eşlemeli gaz atomizasyon prosesini çift fazlı olarak modellemek için Bölüm 3.3'te belirtildiği üzere Euler veya ayrık partiküllerin takibini analiz eden Lagrange metotları kullanabilmektedir. Euler yaklaşımında gaz akışı ve ergiyik sıvıların hacmi (VOF) metodu ile modellenebilmektedir. Çalışmamızda birincil atomizasyon prosesini analiz etmek için Euler-Euler yaklaşımı kullanan sıvıların hacmi (VOF) metodu kullanılacaktır. Sıvıların hacmi yönteminde bilgisayar yükü daha fazla olmasına rağmen birincil atomizasyon işlemi için parçalanma prosesini daha detaylı analiz edilmesini sağlayacaktır.

Analizlerde kullanılan ANSYS Fluent parametreleri Çizelge 4.4'te ve atomizer gaz olarak kullanılan argon gazının özellikleri Çizelge 4.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. İki fazlı analizler için kullanılan ANSYS Fluent parametreleri

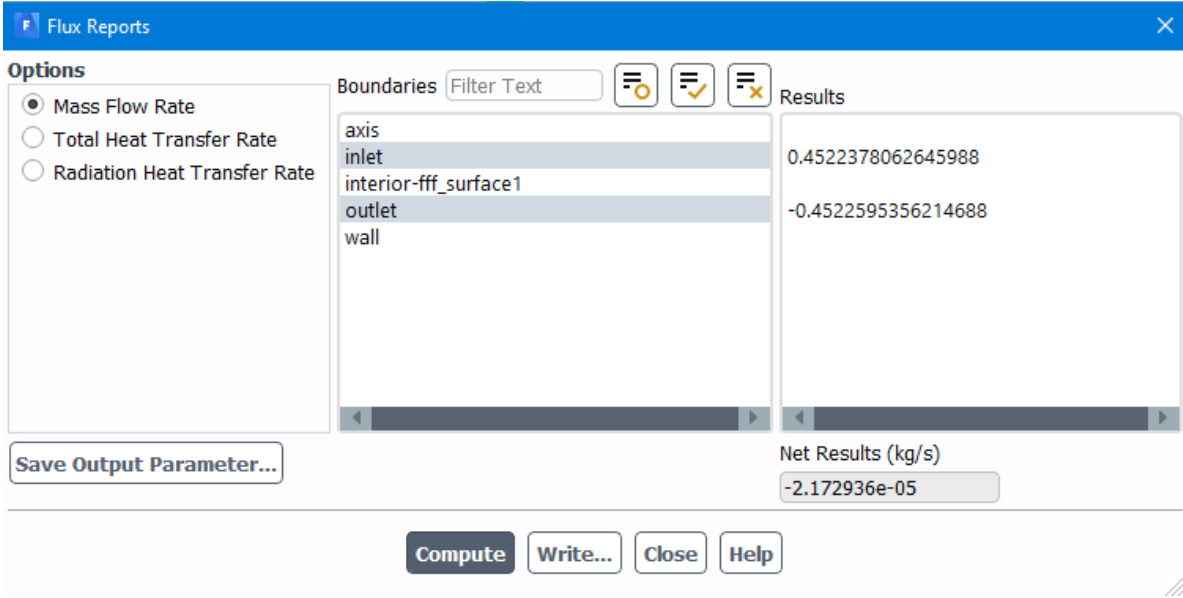
ANSYS PARAMETRE	SEÇENEK
Çözücü Tipi	Basınç Tabanlı
Hız Formülasyonu	Mutlak
Zaman	Transient
2D	Eksenel Simetrik
Enerji	Açık
Türbülans Modeli	k-ε RNG
Formülasyon	Implicit
Başlatma	Hibrit

Çizelge 4.5. Argon Özellikleri [82]

ANSYS PARAMETRE	ARGON
Yoğunluk (kg/m ³)	İdeal Gaz
Özgül Isı (j/kg-k)	520,64
Termal İletkenlik (w/m-k)	0,0158
Viskozite (kg/m-s)	2,12e-05
Moleküler Ağırlık (kg/kmol)	39,948
Entalpi (j/kgmol)	-3117,711

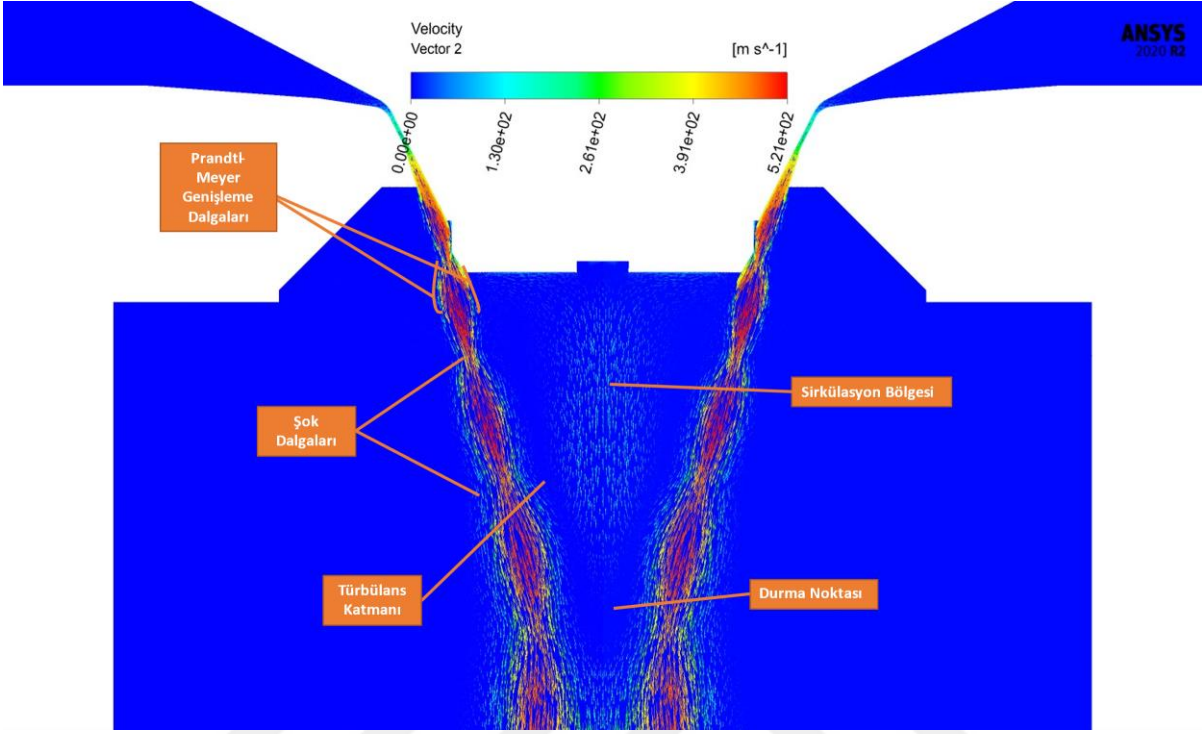
4.3.2. İki fazlı ergiyik metal-gaz akışında birincil atomizasyonun hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile analizi

Yakından eşlemeli gaz atomizasyon modelinde Şekil 4.21’de belirtildiği üzere “INLET_MELT” kısmından ergiyik girişi sağlanmaktadır. 3,7 MPa ’da argon gazı kütleli debisi Şekil 4.23’te görüldüğü üzere 0,452 kg/s olarak ölçülmüştür.



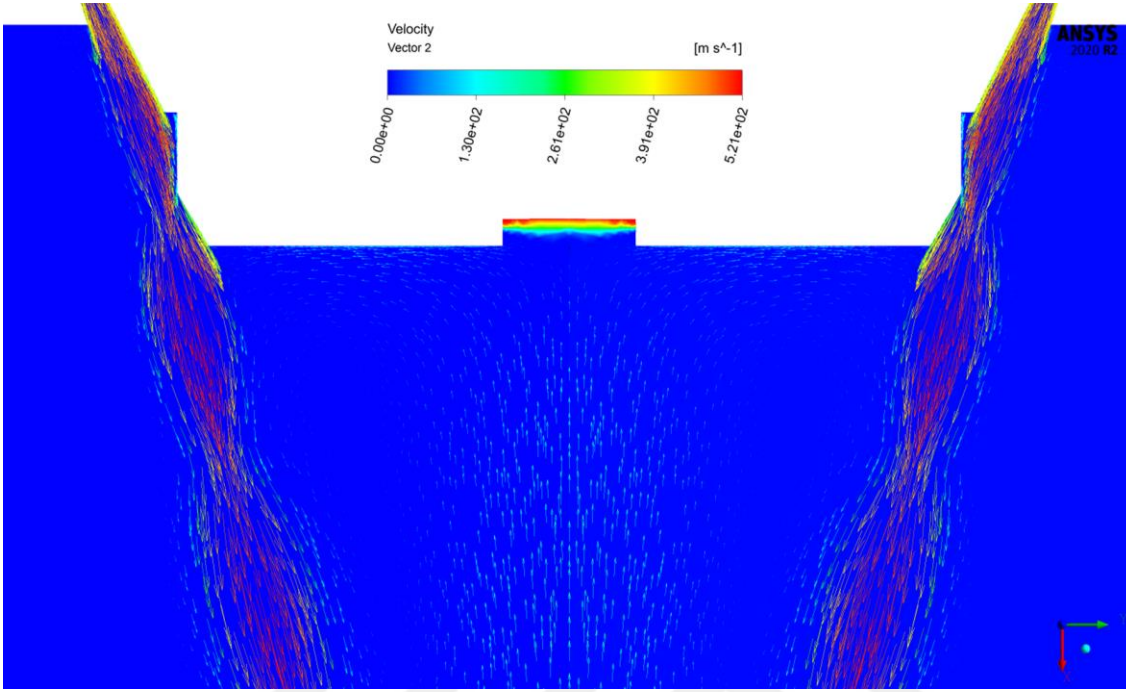
Şekil 4.23. 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında kütleli debi ölçümü

Zamana bağlı analizlerde ilk önce gaz akışının kararlı hale geçebilmesi için analiz ilk 50 iterasyonda sadece gaz akışı ile gerçekleştirilmiştir. Bu durumda analiz 5e-5 saniyede olup 3,7 MPa argon gaz basıncının kararlı hale geldiği Şekil 4.24’te görülmektedir. Bu durumda Prandtl-Meyer genişleme dalgaları, şok dalgaları, sirkülasyon bölgesi, durma noktası ve türbülans katmanını net bir şekilde gözlenmektedir.

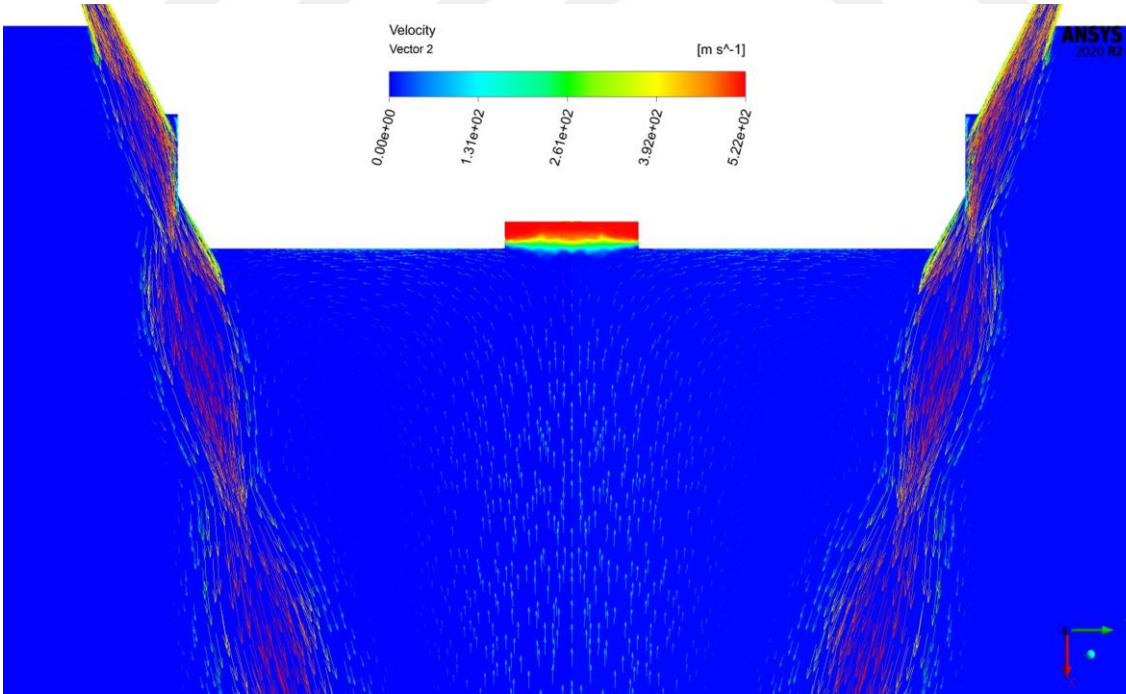


Şekil 4.24. 3,7 MPa argon giriş basıncında 5e-5 saniyede gaz akış dinamiği

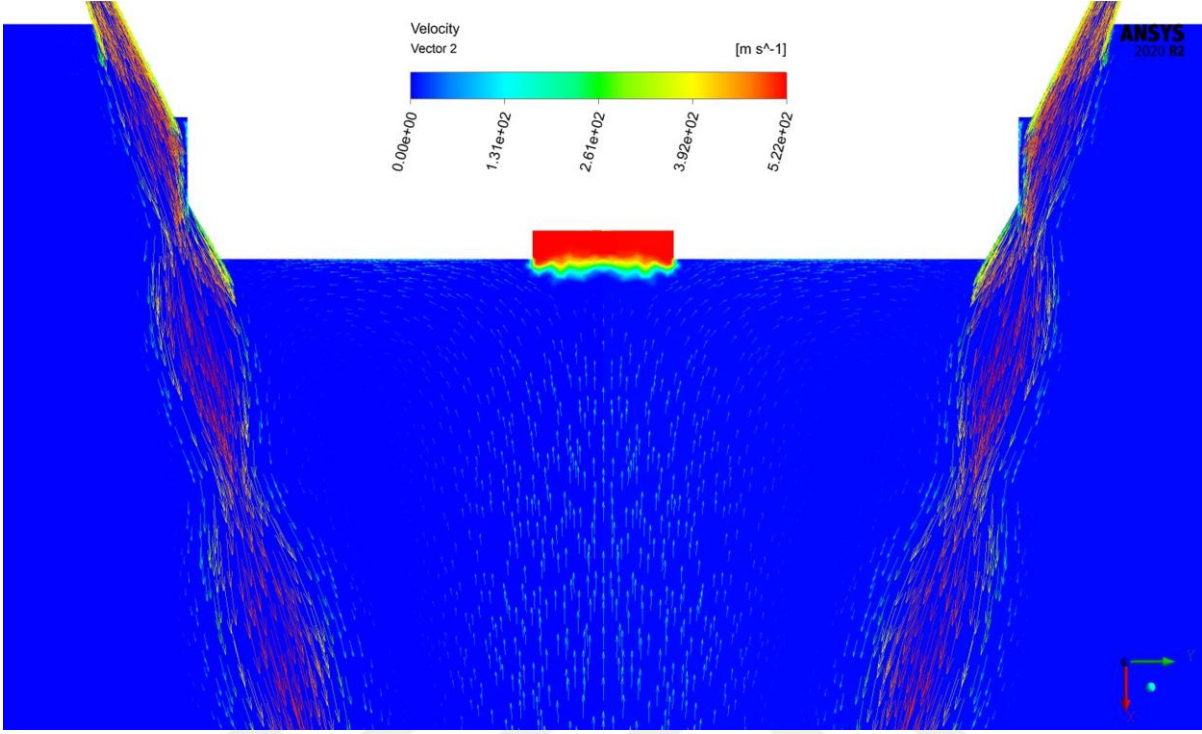
Şekil 4.25'te görüldüğü gibi dökülen ergiyik, 2e-4 saniyede tandište belirli bir mesafe kat etmiştir. Eğer bu anda gaz geri basıncı olması gerekenden yüksek olsaydı, ergiyiğin dökülmesine engel olabilir ve deneysel çalışmalarda da donmaya sebep olabileceği anlamına gelirdi. Bu analiz devamında Şekil 4.26'da 5e-4 ve Şekil 4.27'de 8e-4 saniye zamanları incelendiğinde ergiyiğin dökülme işlemine devam ettiği gözlenmektedir. 8e-4 noktasında ergiyik geri basınç etkisiyle dalgalanmaya başladığı görülmektedir.



Şekil 4.25. 3,7 MPa argon giriş basıncında 2e-4 saniyede gaz akış dinamiği

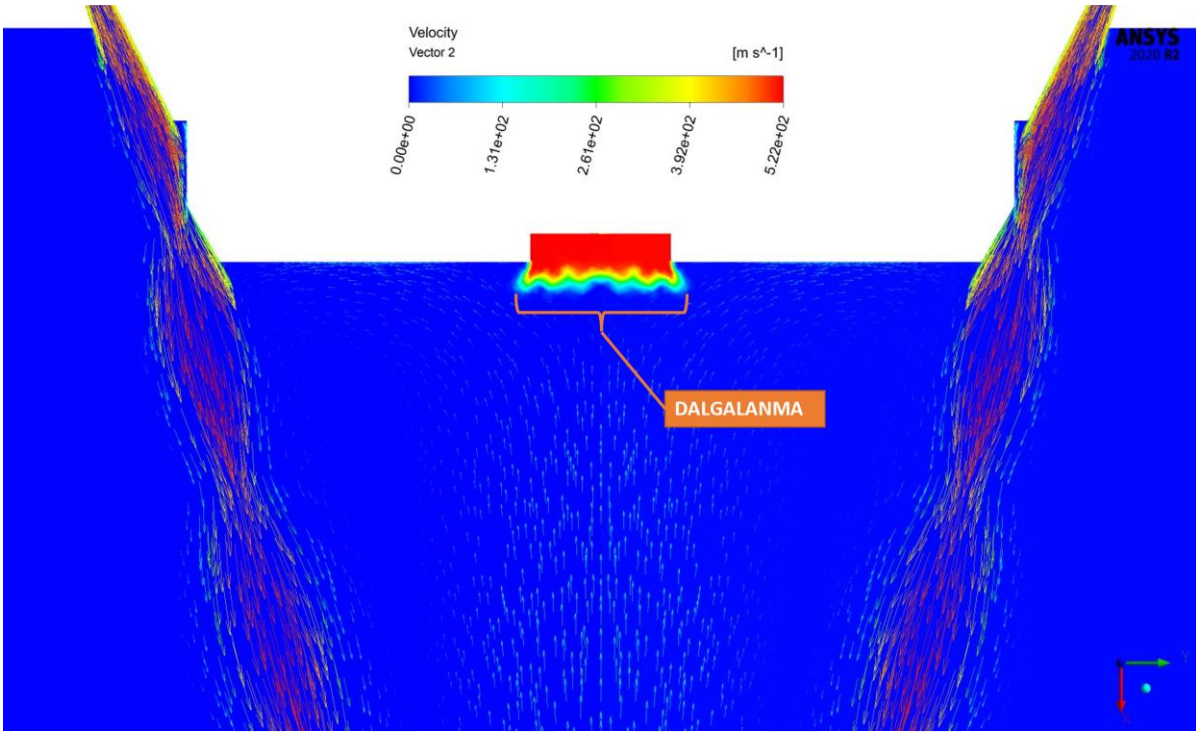


Şekil 4.26. 3,7 MPa argon giriş basıncında 5e-4 saniyede gaz akış dinamiği

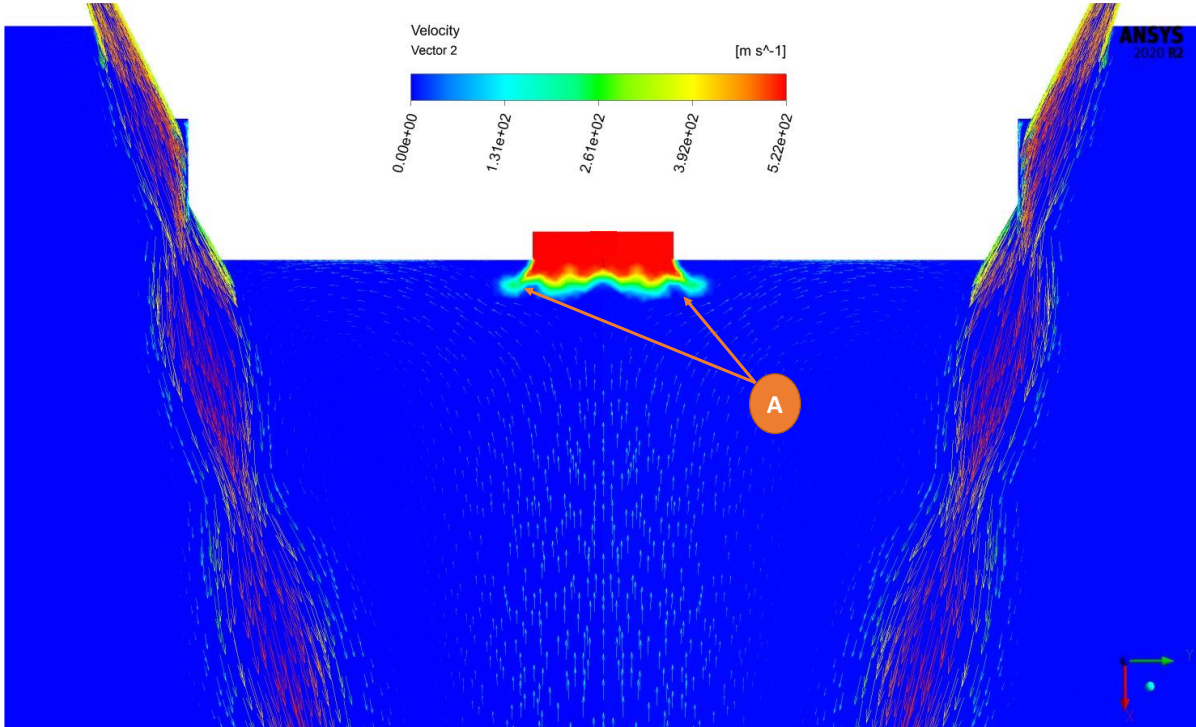


Şekil 4.27. 3,7 MPa argon giriş basıncında $8e-4$ saniyede gaz akış dinamiği

Şekil 4.28’de ise $11e-4$ saniyede ergiyiğin uç kısmında dalgalanma miktarının gaz geri basıncıyla daha çok arttığı gözlenmektedir. Şekil 4.29’da ise $13e-4$ saniyede artan yüzey gerilimleri sonucunda “A” bölgesinde belirtilen bölgelerde ligament oluşumları gözlenmektedir. Bu durum Şekil 2.43’te Dopler vd. [49], tarafından hazırlanan birincil atomizasyon işlemi öncesi sıvı film ve ligamentlerin oluştuğu atomizasyon parçalanma işlemindeki ilk aşamalardandır.



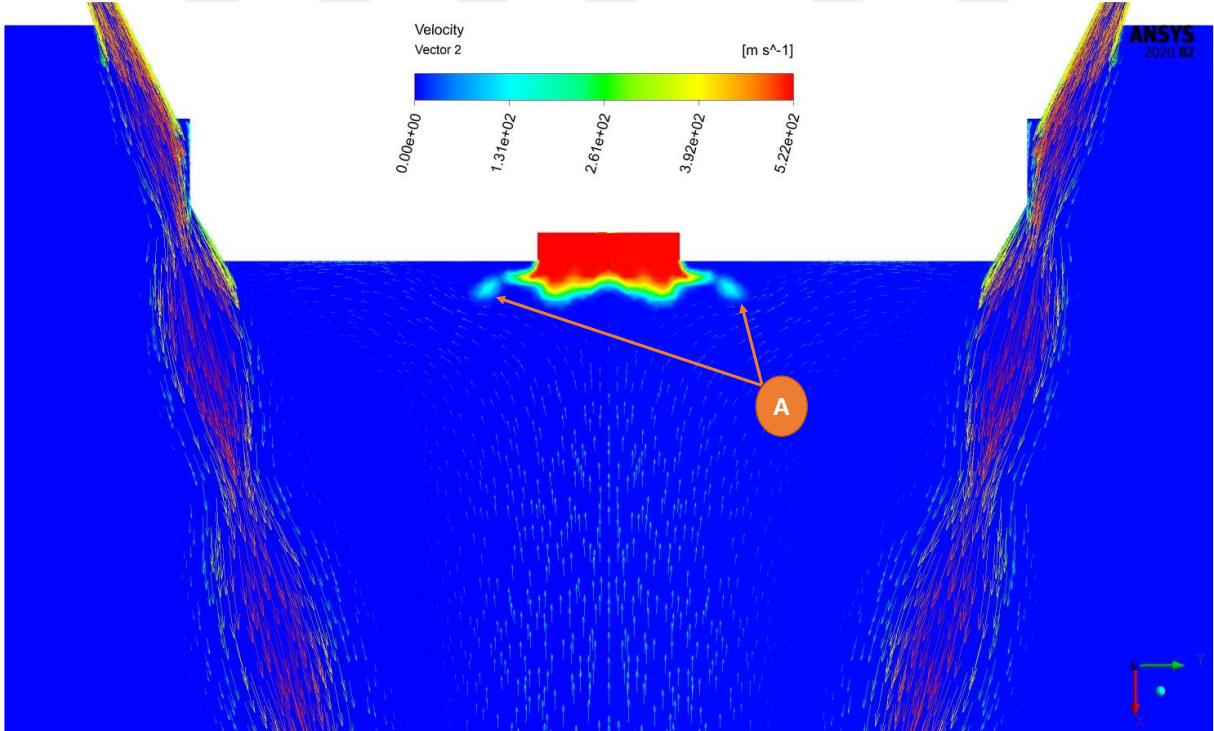
Şekil 4.28. 3,7 MPa argon giriş basıncında 1×10^{-4} saniyede gaz akış dinamiği



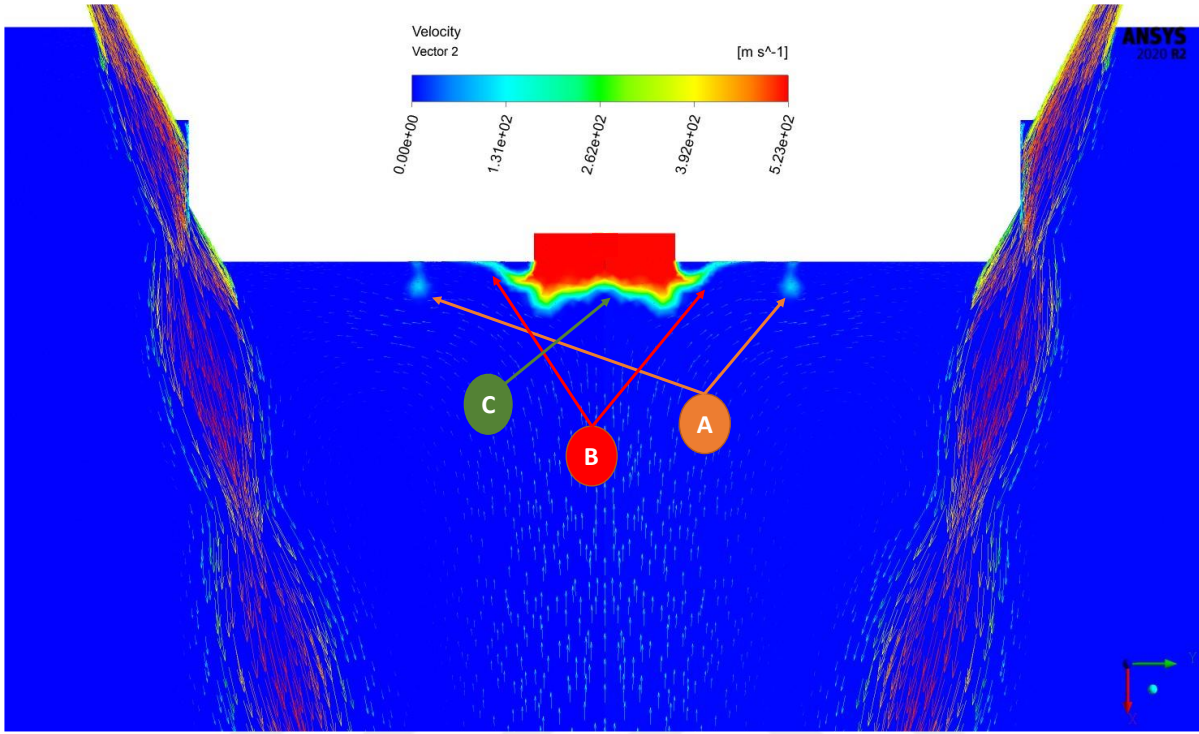
Şekil 4.29. 3,7 MPa argon giriş basıncında 1.3×10^{-4} saniyede gaz akış dinamiği

Şekil 4.30’da 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında $15e-4$ saniyede “A” bölgesinde turuncu oklarla gösterilen noktalar birincil atomizasyonda sıvı damlacıkların ilk oluştuğu anı temsil etmektedir. Bu işlemin devamında Şekil 4.30’da $15e-4$ saniyede “A” bölgesi olarak temsil edilen noktadaki parçalanmış damlacık, Şekil 4.31’de “A” bölgesi olarak tanımlanan damlacık ile aynıdır. Burada birincil atomizasyon işlemi sonucu parçalanmış damlacığın sirkülasyon bölgesinin etkisiyle gaz nozuluna doğru yöneldiğini görülmektedir.

Şekil 4.31’de “B” bölgesinde ilk parçalanma işlemi devamında ergiyik nozulun gaz akış nozuluna doğru yöneldiği, sıvı film ve ligament oluşumlarının gerçekleştiği gözlenmektedir. Bu durumda negatif basıncın hala etkisini koruduğu artan yüzey gerilimleri sonucunda parçalanma işleminin devam ettiği anlamına gelmektedir. Ayrıca benzer şekilde Şekil 4.31’de “C” noktasına bakıldığında merkez eksenindeki yüksek gaz akışı ve geri basınç sayesinde dökülen ergiyik iç bükey bir hal alıp yana doğru açılmaya başlamıştır.

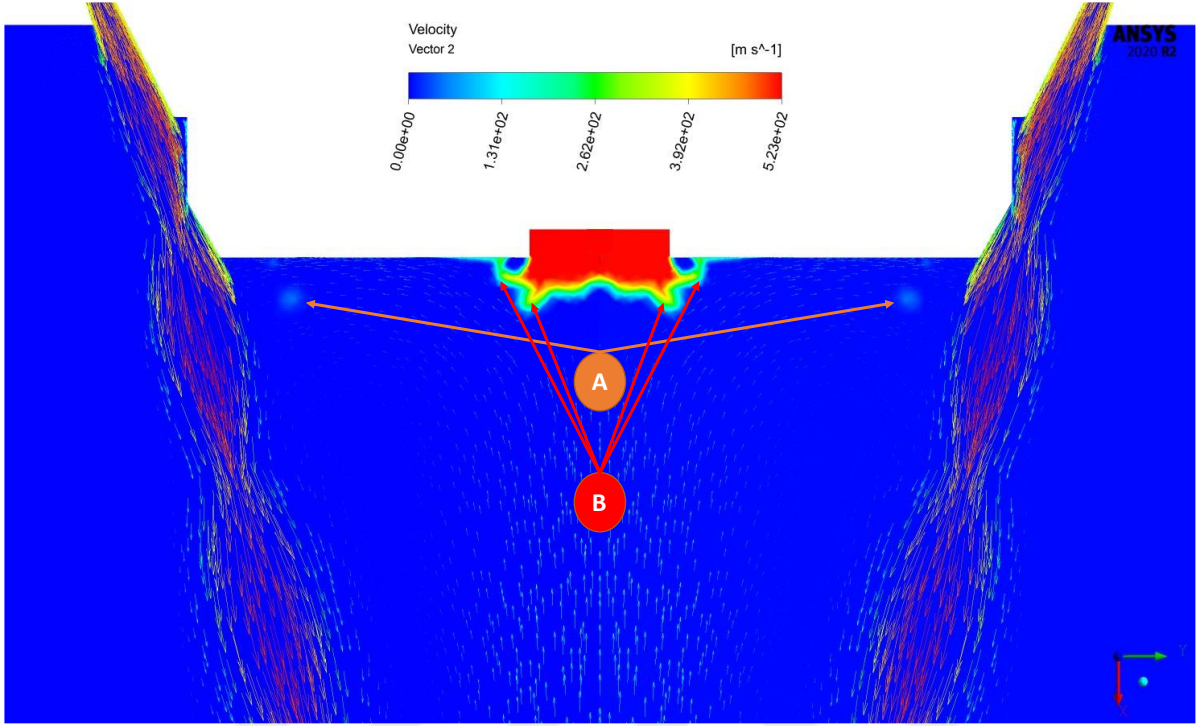


Şekil 4.30 3,7 MPa argon giriş basıncında $15e-4$ saniyede gaz akış dinamiği

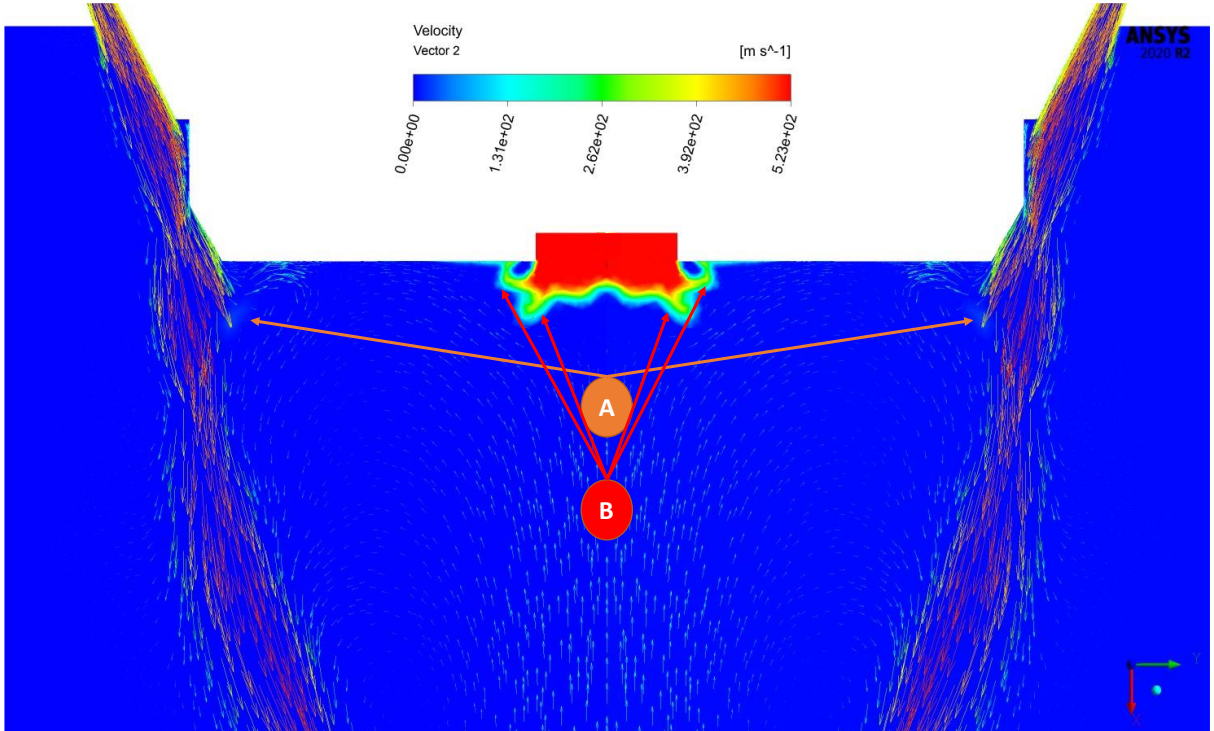


Şekil 4.31. 3,7 MPa argon giriş basıncında $17e-4$ saniyede gaz akış dinamiği

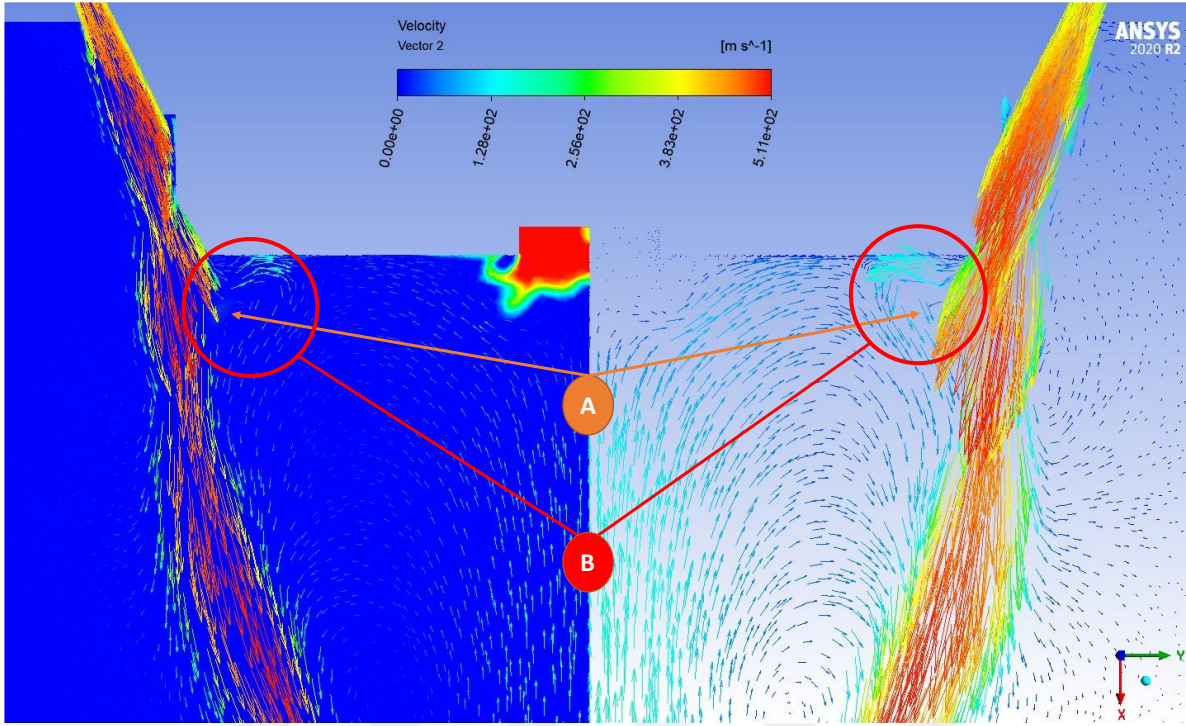
Şekil 4.32’de $19e-4$ saniyede “A” bölgesinde belirtilen birincil atomizasyon sonrası parçalanmış sıvı damlacık gaz akışına doğru sirkülasyon bölgesine doğru yönelmeye devam ettiği gözlenmektedir. Ayrıca Şekil 4.32’de “B” bölgesinde sıvı film oluşum kollarının artışı ve ligament oluşturmaya başladığı görülmektedir. Bu analizden $1e-4$ saniye sonra $2e-3$ saniyede parçalanmış damlacık ikincil atomizasyon işleminin başlayacağı için gaz akışın en yoğun olduğu bölgeye doğru yönelmiştir. Bu noktada gaz akışına çarptıktan sonra gaz akış dinamiğinin vektörel analizi Şekil 4.34’de gösterilmektedir. Şekil 4.34’de “A” bölgesinde gösterilen yüksek hızlı gaz akışına çarpan damlacık gaz akışında çarptığı bölgede “B” bölgesinde gösterildiği gibi geri yönde yani sirkülasyon bölgesinde ters yönde bir akışa sebep olmuştur.



Şekil 4.32. 3,7 MPa argon giriş basıncında 19e-4 saniyede gaz akış dinamiği

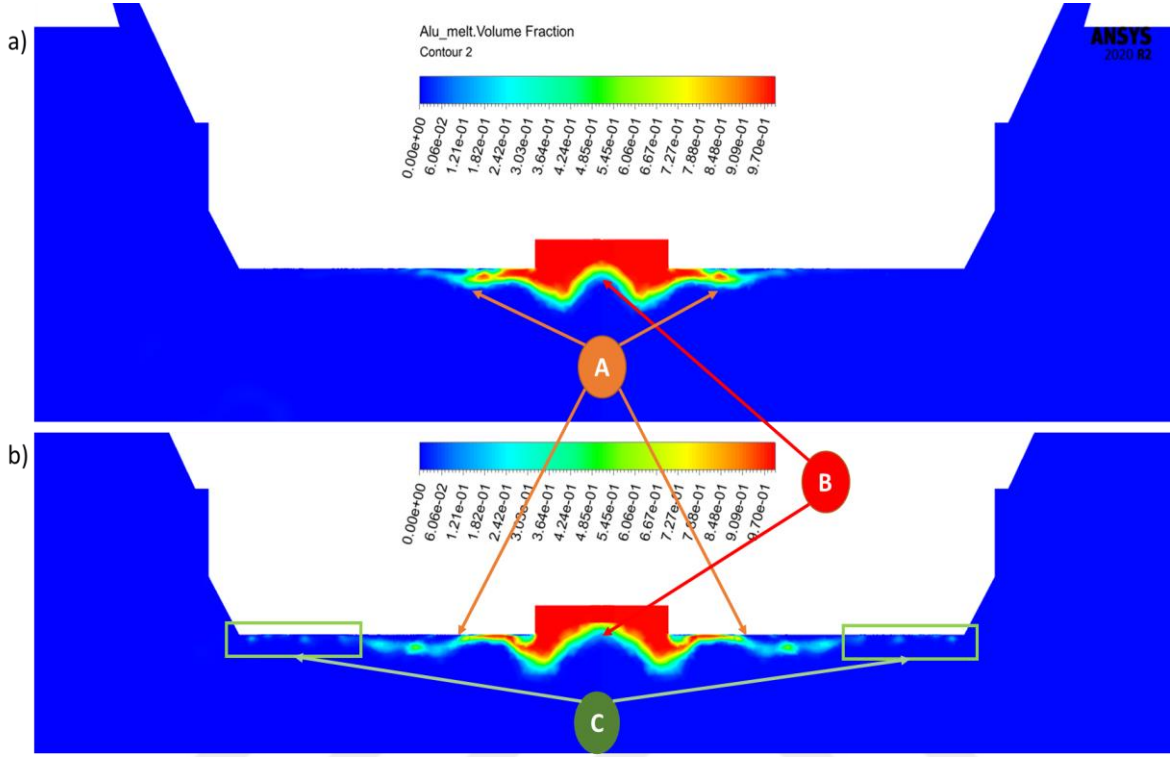


Şekil 4.33. 3,7 MPa argon giriş basıncında 2e-3 saniyede gaz akış dinamiği



Şekil 4.34. 3,7 MPa argon giriş basıncında $2e-3$ saniyede gaz akış vektörleri

Şekil 4.35(a)'da $2,2e-3$ saniye ve Şekil 4.35(b)'de $2,3e-3$ saniyede ergiyeğin birincil atomizasyonu için gerçekleştirilen analizin son adımları gösterilmektedir. Şekil 4.35'ten her iki zaman dilimi içinde "A" bölgesi sıvı filmin ve ligamentlerin oluşmaya devam ettiği bölgeleri temsil etmektedir. Şekil 4.35(a)'da artan yüzey gerilmeleri sonucu Şekil 4.35(b)'de "A" bölgesi olarak belirtilen kısımda belirgin bir şekilde birincil atomizasyon işleminin gerçekleştiği görülmektedir.



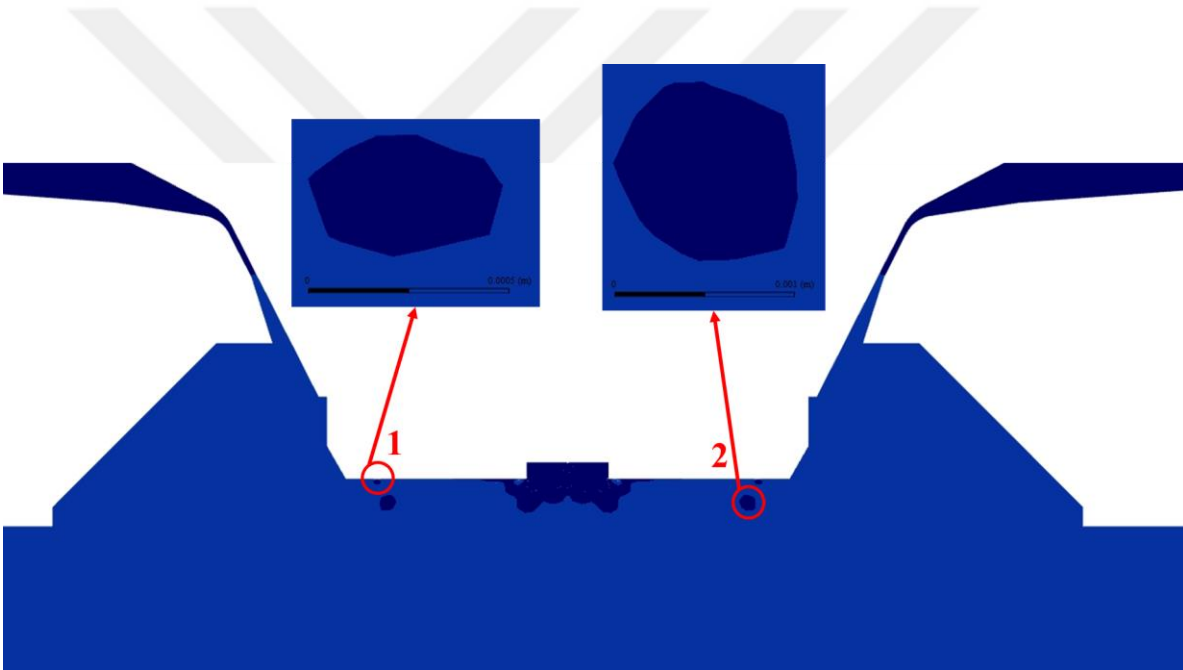
Şekil 4.35. 3,7 MPa argon giriş basıncında 2e-3 saniyede gaz akış vektörleri a) 2,2e-3 ve b) 2,3e-3

Sonuç olarak Şekil 4.34’te belirtilen ters akış oluşması durumundan sonra ise gaz akış analizi çarpan damlacıklar sonucunda dalgalanmaya sebep olacağından, bilgisayarda her iterasyon başına hesaplanacak veri miktarının daha çok arttığı görülmüştür. Şekil 4.33’te belirtilen 2e-3 saniyeden sonra, Şekil 4.35(a) ve Şekil 4.35(b)’de belirtilen 2,2e-3 ve 2,3e-3 için analiz adımları tamamlanmış ve birincil atomizasyon işlemi için analiz adımları sonlandırılmıştır. Bu sebeple bilgisayarda analizi gerçekleştirebilmek ve hesaplama yükünü azaltabilmek için Bölüm 4.3.3’te partikül konumlandırma ile ikincil atomizasyon işlemi detaylı olarak incelenecektir.

4.3.3. İki Fazlı Ergiyik Metal-Gaz Akışında İkincil Atomizasyonun Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi

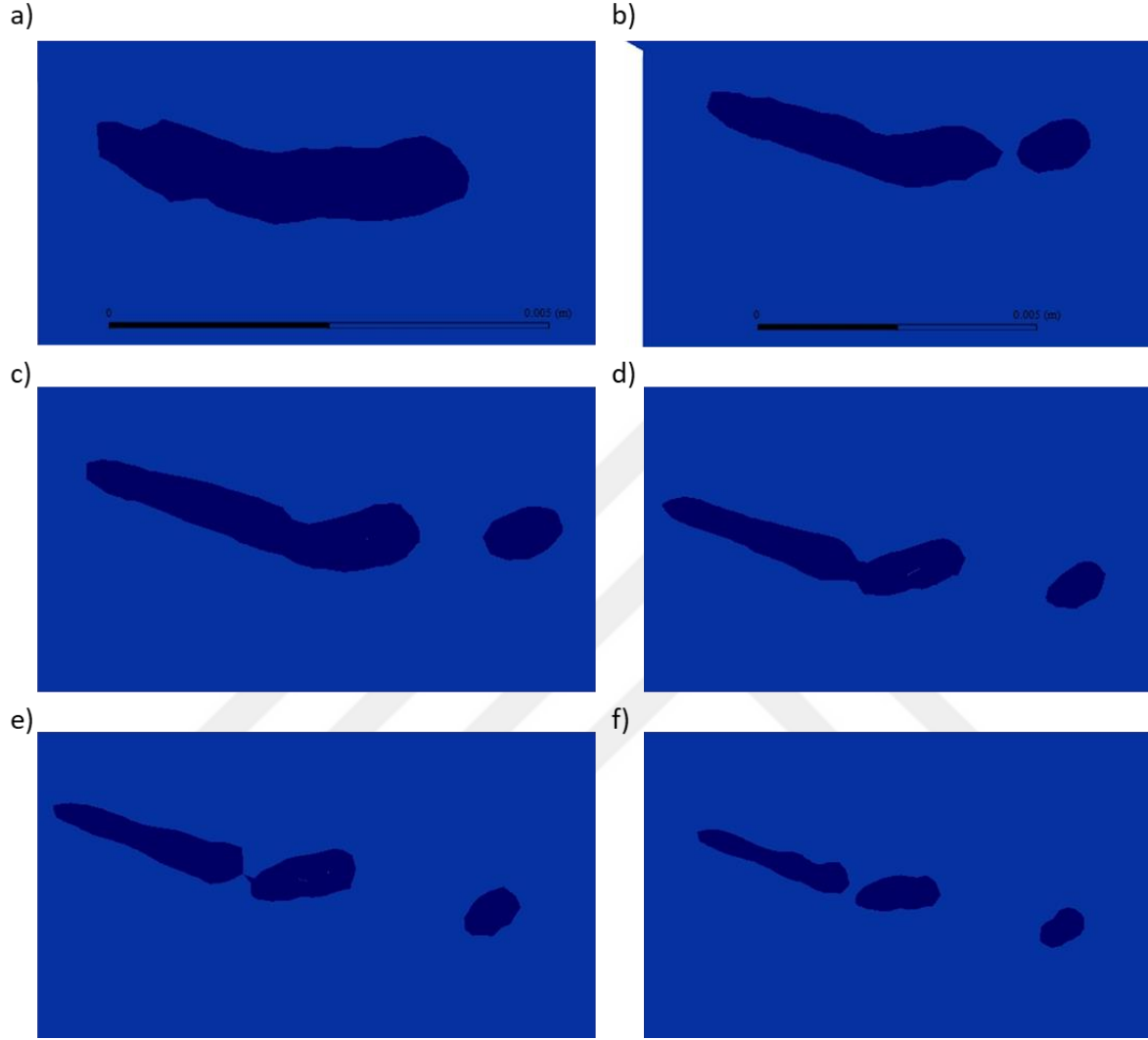
Yakından eşlemeli gaz atomizasyonda gaz akışı ve ergiyik metal arasındaki parçalanma mekanizmasını modellemek bilgisayar yükü oldukça fazla ve hesaplama süresi oldukça uzun bir işlemdir. Yüksek hızlı gaz akışı sonucunda oluşan ters akışlar ve parçalanma mekanizmasını analiz edebilmek için oldukça küçük zaman adımları kullanmak gereklidir. Bu sebeple tez

çalışmamızda gaz atomizasyon prosesi üç farklı adım ile gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.3.2’de gaz atomizasyonda birincil atomizasyon işlemi sonucunda elde edilen partiküller, ikincil atomizasyon işlemi için bu bölümde analiz edilecektir. Şekil 4.32’de belirtildiği gibi $19\text{e-}4$ saniyede gerçekleşen birincil atomizasyondan elde edilen partikül boyutları Şekil 4.36’da gösterilmiştir. “1” ile gösterilen bölgede elde edilen partikül boyutu yaklaşık $500\text{ }\mu\text{m}$ ve “2” ile gösterilen bölgede elde edilen partikül boyutu 1 mm şeklindedir. Çalışmanın üçüncü aşamasında ise ikincil atomizasyon işleminde, $500\text{ }\mu\text{m}$ çapa sahip partikülün parçalanma mekanizması incelenmiştir.



Şekil 4.36. 3,7 MPa argon giriş basıncında $19\text{e-}4$ saniyede elde edilen partikül boyutları

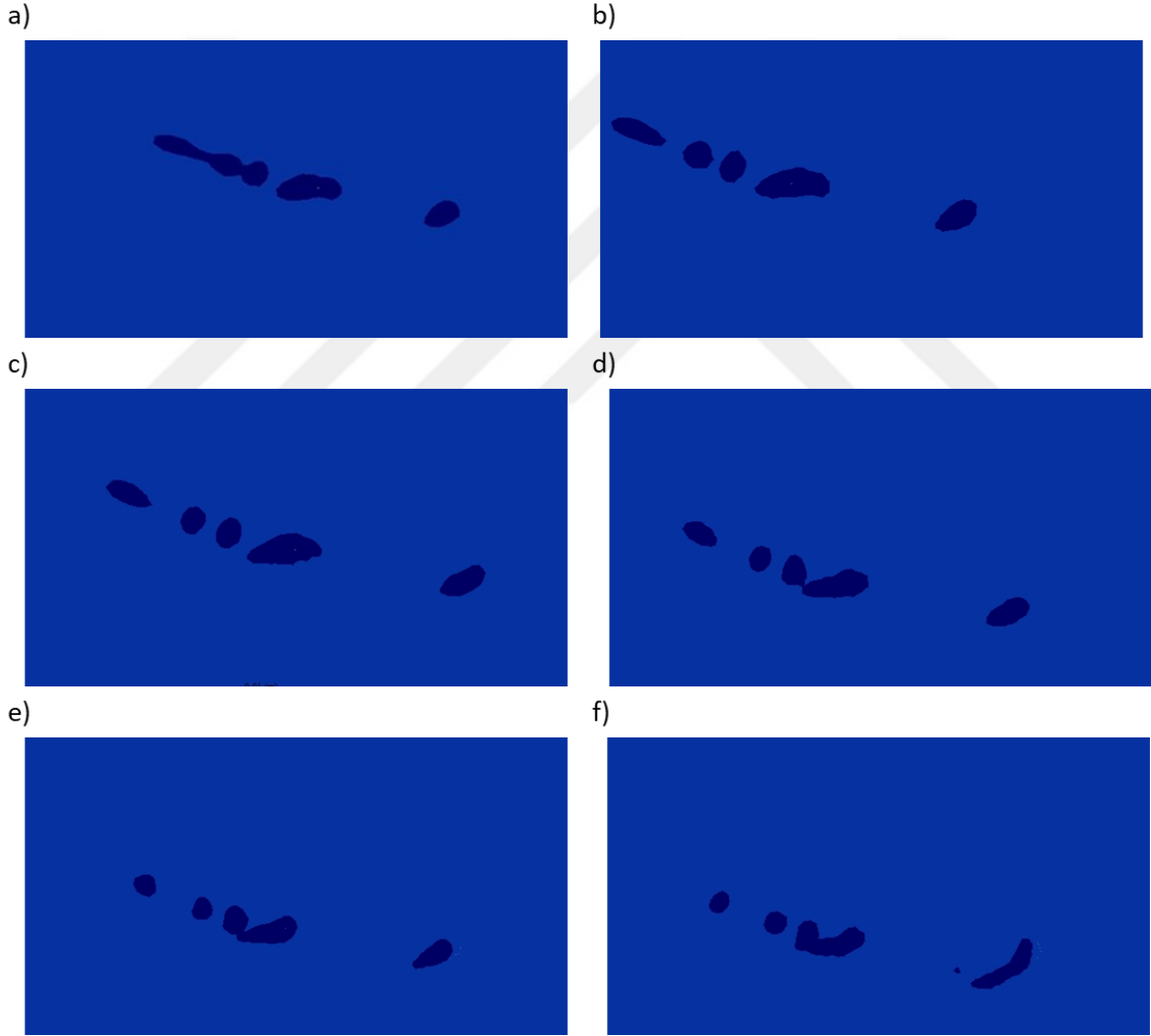
İlk olarak analizde gazın kararlı hale geçebilmesi için akış zamandan bağımsız olarak çalıştırılmış ve 3,7 MPa gaz giriş basıncında Şekil 4.24’te görülen gaz akış dinamiği elde edilmiştir. Bu noktadan sonra ise parçalanma mekanizması için Şekil 4.36’da “1” bölgesinde birincil atomizasyon işleminden elde edilen $500\text{ }\mu\text{m}$ çapa sahip partikül, aynı konumda tekrardan konumlandırılıp ikincil atomizasyon işleminde parçalanma mekanizması incelenmiştir. Şekil 4.37’de 500 mikron partikülün ikincil atomizasyon işleminde 5,01-5,06 ms için başlangıç adımları gösterilmiştir.



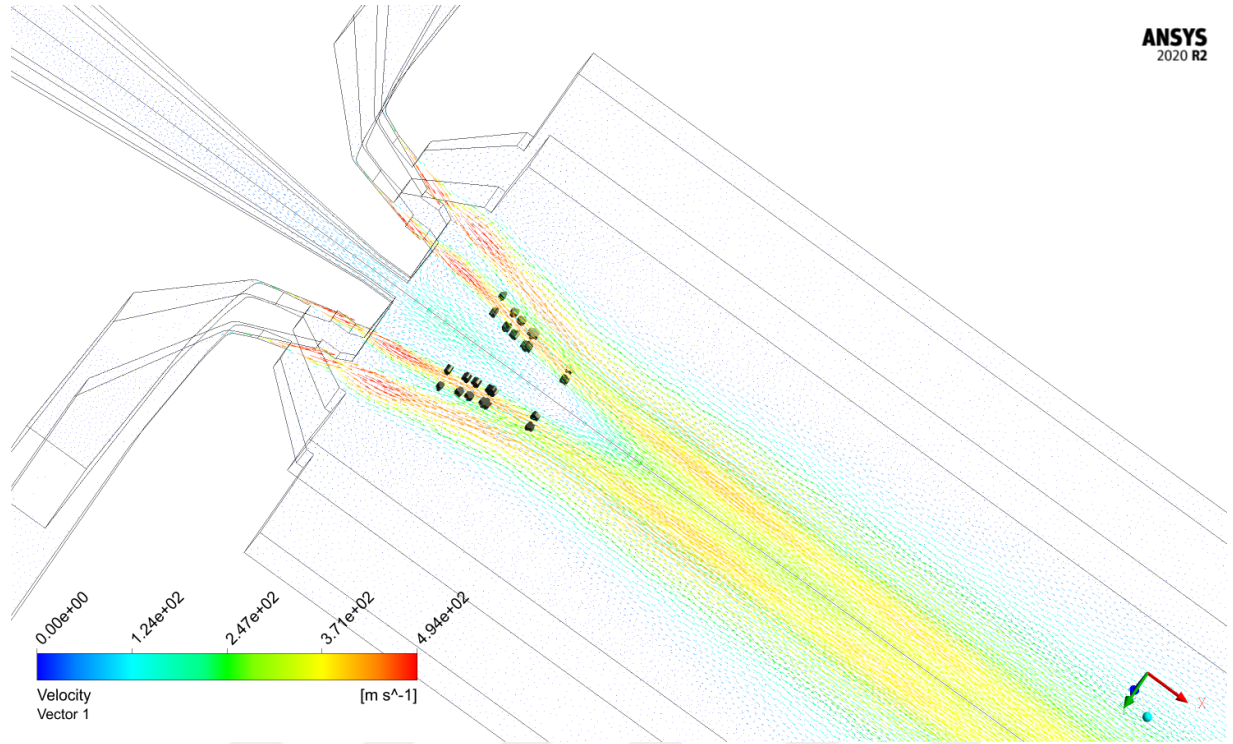
Şekil 4.37. İkincil atomizasyon analiz adımları sırasıyla a) 5,01 ms, b) 5,02 ms, c) 5,03 ms, d) 5,04 ms, e) 5,05 ms, f) 5,06 ms

Şekil 4.37 (a)'da 5,01 ms 500 mikron çapa sahip partikül, gaz akışı ile ilk kez etkileşime geçtiği an görülmektedir. 5,01 ms'de Şekil 2.43'te Dopler'in [49] çalışmasında gösterilen parçalanma mekanizması şematüğünde ligament oluşum sürecinin son aşaması görülmektedir. Bu noktadan sonra damlacık oluşumu için ilk aşama gerçekleşecek ve Şekil 4.37 (b)'de 5,02 ms'de ikincil atomizasyon işlemi başlayacaktır. Şekil 2.44'te Savart'ın [65] çalışmasında "a" noktasında önce gerçekleşen uzun boyun oluşumunun ilk aşaması 5,03 ve 5,04 ms'de sırasıyla Şekil 4.37 (c) ve (d)'de gösterilmiştir. Ardından Savart'ın [65] çalışmasına benzer şekilde "a" noktasından sonra ise damlacık oluşumu 5,05 ms ve 5,06 ms sırasıyla Şekil 4.37 (e) ve (f)'de gösterilmiştir.

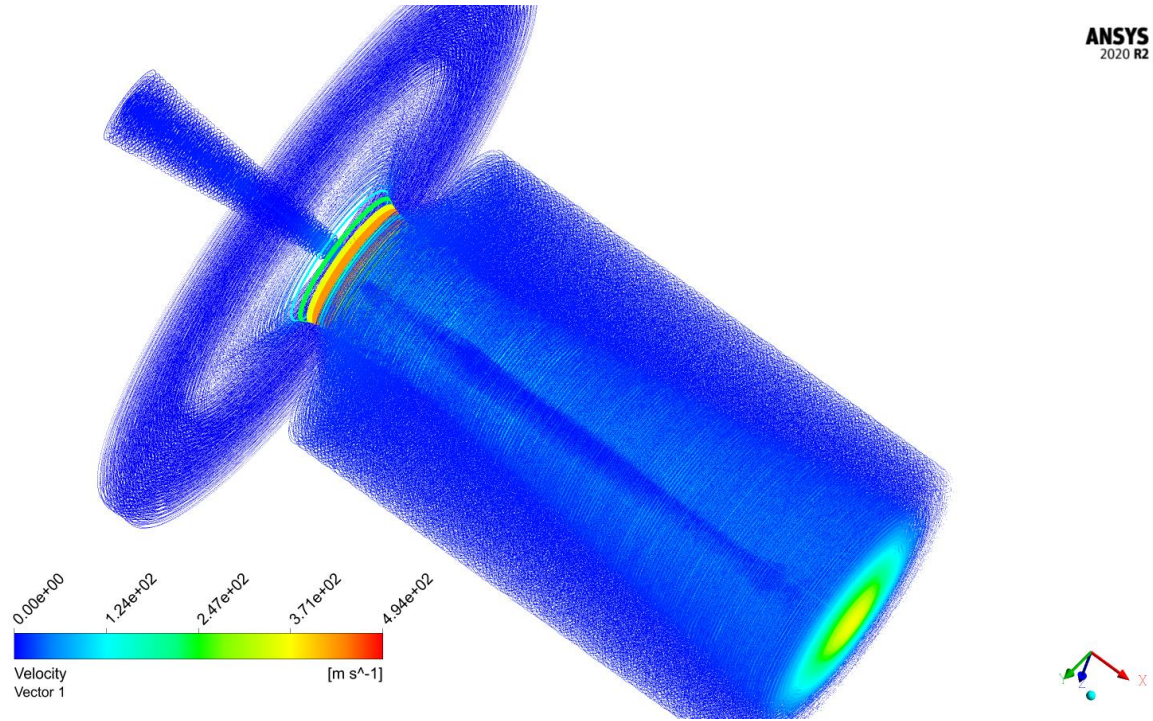
Şekil 4.38 (a)'da 5,07 ms'de ise artan yüzey gerilimlerinin etkisiyle iki adet boyun oluşumu daha gerçekleşmiş ve bunun sonucunda Şekil 4.38 (b) ve (c)'de iki adet damlacık oluşumu daha gerçekleşmiştir. 4.38 (d) ve (e) görsellerinde ise damlacıkların tekrar birleşmesi adımları görülmekte, bu da üretimde uydulaşma sorununa yol açabilecektir. 5,09 ms'de atomizasyon hattı boyunca oluşan damlacıklar Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta gaz atomizasyonda gaz akış dinamiğinin 3 boyutlu görünümü gösterilmiştir.



Şekil 4.38. İkincil atomizasyon analiz adımları sırasıyla a) 5,07 ms, b) 5,08 ms, c) 5,09 ms, d) 5,10 ms, e) 5,11 ms, f) 5,12 ms

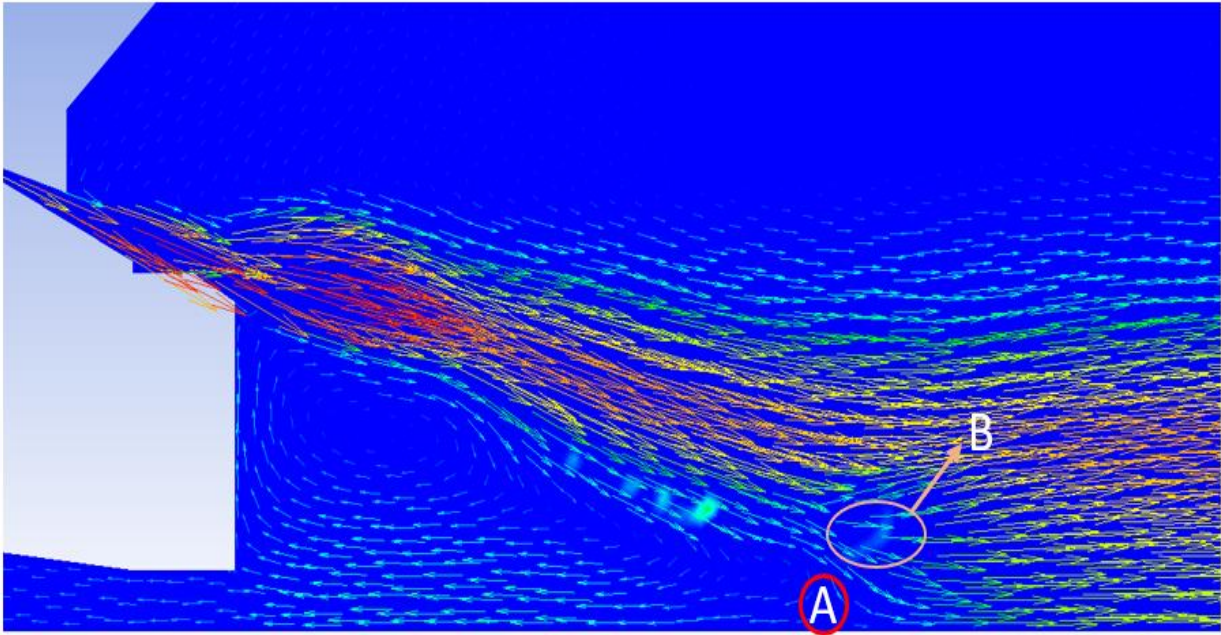


Şekil 4.39. 5,09 ms’de gaz atomizasyon hattı boyunca ikincil atomizasyon analiz sonuçları



Şekil 4.40. 5,09 ms’de gaz akış dinamiği

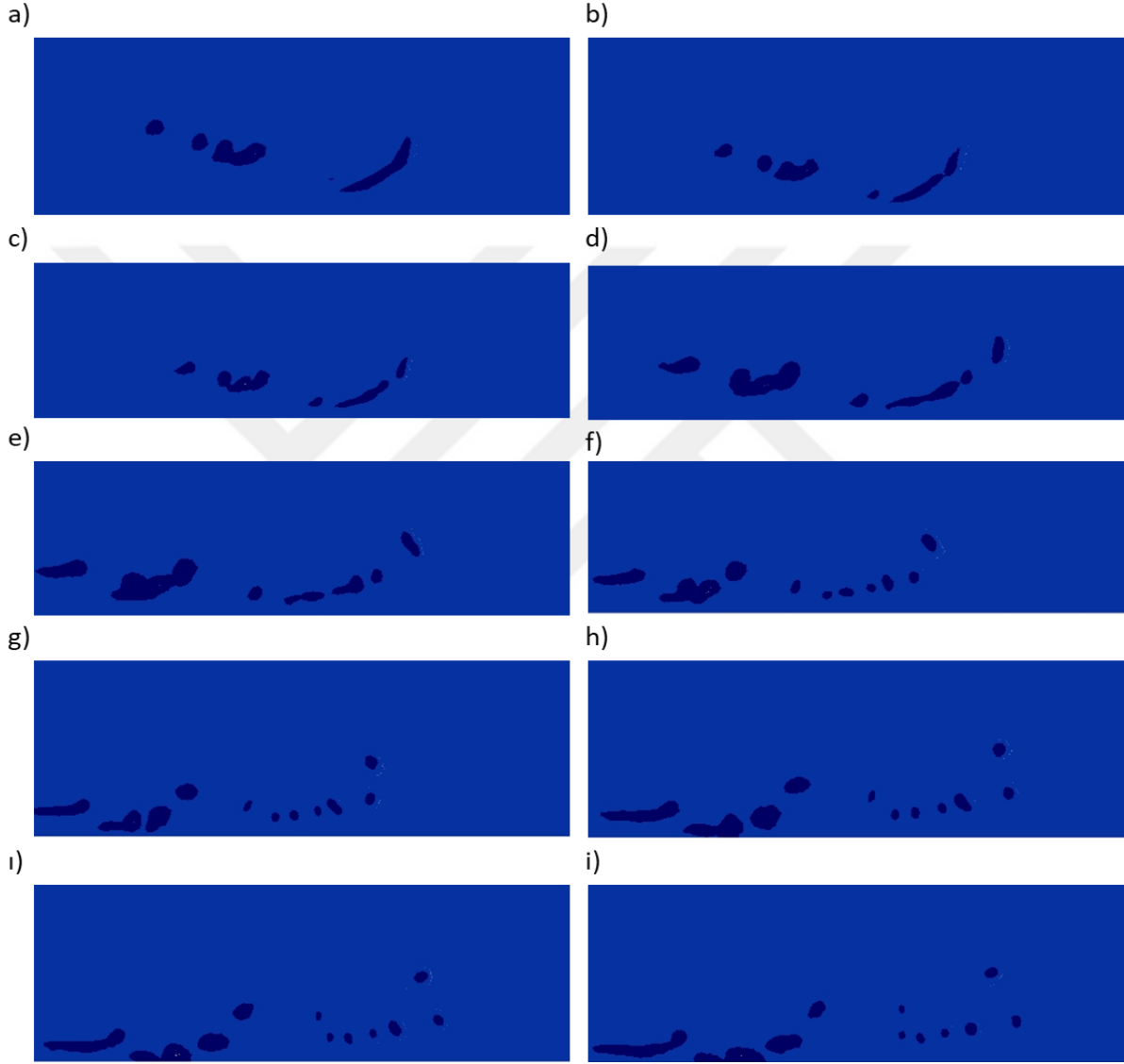
Şekil 4.38 (f)'de 5,12 ms'de gaz atomizasyon damlacıklarının birleşimi görülmekte ve bu durumun gaz akış dinamiği Şekil 4.41'de gösterilmiştir. "A" bölgesi olarak belirtilen durma noktasına yaklaştıkça gaz akış hızı azalacağından bu noktaya yaklaştıkça damlacıkların hızı yavaşlamış ve birbirlerine yapışma durumu ortaya çıkmıştır. "B" bölgesi olarak belirtilen kısımda ise, Şekil 4.37 (b)'de 5,02 ms'de parçalananan damlacığın durma noktasını geçtikten sonra tekrar ligament şeklini alıp uzadığı görülmüştür. Bunun sebebi durma noktasını geçtikten sonra gaz vektörlerinin yayılma açısının artışı olarak görülmektedir. Gaz akış vektörleri durma noktası olan "A" bölgesine kadar yaklaşık olarak aynı doğrultuda ilerken, durma noktasına geçtikten sonra daha fazla yayılmaları Şekil 4.38 (f) ve Şekil 4.41'de "B" bölgesinde görüldüğü üzere damlacıkların yeniden uzayıp çubuksu geometriyi almalarına sebep olmuştur.



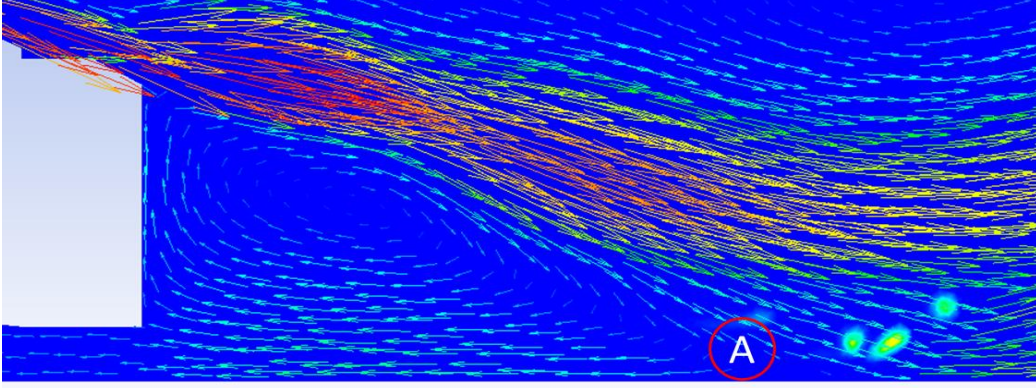
Şekil 4.41. İkincil atomizasyonda 5,12 ms'de gaz akış dinamiği analizi

5.12 ms'de Şekil 4.41'de "A" durma noktasında başlayan damlacıkların yapışma durumu 5,13; 5,14; 5,15 ve 5,16 ms'de sırasıyla Şekil 4.42 (a), (b), (c) ve (d)'de görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 4.41'de "B" bölgesinde belirtilen çubuksu geometriye sahip damlacık oluşumunun parçalanmaya ve daha küçük damlacıklara ayrıştığı Şekil 4.42'nin her aşamasında görülmektedir. Şekil 4.42 (e)'de 5,17 ms'ye kadar damlacıkların yapışması devam etmekte, Şekil 4.42 (f)'de 5,18 ms'de ise durma noktasını geçtikten sonra yapışan damlacıklar tekrar

parçalanmaya başlamıştır. 5,18 ms'de gaz akış dinamiği ve parçalanma mekanizması Şekil 4.43'te görülmektedir.

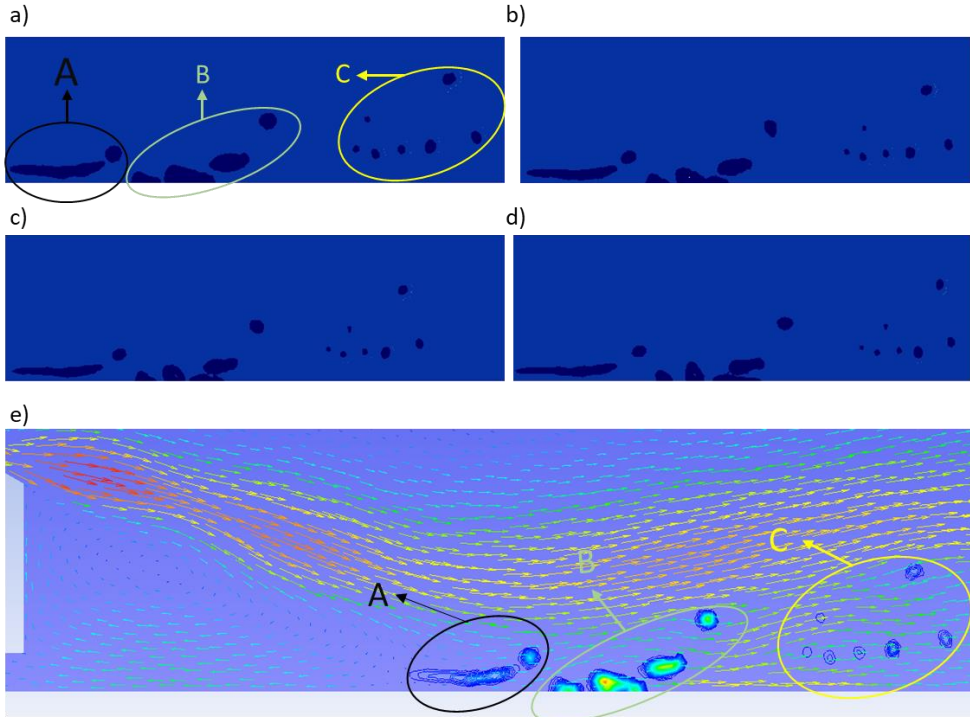


Şekil 4.42. İkincil atomizasyon analiz adımları sırasıyla a) 5,13 ms; b) 5,14 ms; c) 5,15 ms; d) 5,16 ms; e) 5,17 ms; f) 5,18 ms; g) 5,19 ms; h) 5,20 ms; ı) 5,21 ms ve i) 5,22 ms



Şekil 4.43. İkincil atomizasyonda 5,18 ms'de gaz akış dinamiği analizi

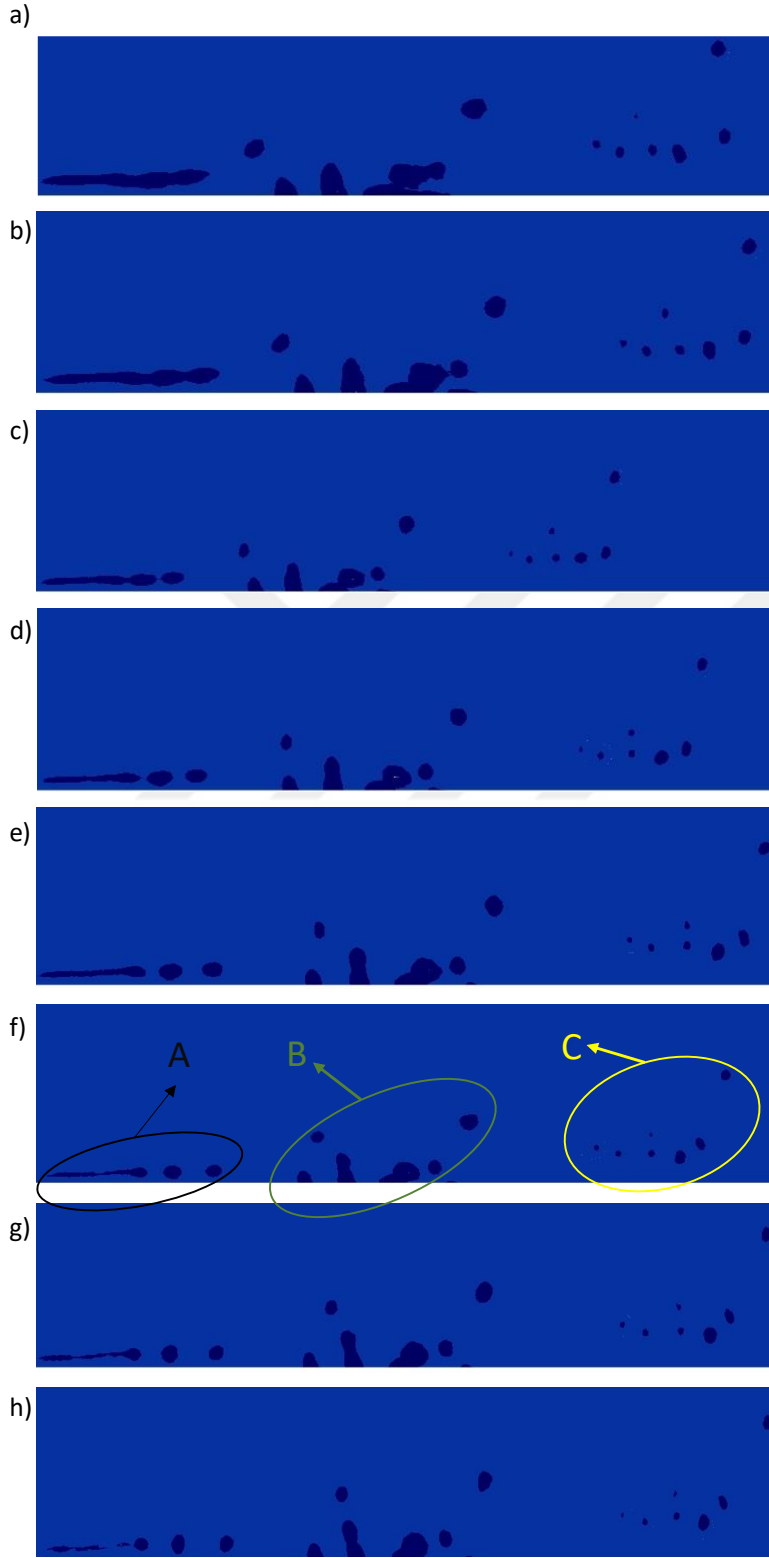
Şekil 4.44 (a) ve (e)'de 5.23 ms'de parçalanma mekanizması ve gaz akış dinamiği gösterilmiştir. Parçalanma mekanizması bundan önceki adımlarda da görüldüğü gibi "A" noktası olarak belirtilen durma noktasına geldiği zaman, vektörlerin yayılma açısı genişleyeceğinden çubuksu bir geometri almıştır. Durma noktasından sonra ise belirtilen "B" noktasında damlacıklar daha büyük halde parçalanmaya devam etmiştir. Son bölge olan "C" noktasında ise daha küçük partikül çapına sahip damlacıklar oluştuğu gözlenmiştir.



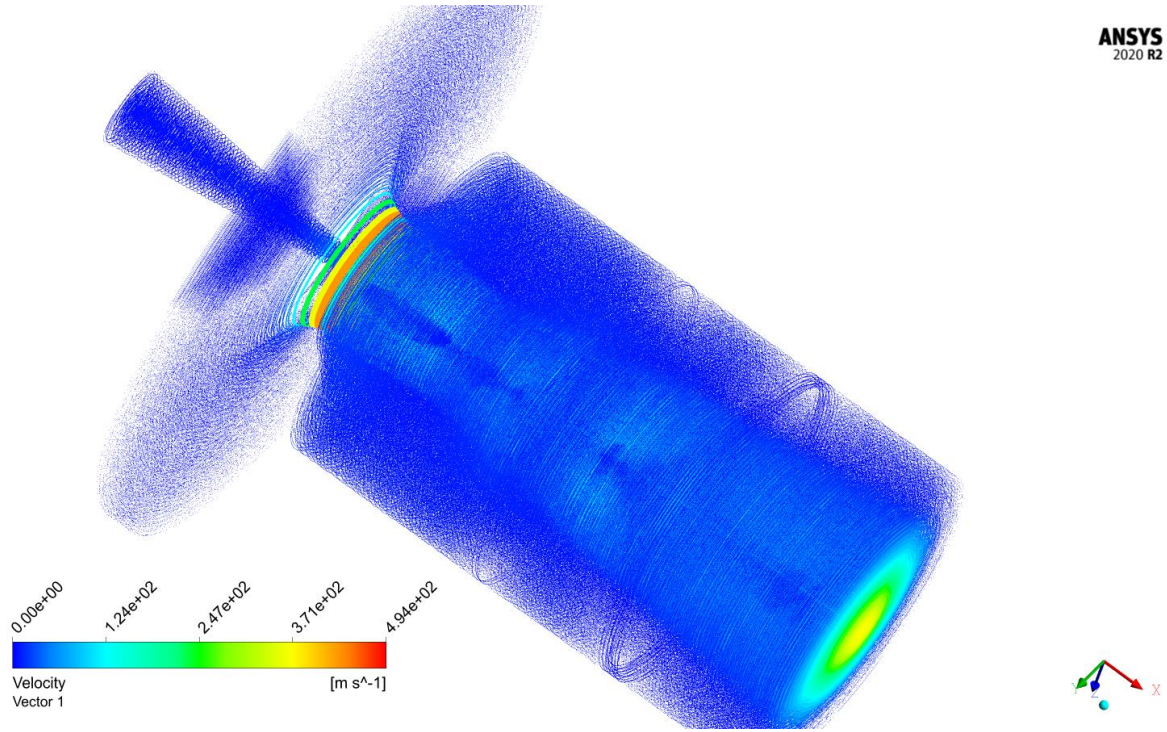
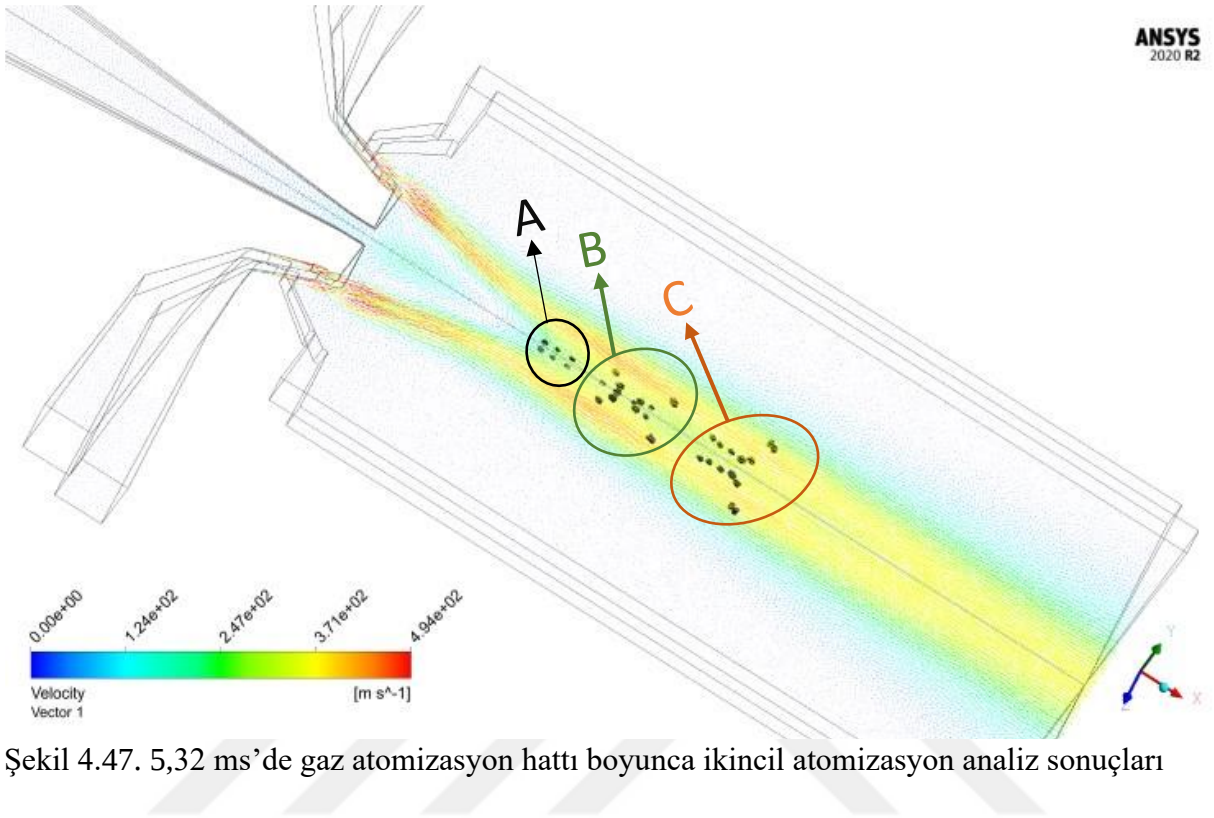
Şekil 4.44. İkincil atomizasyon analiz adımları sırasıyla a) 5,23 ms; b) 5,24 ms; c) 5,25 ms ve d) 5,26 ms; e) 5,23 ms'de gaz akış dinamiği

Şekil 4.44'te 5,23 ve 5,26 ms'de görülen parçalanma mekanizmasının devamı olan, Şekil 4.45'te 5,27 ve 5,34 ms arasında benzer parçalanma olduğu görülmüştür. Şekil 4.46'da 5,32 ms için gösterilen vektörel gaz akış dinamiği, Şekil 4.45 (f)'ye karşılık gelmektedir. "A" bölgesinde damlacıklar durma noktasına yaklaştıkça çubuksu geometri şeklini alacak ve bu noktada tekrar parçalanma görülmüştür. Bu noktadan sonra "B" bölgesinde vektörlerin yayılma açısı genişleyeceğinden partiküllerin yönü değişecek ve bu noktadan sonra parçalanma işlemi devam edecektir. "C" bölgesinde ise daha önceden "A" bölgesinde bulunan parçacıklar tekrar parçalandığı ve gaz akışının etkisiyle "B" bölgesinde yöneldiği görülmüştür. Son olarak "A" ve "B" bölgelerinden geçen damlacıkların "C" bölgesinde en küçük partikül boyutuna sahip olduğu görülmüştür.

Şekil 2.47 incelendiğinde [64], Şekil 4.46'da görülen parçalanma şeklinin, katastrofik parçalanma modeline benzer bir morfolojide olduğu görülmüştür. Felaket parçalanma modelinde "A" bölgesinde görüldüğü üzere uzun genlikte çubuksu yapılar oluşması, ardından bunu takiben "B" bölgesinde daha büyük damlacıklara ayrışma görülmüştür. "C" bölgesinde ise katastrofik parçalanmanın son aşaması olan daha küçük partiküller görülmektedir.



Şekil 4.45. İkincil atomizasyon analiz adımları sırasıyla a) 5,27 ms; b) 5,28 ms; c) 5,29 ms; d) 5,30 ms; e) 5,31 ms; f) 5,32 ms; g) 5,33 ms; h) 5,34 ms



5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Gaz atomizasyonda parçalanma mekanizmasını incelemek için geliştirilen model üç farklı aşamada analiz edilmiştir. İlk aşamada 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa argon gaz giriş basıncında gaz akış dinamiği analiz edilmiştir. 2,5 ve 3 MPa'da gaz akış ayrımı oluşurken, 3,5 ve 3,7 MPa'da gaz akış ayrımının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarında farklı giriş basınçlarına rağmen, nozul içerisinde maksimum hızların yaklaşık olarak aynı olduğu tespit edilmiştir. Ancak üç farklı Hat 1, Hat 2 ve Hat 3 boyunca alınan veriler incelendiğinde gaz basıncı artıkça, gazın kinetik enerjisini koruyabilme kapasitesinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca artan gaz giriş basıncı, çevreleyen ortam basıncından ne kadar fazla ise bu duruma bağlı olarak gelişen şok dalgaları ve Prandtl-Meyer genişleme dalgalarının o kadar az olduğu görülmüştür. Giriş basınçları karşılaştırıldığında atomizasyon işlemi boyunca en yüksek kinetik enerjiye sahip giriş basıncının 3,7 MPa olduğu tespit edilmiştir. Buradan elde edilen analizler ile iki fazlı gaz-ergiyik etkileşimini içeren modele geçilmiştir.

İki fazlı gaz-ergiyik içeren modelde 3,7 MPa argon gaz giriş basıncı ile ergiyik etkileşimi 0 ve 2,3e-3 saniye arasında analiz edilmiştir. 11e-4 saniyede negatif basınç etkisiyle sıvı metalde dalgalanma oluşmaya başladığı ve 13e-4 saniyede sıvı filmlerin ortaya çıktığı görülmüştür. Ardından yüksek kinetik enerji sayesinde artan yüzey gerilimleri sonucunda, 15e-4 saniyede ilk kez partikül oluşumunun gözlemlendiği birincil atomizasyon işlemi görülmüştür. Bu durumdan itibaren sıvı film ve ligament oluşumları devam etmiş ancak 2e-3 saniye parçalanmış partikülün gaz akışına çarpması sonucunda geri akışlar oldukça artmıştır. Bu durumdan dolayı geri akışları hesaplayabilmek için bilgisayar hesaplama yükü fazlasıyla arttığından, analiz 2,3e-3 saniyede tamamlanmıştır. Buradan elde edilen partikül boyutları hem bilgisayar hesaplama yükünü azaltmak hem de analizi daha hızlı çözebilmek için geliştirilen başka bir model ile ikincil atomizasyon analiz işlemlerine geçilmiştir.

İkincil atomizasyon ise partikül konumlandırma yöntemiyle Euler-Euler yaklaşımını kullanan sıvıların hacmi yöntemiyle analiz edilmiştir. Birincil atomizasyonda 19e-4 saniyede elde edilen 500 µm çapa sahip partikülün, ikincil parçalanma mekanizması incelenmiştir. Dopler'in çalışmasında [49] belirtildiği üzere ligament oluşumunun son aşaması, tez çalışmasında 5,01

ms ve 5,02 ms’de ikincil atomizasyon işleminin başlangıç aşamalarında görülmektedir. Bunun devamında Savart’ın çalışmasında ise “a” noktasından önce belirtildiği damlacık oluşumundan önceki uzun boyun oluşumu 5,03 ve 5,04 ms’de, “a” noktasından sonraki damlacık parçalanma aşamaları ise 5,05 ve 5,06 ms görülmüştür. Bu sayede ikincil atomizasyon işleminde parçalanma adımlarının literatürle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

5,10 ve 5,11 ms’de elde edilen analiz görüntülerinde damlacıkların durma noktasına yaklaştıkça birbirlerine yapıştığı görülmüştür. Bu noktada oluşabilecek olan uydulaşma sorunlarının önüne geçebilmek için sirkülasyon bölgesinin alanının doğru hesaplanması gerekmektedir. Çünkü küçük boyutlara sahip damlacıklar, büyük boyutlara sahip damlacıklardan daha hızlı katılaşacağından bu noktadan itibaren uydulaşma görülebilme ihtimali artmaktadır. Bu zaman adımıdan sonraki adımlar incelendiğinde ise Newton’un elde ettiği katastrofik parçalanma morfolojisine benzer parçalanma morfolojisi 5,32 ms’de görülmektedir. Ayrıca 5,32 ms’de damlacıklar gaz akışının etkisiyle eksen hattından dışarı doğru savrulduğu görülmüştür. Bu durumun benzerini Kaiser vd. [14] çalışmasında belirtmiştir. Bu sayede parçalanma mekanizmasının literatürle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sayesinde olası uydulaşma başlangıç noktası tespit edilebilecek ve parametrelerde değişim yapılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilebilecektir.

Tez çalışmasında, gaz atomizasyonda birincil ve ikincil atomizasyon mekanizması iki fazlı gaz-ergiyik metal etkileşimi HAD yardımıyla modellenmiştir. Bu kapsamda tek fazlı akışlarda 2,5; 3; 3,5 ve 3,7 MPa’da gaz akış dinamiği incelenmiş olup mach diskleri, türbülans katmanı, Prandtl-Meyer dalgaları, sirkülasyon bölgesi ve durma noktası bölgeleri gösterilmiştir. İki fazlı akışlarda ise 3,7 MPa’da birincil atomizasyonda parçalanma mekanizması analizleri gerçekleştirilmiş ve parçalanma adımları hat boyunca analiz edilmiştir. Bu analizler sayesinde elde edilen 500 μ m çapa sahip partikülde ikincil atomizasyon aşamaları incelenmiş ve parçalanma morfolojisinin literatürle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Gaz atomizasyonda gerçekleştirilen deneyler yüksek maliyetlerde olduğu için, tez çalışması sayesinde geliştirilen simülasyon ile optimizasyon yapılabilecektir.

KAYNAKLAR

1. German, R.M., *Powder metallurgy science*. Metal Powder Industries Federation, 105 College Rd. E, Princeton, N. J. 08540, U. S. A, 1984. 279, 1984.
2. Hohmann, M., et al., *Modern Systems for Ceramic-Free Powder Production*. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials--1992., 1992. **1**: p. 27-39.
3. Mais, B. and G.A. Mowbray, *UMT promises tight control of particle size*. Metal Powder Report, 1998. **53**(11): p. 30-33.
4. Gutmanas, E.Y., *Materials with fine microstructures by advanced powder metallurgy*. Progress in Materials Science, 1990. **34**(4): p. 261-366.
5. Angelo, P. and R. Subramanian, *Powder metallurgy: science, technology and applications*. 2008: PHI Learning Pvt. Ltd.
6. Motaman, S., et al., *Numerical and experimental investigations of the effect of melt delivery nozzle design on the open-to closed-wake transition in closed-coupled gas atomization*. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015. **46**(4): p. 1990-2004.
7. Poquillon, D., et al., *Cold compaction of iron powders—relations between powder morphology and mechanical properties: Part I: Powder preparation and compaction*. Powder Technology, 2002. **126**(1): p. 65-74.
8. Klar, E., *Powder metallurgy: applications, advantages, and limitations*. 1983.
9. Lawley, A., *Atomization: the production of metal powders*. Metal Powder Industries Federation, 1105 College Rd. East, Princeton, New Jersey 08540-6692, USA, 1992. 159, 1992.
10. Hanthanan Arachchilage, K., *Multiphase Flow Modeling of Molten Metal Atomization at High Gas Pressure*. 2019.
11. Lawley, A., *Preparation of metal powders*. Annual Review of Materials Science, 1978. **8**(1): p. 49-71.
12. Firmansyah, D.A., et al., *Numerical simulations of supersonic gas atomization of liquid metal droplets*. Japanese Journal of Applied Physics, 2014. **53**(5S3): p. 05HA09.
13. Mates, S.P. and G.S. Settles, *A study of liquid metal atomization using close-coupled nozzles, part 2: atomization behavior*. Atomization and Sprays, 2005. **15**(1).
14. Kaiser, R., et al., *A numerical simulation study of the path-resolved breakup behaviors of molten metal in high-pressure gas atomization: With emphasis on the role of shock waves in the gas/molten metal interaction*. Advanced Powder Technology, 2018. **29**(3): p. 623-630.
15. Mates, S.P. and G.S. Settles, *A study of liquid metal atomization using close-coupled nozzles, Part 1: Gas dynamic behavior*. Atomization and Sprays, 2005. **15**(1).
16. Shinjo, J. and A. Umemura, *Simulation of liquid jet primary breakup: Dynamics of ligament and droplet formation*. International Journal of Multiphase Flow, 2010. **36**(7): p. 513-532.
17. Shinjo, J. and A. Umemura, *Detailed simulation of primary atomization mechanisms in diesel jet sprays (isolated identification of liquid jet tip effects)*. Proceedings of the Combustion Institute, 2011. **33**(2): p. 2089-2097.
18. Shinjo, J. and A. Umemura, *Surface instability and primary atomization characteristics of straight liquid jet sprays*. International Journal of Multiphase Flow, 2011. **37**(10): p. 1294-1304.

19. Umemura, A. and Y. Wakashima, *Atomization regimes of a round liquid jet with near-critical mixing surface at high pressure*. Proceedings of the combustion institute, 2002. **29**(1): p. 633-640.
20. Zeoli, N. and S. Gu, *Computational validation of an isentropic plug nozzle design for gas atomisation*. Computational Materials Science, 2008. **42**(2): p. 245-258.
21. Motaman, S., et al. *Use of computational modelling for investigation the Effect of melt delivery nozzle tip length on gas flow separation in supersonic gas atomization*. in *ICLASS; 12th Triennial international conference on liquid atomization and spray systems, Heidelberg, Germany*. 2012.
22. Zeoli, N. and S. Gu, *Numerical modelling of droplet break-up for gas atomisation*. Computational Materials Science, 2006. **38**(2): p. 282-292.
23. Mullis, A.M., A.P. Ashok Kumar, and D.J. Borman. *Cfd modelling of high pressure gas atomization of liquid metals*. in *TMS Annual Meeting & Exhibition*. 2018. Springer.
24. Allimant, A., et al., *Progress in gas atomization of liquid metals by means of a De Laval nozzle*. Powder Technology, 2009. **190**(1-2): p. 79-83.
25. Kamalasekaran, A., *Numerical and experimental investigations of gas jet used in atomisation of metal powders*. 2020.
26. Michaelides, E., C.T. Crowe, and J.D. Schwarzkopf, *Multiphase flow handbook*. 2016: CRC Press.
27. Fritsching, U. and V. Uhlenwinkel, *Hybrid gas atomization for powder production*. Powder Metallurgy, 2012: p. 99-124.
28. Zeoli, N., H. Tabbara, and S. Gu, *CFD modeling of primary breakup during metal powder atomization*. Chemical engineering science, 2011. **66**(24): p. 6498-6504.
29. Strauss, J., *Lick back in close-coupled atomization: A phenomenological study*. Spray Deposition and Melt Atomization. Bremen, Germany: Universität Bremen, 2013.
30. Anderson, I.E. and R.L. Terpstra, *Progress toward gas atomization processing with increased uniformity and control*. Materials Science and Engineering: A, 2002. **326**(1): p. 101-109.
31. Mlkvik, M., et al., *Twin-fluid atomization of viscous liquids: The effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size*. International Journal of Multiphase Flow, 2015. **77**: p. 19-31.
32. Zaremba, M., et al., *Low-pressure twin-fluid atomization: Effect of mixing process on spray formation*. International Journal of Multiphase Flow, 2017. **89**: p. 277-289.
33. Guo, K.-K., et al., *Numerical simulation of atomization process of nickel-based alloy powders prepared by vacuum induction melting gas atomization*. Vibroengineering Procedia, 2020. **32**: p. 185-189.
34. Zhao, X., et al., *Effect of atomization gas pressure variation on gas flow field in supersonic gas atomization*. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009. **52**(10): p. 3046-3053.
35. Espina, P. and U. Piomelli. *Study of the gas jet in a close-coupled gas-metal atomizer*. in *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 1998.
36. Mi, J., R. Figliola, and I. Anderson, *A numerical simulation of gas flow field effects on high pressure gas atomization due to operating pressure variation*. Materials Science and Engineering: A, 1996. **208**(1): p. 20-29.
37. Shi, Y., et al., *Impact of gas pressure on particle feature in Fe-based amorphous alloy powders via gas atomization: Simulation and experiment*. Journal of Materials Science & Technology, 2022. **105**: p. 203-213.

38. Zhao, W., et al., *A computational fluid dynamics (CFD) investigation of the flow field and the primary atomization of the close coupled atomizer*. Computers & chemical engineering, 2012. **40**: p. 58-66.
39. Kaiser, R., S. Kim, and D. Lee, *Deep data analysis for aspiration pressure estimation in a high-pressure gas atomization process using an artificial neural network*. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2020. **153**: p. 107924.
40. Zeoli, N. and S. Gu, *Computational simulation of metal droplet break-up, cooling and solidification during gas atomisation*. Computational materials science, 2008. **43**(2): p. 268-278.
41. Ting, J. and I.E. Anderson, *A computational fluid dynamics (CFD) investigation of the wake closure phenomenon*. Materials Science and Engineering: A, 2004. **379**(1-2): p. 264-276.
42. Borée, J., T. Ishima, and I. Flour, *The effect of mass loading and inter-particle collisions on the development of the polydispersed two-phase flow downstream of a confined bluff body*. Journal of Fluid Mechanics, 2001. **443**: p. 129-165.
43. Liu, A., D. Mather, and R. Reitz, *Modeling the effects of fuel spray characteristics on diesel engine combustion and emission*. SAE Tech. Pap. Ser, 1993. **930072**.
44. Li, X., et al., *Effects of different nozzle materials on atomization results via CFD simulation*. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020. **28**(2): p. 362-368.
45. Zuzio, D., et al., *Numerical simulation of primary and secondary atomization*. Comptes Rendus Mécanique, 2013. **341**(1-2): p. 15-25.
46. Mohammadi, A. and O. Fathollah, *Numerical and experimental study of twin-fluid two-phase internal-mixing atomizer to develop maximum entropy method*. Chinese Journal of Aeronautics, 2020. **33**(9): p. 2281-2294.
47. Wang, Y.-Q., et al., *Numerical Investigation of Droplet Properties of a Liquid Jet in Supersonic Crossflow*. International Journal of Aerospace Engineering, 2021. **2021**.
48. Tomar, G., et al., *Multiscale simulations of primary atomization*. Computers & Fluids, 2010. **39**(10): p. 1864-1874.
49. Dopler, M., *Influence of Material Properties on the Spheroidisation Process in Gas Atomisation*. BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 2020. **165**(3): p. 150-156.
50. Lena, C., G. Djambazov, and K.A. Pericleous, *Modelling metal powder production by the gas atomisation process*. 2008.
51. Morakotjinda, M., et al., *Gas atomization of low melting-point metal powders*. Chiang Mai J. Sci, 2010. **37**(1): p. 55-63.
52. Antipas, G., *Gas atomization of aluminium melts: Comparison of analytical models*. Metals, 2012. **2**(2): p. 202-210.
53. Tsirlis, M. and N. Michailidis, *Low-pressure gas atomization of aluminum through a Venturi nozzle*. Advanced Powder Technology, 2020. **31**(4): p. 1720-1727.
54. Antipas, G., *Liquid column deformation and particle size distribution in gas atomisation*. International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering, 2011. **4**(3): p. 247-264.
55. Si, C.-r., et al., *Design and evaluation of a Laval-type supersonic atomizer for low-pressure gas atomization of molten metals*. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2014. **21**(6): p. 627-635.
56. Yang, C.-C., et al., *Preparation of high-entropy AlCoCrCuFeNiSi alloy powders by gas atomization process*. Materials Chemistry and Physics, 2017. **202**: p. 151-158.

57. Gao, C.-f., et al., *Characterization of spherical AlSi10Mg powder produced by double-nozzle gas atomization using different parameters*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019. **29**(2): p. 374-384.
58. Singh, D. and S. Dangwal, *Effects of process parameters on surface morphology of metal powders produced by free fall gas atomization*. Journal of materials science, 2006. **41**(12): p. 3853-3860.
59. Ouyang, H.-W., C. Xin, and B.-y. Huang, *Influence of melt superheat on breakup process of close-coupled gas atomization*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007. **17**(5): p. 967-973.
60. Urionabarrenetxea, E., et al., *Experimental study of the influence of operational and geometric variables on the powders produced by close-coupled gas atomisation*. Materials & Design, 2021. **199**: p. 109441.
61. Dumouchel, C., J. Cousin, and K. Triballier, *Experimental analysis of liquid–gas interface at low Weber number: interface length and fractal dimension*. Experiments in fluids, 2005. **39**(4): p. 651-666.
62. Fei, L., et al., *Experimental study on atomization phenomena of kerosene in supersonic cold flow*. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008. **51**(2): p. 145-152.
63. Ng, C.-L., R. Sankarakrishnan, and K. Sallam, *Bag breakup of nonturbulent liquid jets in crossflow*. International Journal of Multiphase Flow, 2008. **34**(3): p. 241-259.
64. Guildenbecher, D., C. López-Rivera, and P. Sojka, *Secondary atomization*. Experiments in Fluids, 2009. **46**(3): p. 371-402.
65. Savart, F., *Wemoire sur la constitution des veines liquids lancees par des orifices circulaires en mince paroi*. Ann. de chim., 1833. **53**: p. 337-386.
66. Young, T., *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 1805.
67. Laplace, P.S., *Traité de mécanique céleste: suppléments au livre X*. Gauthier-Villars, Œuvres Complètes, 1805. **4**.
68. Plateau, J., *Recherches expérimentales et théorique sur les figures d'équilibre d'une masse liquide sans pesanteur*. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique, 1849. **23**: p. 1-1.
69. Kuehn, R., *Atomization of liquid fuels. Part II*. 1925.
70. Bohr, N., *Determination of the surface-tension of water by the method of jet vibration*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1909. **209**: p. 281-317.
71. Motaman, S., *High-speed imaging and computational modelling of close-coupled gas atomization*. 2013: University of Leeds.
72. Rayleigh, L., *On the instability of jets*. Proceedings of the London mathematical society, 1878. **1**(1): p. 4-13.
73. Kuehn, R., *Atomization of Liquid Fuels*. NACA Technical Memorandums nos. 329, 330, and 331, 1925. Der Motorwagen, 1924.
74. Weber, C., *Zum zerfall eines flüssigkeitsstrahles*. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1931. **11**(2): p. 136-154.
75. DeJuhasz, K.J., *Dispersion of sprays in solid injection oil engines*. Trans. ASME, 1931. **53**(65).
76. Kowalewski, T.A., *On the separation of droplets from a liquid jet*. Fluid Dynamics Research, 1996. **17**(3): p. 121.
77. Lefebvre, A.H. and V.G. McDonell, *Atomization and sprays*. 2017: CRC press.

78. Matthews, G., R. Bateman, and P. Miller, *Pesticide application methods*. 2014: John Wiley & Sons.
79. Miller, P. and M.B. Ellis, *Effects of formulation on spray nozzle performance for applications from ground-based boom sprayers*. Crop protection, 2000. **19**(8-10): p. 609-615.
80. Bayvel, L. and Z. Orzechowski, *Liquid atomization*. NASA STI/Recon Technical Report A, 1993. **94**: p. 12494.
81. Fraser, R., *Research into the performance of atomizers for liquids*. Imp. Coll. Chem. Eng. Soc. J., 1953. **7**: p. 52-68.
82. Guide, A.F.T., *Ansys Inc*. 2020.
83. Launder, B.E. and D.B. Spalding, *Lectures in mathematical models of turbulence*. 1972.
84. Yakhot, V. and S.A. Orszag, *Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory*. Journal of scientific computing, 1986. **1**(1): p. 3-51.
85. Shih, T.-H., et al., *A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows*. Computers & fluids, 1995. **24**(3): p. 227-238.
86. Kim, S.-E., D. Choudhury, and B. Patel, *Computations of complex turbulent flows using the commercial code FLUENT*, in *Modeling complex turbulent flows*. 1999, Springer. p. 259-276.
87. Wilcox, D.C., *Turbulence modeling for CFD*. Vol. 2. 1998: DCW industries La Canada, CA.
88. Menter, F.R., *Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective*. International journal of computational fluid dynamics, 2009. **23**(4): p. 305-316.
89. Menter, F.R., *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*. AIAA journal, 1994. **32**(8): p. 1598-1605.

ÖZGEÇMİŞ

1. Adı Soyadı : D**** AK****

2. Doğum Tarihi

3. Unvanı

4. Öğrenim Durumu : Lisans

Derece	Alan	Üniversite	Yıl
Lisans	Makine Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2015
Y. Lisans	Savunma Teknolojileri	Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	2020

5. Akademik Unvanlar

Derece	Alan	Üniversite	Yıl
Araştırma Görevlisi	Makine Mühendisliği	Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	2020

6. Yayınlar

6.1 Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

- ÇAKIR, M. T., & AKTÜRK, D., Numerical investigation of heat transfer performance in laminar flow of nanofluids in the wavy micro-channel. Politeknik Dergisi, 1-1.

6.2 Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler.

- AKTÜRK, D. & YURTKURAN, E., Numerical Investigation of the Effect of Gas Inlet Pressure on the Circulation Region in Gas Atomisation, 2nd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences, March 10-13, 2022, TURKEY
- AKTÜRK, D., & ŞAHİN, T., (2017). Boşluk Tutucu Yöntemi ile Magnezyum Köpük Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi . Engineers of Future International Student Symposium (EFIS) (pp.73). Zonguldak, Turkey

7. Projeler

- TÜBİTAK 3501 Kariyer Geliştirme Projesi, Hibrit Atomizasyon Yöntemiyle Küresel Tungsten Tozu Üretim Şartlarının Nümerik ve Deneysel Araştırılması (Bursiyer)
- BAP Projesi, Farklı Co-Cr Metal Tozlarının Eklemeli İmalat ile Üretilmiş Dental Kronların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi, (Araştırmacı)

8. İdari Görevler

- Enstitü ve Çalıştay Komisyonu
- Kalite Koordinatörlük Birimi

9. Son iki yılda verdiğiniz lisans ve lisansüstü düzeydeki dersler için aşağıdaki tabloyu doldurunuz.

Akademik Yıl	Dönem	Dersin Adı (Ders Asistanı)	Haftalık Saati		Öğrenci Sayısı
			Teorik	Uygulama	
2022-2023	Güz	Computer Aided Engineering Graphics			1
2022-2023	Güz	Guitar-I			0



**SİVAS
BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

KÖKLERDEN GÖKLERE...