



## Determination of metal powder particle size by numerical modeling in gas atomization

Yunus Emre Kayalı<sup>1\*</sup>, Rahmi Ünal<sup>2</sup>

<sup>1</sup>First Air Supply and Maintenance Center Command, Eskisehir, 26370, Turkey

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

### Highlights:

- Two-phase modeling of gas atomization process
- Demonstration of gas atomization mechanisms by numerical solution
- Determination of particle size by numerical solution

### Keywords:

- Gas atomization
- Flow dynamics
- Two-phase flow model
- Break-up mechanisms
- Particle size distribution

### Graphical/Tabular Abstract

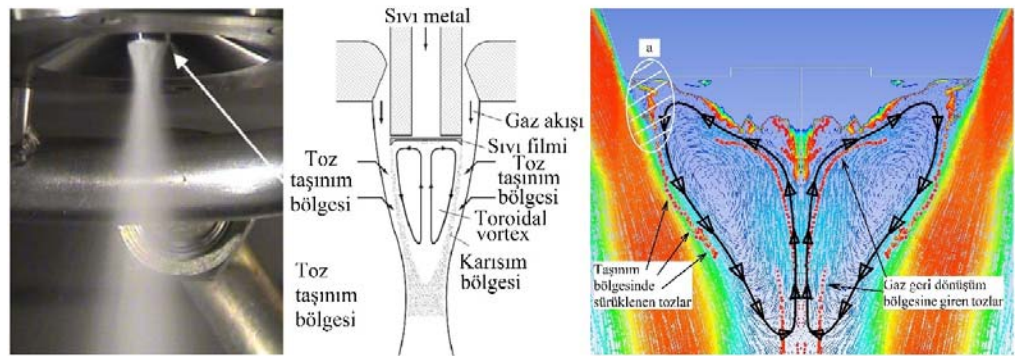


Figure A. Modeling of two-phase flow and particle formation during gas atomization

### Article Info:

Received: 06.02.2017

Accepted: 23.05.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416414

### Acknowledgement:

### Correspondence:

Author:

e-mail: ekayali@hvkk.tsk.tr

phone: +90 222 237 5940

### Purpose:

The main purpose of this research is to investigate the median particle size and particle size distribution of metal powders produced during gas atomization.

### Theory and Methods:

Gas atomization process is based on the disintegration of molten metal to produce metal powders. The disintegration phenomenon is a very complex one to fully understand, and currently, there are no satisfying CFD (Computational Fluid Dynamics) solutions to verify some proposed models. However, that phenomenon has a great impact on the final product and it identifies the characteristics of metal powders. There are a few studies which used different approaches to estimate the particle size and distribution of gas atomization by using CFD solutions with one of the preexisting two-phase models. In this study, interaction of the liquid metal and atomizing gas has investigated via Volume of Fluids (VOF) method of ANSYS/Fluent. This method with a new approach has used to determine the particle sizes and to reveal the atomizing mechanism and characteristics of the gas atomization process.

### Results:



Two-phase flow of gas atomization under 2.5 MPa pressure has successfully simulated. At the result of particle visualization, median particle size has calculated to be 49.8  $\mu\text{m}$  and the particle size distribution has shown to have a log-normal characteristic.

### Conclusion:

In this study, the instantaneous flow dynamics and particle formation of gas atomization has obtained by a new approach. Volume of Fluids method with this new approach has shown good results in terms of predicting flow dynamics, atomizing mechanism, particle size and distribution for gas atomization.



## Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretiminde toz boyutunun sayısal çözümleme ile belirlenmesi

Yunus Emre Kayalı<sup>1\*</sup> , Rahmi Ünal<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Birinci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı, Eskişehir, 26370, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisi Bölümü, Ankara, 06570, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Gaz atomizasyonu işleminin iki-fazlı modellenmesi
- Atomizasyon mekanizmalarının nümerik çözümleme ile gösterimi
- Toz boyutunun nümerik çözümleme ile belirlenmesi

### Makale Bilgileri

Geliş: 06.02.2017

Kabul: 23.05.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416414

### Anahtar Kelimeler:

Gaz atomizasyonu,  
akış dinamikleri,  
iki-fazlı akış modeli,  
parçalanma mekanizmaları,  
parçacık boyut dağılımı

### ÖZET

Gaz atomizasyonu işlemi, ergiyik haldeki sıvı metalin parçalanarak katılaşması ile metal tozlarının üretilmesi temeline dayanır. Atomizasyona ait parçalanma mekanizması, anlaşılması çok güç olan karmaşık bir olaydır ve hâlihazırda önerilmiş olan bazı modellere yönelik tatmin edici CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) çözümü üretilememiştir. Özellikle sayısal çözümlemede iki-fazlı model yaklaşımı ile üretilen toz boyutunun ve dağılımın belirlenmesine yönelik çalışmalar çok sınırlıdır. Bu çalışmada sıvı metal ve atomizasyon gazı olmak üzere iki akışkanlı sistemin etkileşimi nümerik olarak modellere araştırılmıştır. İki fazlı akışların CFD çözüm yöntemlerinden biri olan VOF (Sıvıların Hacmi) modeli daha önce denenmemiş yeni bir yaklaşımla kullanılarak gaz atomizasyon işleminde parçalanma mekanizmaları ortaya konmuş, oluşan parçacık boyutları ve boyut dağılımı hesaplanmıştır.

## Determination of metal powder particle size by numerical modeling in gas atomization

### H I G H L I G H T S

- Two-phase modeling of gas atomization process
- Demonstration of gas atomization mechanisms by numerical solution
- Determination of particle size by numerical solution

### Article Info

Received: 06.02.2017

Accepted: 23.05.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416414

### Keywords:

Gas atomization,  
flow dynamics,  
two-phase flow model,  
break-up mechanisms,  
particle size distribution

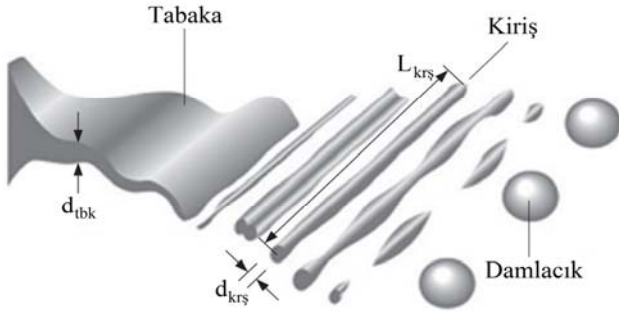
### ABSTRACT

Gas atomization process is based on the disintegration of molten metal to produce metal powders. The disintegration phenomenon is a very complex one to fully understand, and currently, there are no satisfying CFD (Computational Fluid Dynamics) solutions to verify some proposed models. However, that phenomenon has a great impact on the final product and it identifies the characteristics of metal powders. There are a few studies which used different approaches to estimate the particle size and distribution of gas atomization by using CFD solutions with one of the preexisting two-phase models. In this study, interaction of the liquid metal and atomizing gas has investigated via Volume of Fluids (VOF) method of ANSYS/Fluent. This method with a new approach has used to determine the particle sizes and to reveal the atomizing mechanism and characteristics of the gas atomization process.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ekayali@hvkk.tsk.tr / Tel: +90 222 237 5940

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toz haline getirilmiş saf metal ve alaşımlarının imalat ve malzeme teknolojilerindeki yeri gün geçtikçe artmaktadır. Bu artışa paralel olarak toz metal üretiminde kullanılan yöntemler sürekli geliştirilmektedirler. Günümüzde küresel metal tozu üretiminde kullanılan en yaygın yöntem gaz atomizasyonudur. Gaz atomizasyonu işleminin ana prensibi, ergitilmiş haldeki sıvı metal kütesinin parçalanarak damlacıklar haline getirilmesi ve katılaşmasının sağlanmasıdır. Bu işlem için öncelikle kararlı haldeki sıvı metale süpersonik (hava, azot, helyum, argon vb.) gaz jetleri vasıtasıyla enerji aktarılır. Enerji aktarımı sayesinde enerji seviyesi artırılan sıvı metal kararsız hale geçer ve gazla temas ettiği yüzeylerde dalgalanmalar meydana gelir (Şekil 1). Oluşan dalgalanmalar sonucu sıvı metalin kalınlığı yer yer farklılaşır. Bu farklılaşma atomizasyon ünitesi boyunca hareketine devam etmekte olan sıvı metal yüzeyinde bir takım ayrılmalar oluşturur. Belirli bir noktadan sonra tamamen kararsız hale geçmiş olan sıvı metalde yüzey gerilimlerinin de etkisiyle toparlanma başlangıçları görülür. Sıvı metal bütünlüğünü kaybeder ve bağımsız sıvı metal parçacıkları oluşmaya başlar. Oluşan bu parçacıklar uzun çubuklar veya pul şeklindeki ince tabakalar halinde olabilirler ve kütlelerinin yüzey alanlarına oranı göreceli olarak büyüktür. Bu nedenle, enerji aktarımının devam etmesi durumunda sıvı metalde gözlenen parçalanmalar da kolaylıkla devam eder ve küresel damlacıklar oluşur. Buraya kadar olan parçalanmalar birincil parçalanma olarak adlandırılırlar.



**Şekil 1.** Dalgalanan sıvı metal parçalanırken kırış ve damlacıkların oluşumu [1]  
(Ligament and droplet formations as rippled molten metal disintegrates)

Atomizasyonun bundan sonraki aşamalarına gelindiğinde akış hızlarında bir miktar düşüş yaşanmış olmasına rağmen, sıvı metal ile temas halinde olan atomizasyon gazlarının hızları halen sıvı metalin sürüklenme hızından daha yüksektir. Bu sebeple, atomizasyon gazlarıyla sıvı metal yüzeyinin temas etmesi sonucu oluşan kesme kuvvetleri sıvı metal parçalanmalarını devam ettirecektir. Birincil bölünme safhalarına dahil edilebilecek olan bu bölünmeler ile ikincil bölünme olarak adlandırılan nihai toz oluşumları hemen hemen atomizasyonun aynı safhasında birlikte gerçekleştikleri bir bölge oluştururlar. Aynı zamanda bu bölge içinde, daha önce oluşmuş olan tozların ve daha iri

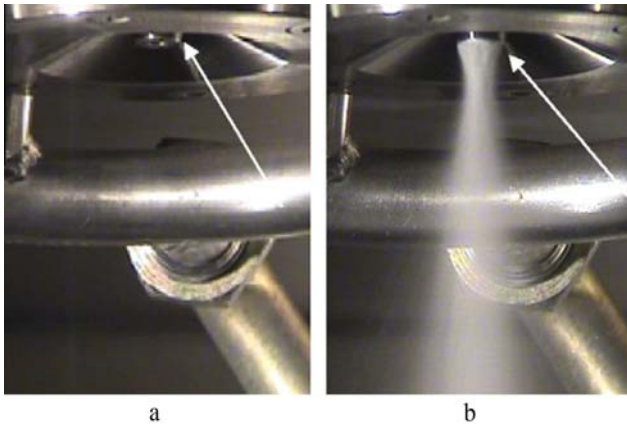
tanelerin birbirleriyle temas etmesi sonucu sıvı kütesinde birleşmeler meydana gelebilir. Ancak bunlar da ikincil parçalanma safhasındaki nihai toz oluşumu ile son hallerini alacaklardır. Nihai toz oluşumu bölgesine gelindiğinde ise atomizasyon gazlarının hızları oldukça azalmıştır. Parçacıklar halindeki sıvı metal ile eşit denilebilecek düzeyde kinetik enerjiye sahiptirler ve bu bölgeden sonra enerji transferi sağlanamaz. Bu nedenle bu bölgeden sonra ilave parçalanmalar beklenmez. Ancak yine de hareket doğrultuları birbirleriyle çakışan damlacıklar çarpışarak kendi aralarında bölünmelere veya birleşmelere sebep olabilirler. Atomizasyondaki parçalanmaların iki akışkanlı sistem ile sayısal çözümlenmesi üzerine yapılan çalışmalarda çeşitli kabuller yapılarak üretilen tozların boyutları tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Bununla birlikte sayısal çözümlenme ile iki-fazlı model yaklaşımı kullanılarak, üretilen toz boyutunun ve dağılımının belirlenmesine yönelik çalışmalar sınırlı sayıdadır. Zeoli vd. [2] VOF modelini kullanarak gaz atomizasyon işlemini modellemişler ancak toz boyutu ve parçalanma mekanizmalarını araştırmamışlardır. Persson vd. [3] su atomizasyonunda parçacık boyutu tahmini yapabilmek amacıyla parametrik bir çalışma yapmışlardır. García vd. [4] yaptıkları çalışmalarında iki akışkanlı girdaplı atomizörde gerçekleşen parçalanma olaylarını incelemişlerdir. Atomizasyon sırasında içi boş konik bir yapının oluştuğunu ve büyük parçacıkların konik yapının dış bölgesinde yoğunlaştığını gözlemlemişlerdir. Kiriş şeklindeki sıvı parçacıklarının nozul çıkışından itibaren gözlemlenebildiğini ancak bunların atomizasyonun ilerleyen aşamalarında toz şeklindeki parçacıklara dönüştüklerini ifade etmişlerdir. Ortalama parçacık boyununun sıvı akış oranıyla birlikte arttığını göstermişlerdir. Wang vd. [5] yüksek hızla dönen bir disk üzerine akıtılan gliserol ve su karışımı ile kırış ve parçacık oluşumunu araştırmışlardır. Parçacık boyunun kırış çapı ve kılcak dalga boyu ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Günther vd. [6] yaptıkları çalışmalarında gaz-destekli atomizasyon sistemlerinde sıvı parçalanması olayını dört farklı atomizör kullanarak araştırmışlar ve 3 farklı sıvının spray morfolosini incelemişlerdir. Kullanılan atomizörden bağımsız olarak en iyi parçalanmanın üç farklı sıvı arasında en düşük viskoziteye sahip olan su ile elde edildiğini görmüşler, karbondioksit gazının dondurucu etkisi nedeniyle önemli derecede büyük taneler elde edildiğini ifade etmişlerdir. Literatüre geçen araştırmalar içerisinde gaz atomizasyonu için toz boyutu ve dağılımını ortaya koyan ideal bir çözüme rastlanılamamıştır. Bu çalışmada sıvı metal ve atomizasyon gazı olmak üzere iki akışkanlı sistemin etkileşimi VOF modeli kullanılarak araştırılmıştır. Yeni bir yaklaşım ile parçalanma mekanizması incelenmiş ve oluşan parçacıkların boyutları ve dağılımı hesaplanmıştır.

## 2. ATOMİZASYON MODELİ (ATOMIZATION MODEL)

### 2.1. Yöntem (Method)

Gaz atomizasyonu yönteminin uygulanması amacıyla geliştirilmiş, serbest-düşmeli ve yakından-eşlemeli olarak

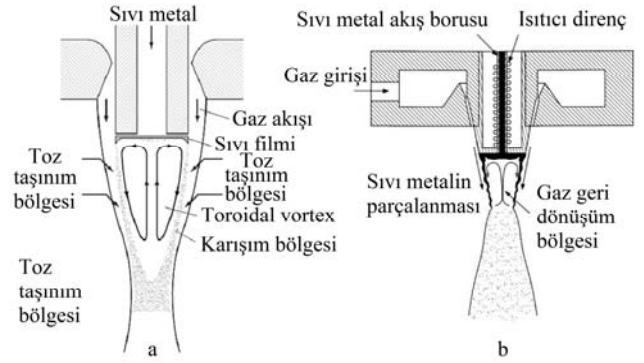
bilinen iki farklı tasarım mevcuttur. Bunlardan birincisi, sıvı metalin belirli bir miktar serbest düşüş gerçekleştirdikten sonra atomizasyon gazları ile temas ettirildiği, serbest-düşmeli adı verilen atomizasyon düzeneğidir. Temas etme süresindeki gecikmeden dolayı bir miktar enerji kaybı yaşanmasına rağmen nozul çıkışında sıvı metalin katılaşma riski olduğunda serbest düşmeli tasarım kullanılarak katılaşma sorunu çözülebilmektedir. Yakından-eşlemeli olarak anılan ikinci nozul tasarımında ise, nozul çıkışının hemen sonrasında sıvı metal ile atomizasyon gazı temas eder. Enerji aktarımında verim yüksektir ve parçalanma mekanizmaları daha etkin bir biçimde gerçekleşir. Bu çalışmanın araştırma konusunu yakından-eşlemeli tasarım oluşturmaktadır. Şekil 2'de, Dumlupınar Üniversitesinde bulunan gaz atomizasyonu ünitesinin nozul uç bölgesi ve atomizasyonun gerçekleştiği kapalı alan görülmektedir. Soldaki şekilde görülen yakından-eşlemeli nozul fotoğrafı sıvı metal akışının henüz başlatılmadığı bir anda çekilmiştir. Kalay tozu üretimi için gerçekleştirilen bir deney sırasında çekilen sağdaki fotoğrafta ise, sıvı metalin nozuldan çıkışı ve takip eden akış görülebilmektedir.



**Şekil 2.** Dumlupınar Üniversitesi gaz atomizasyonu nozul düzeneği a) sıvı metal akışı başlamadan önce b) 1,3 MPa basınç altında ertilmiş kalay akışı ile birlikte [7] (Dumlupınar Gas Atomization Unit a) before the initiation of the flow of molten metal b) molten metal flow with pressured gas at 1.3 MPa)

Atomizasyon işlemi sırasında gerçekleşen parçalanma ve toz oluşumu mekanizmaları literatürde etraflıca işlenen konular arasındadır. Yapılan çalışmalar çoğu zaman Şekil 2b'deki gibi fotoğraflardan veya yavaşlatılmış kamera kayıtları ile elde edilen görüntüler üzerinden yürütülmektedir. Hassas kameralar kullanılarak elde edilen bu görüntülerden atomizasyon mekanizmalarının işleyişi hakkında bir dizi çıkarımlar yapılmakta ve Şekil 3'te görülen tarzdaki akış modelleri, deneysel sonuçlara dayalı olarak önerilmektedir.

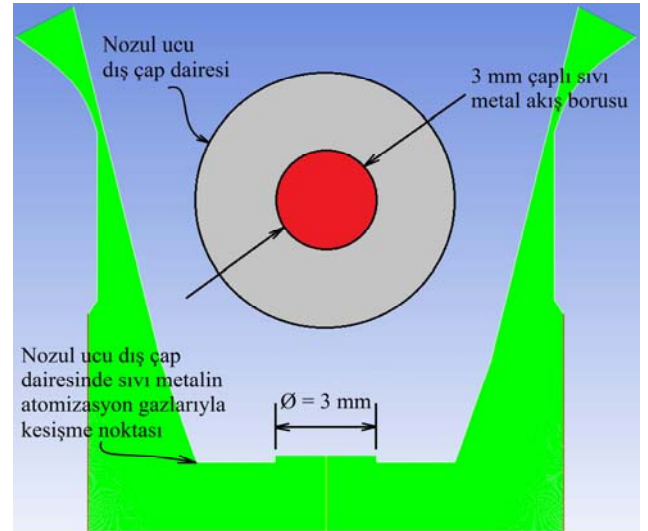
Bu çalışmada; CFD çözüm için kullanılan sıvıların hacmi metoduyla atomizasyon anındaki akış olayları anlık olarak elde edilebilmiş, ayrıca toz oluşumları anlık olarak gözlemlenebilmiştir. Akıştaki her iki fazın davranışı ve birbirleriyle etkileşimleri ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçların (akış modelleri) örtüştüğü görülmüştür.



**Şekil 3.** Yakından eşlemeli gaz atomizasyonunda a) A. Ünal [8] ve b) R. Ünal [9] tarafından tespit edilen sıvı akış modelleri (Liquid flow models detected by a) A. Ünal and b) R. Ünal during close-coupled gas atomization)

## 2.2. Sayısal Yöntem (Numerical Method)

Bu çalışmada Şekil 4'te görüldüğü gibi 3 mm çaplı metal akış borusuna sahip yakından-eşlemeli bir atomizasyon ünitesinde gerçekleşen atomizasyon mekanizmaları ve akış yönelimleri CFD yöntemleriyle araştırılmış, literatürdeki önerilen modellerin doğruluğu irdelenmiştir.



**Şekil 4.** Sayısal çözümde kullanılan yakından eşlemeli nozul yapısı (Closed-coupled nozzle structure used in numerical solution)

ANSYS/Fluent programda Sıvıların Hacmi Metodu olarak bilinen VOF modeli, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde çok-fazlı akış problemlerinin çözümünde kullanılan yaklaşımlardan bir tanesidir. Bu metod ile birbiri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla sıvı modellenilebilir. Modelin çalışma prensibi her bir sıvı parçasına ait dış yüzeylerin modellenen bölge boyunca takibini yapmaktır.

VOF metodu çözümlemesinde kullanılan başlıca denklemler hacim oran denklemi, momentum denklemi ve enerji denklemidir. Fazlar arasındaki ara yüzeylerin takibi, bir veya daha fazla fazın hacim oranı için süreklilik denkleminin

çözümü ile elde edilir. Modeldeki herhangi bir  $q$  fazı için, bu denklem Eş. 1'deki [10] şekli alır.

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

Burada;  $\alpha$  hacim oranı,  $\rho$  yoğunluk,  $v$  hız,  $\dot{m}_{qp}$   $q$  fazından  $p$  fazına kütle transferi,  $\dot{m}_{pq}$  ise  $p$  fazından  $q$  fazına kütle transferidir. Denklemin sağ tarafında yer alan kaynak terimin ( $S_{\alpha_q}$ ) varsayılan değeri sıfırdır. Ancak, her bir faz için kullanıcı tarafından belirlenen bir değer tanımlanabilir. Birincil faz için hacim oran denklemi çözülmeyecektir. Birincil fazın hacim oranı Eş. 2'deki [10] sınırlama ile hesaplanır.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

VOF modelinde oluşturulan hesaplama alanı boyunca tek bir momentum denklemi çözdürülür ve sonuç olarak bulunan hız vektör alanı fazlar arasında ortaklaşa kullanılır. Eş. 3'de [10] verilen momentum denklemi  $\rho$  ve  $\mu$  özellikleri üzerinden, tüm fazların hacim oranlarına bağlıdır. Burada;  $p$  basıncı,  $g$  yerçekimini,  $F$  ise dış momentum kaynaklarını göstermektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla_p + \nabla \cdot \left[ \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \right] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Fazlar arasında ortaklaşa kullanılan bir diğer denklem ise enerji denklemdir. Enerji denklemi Eş. 4'de [10] verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (4)$$

VOF modeli enerjiyi ( $E$ ) ve sıcaklığı ( $T$ ), kütleyle-ortalanmış olarak ele alır (Eş. 5) [10].

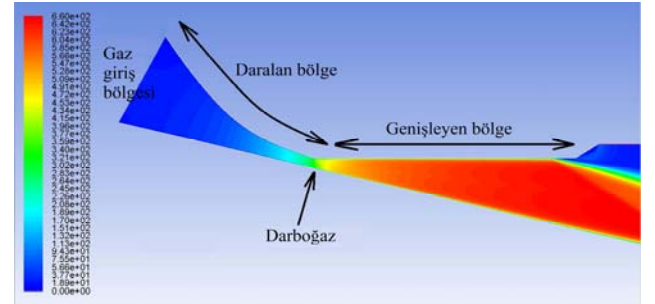
$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (5)$$

$E_q$ ; her bir faz için fazın özgül ısısına ve paylaşılan sıcaklığa bağlıdır.  $\rho$  ve  $k_{eff}$  (efektif termal iletkenlik) fazlar tarafından paylaşılır. Kaynak terimine ( $S_h$ ), diğer hacimsel ısı kaynaklarının olduğu gibi radyasyonun da etkisi vardır.

### 3. İKİ-FAZLI MODELLEME SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND DISCUSSION OF TWO-PHASE MODELING)

Ergiyik hale getirilen sıvı metali atomize etmesi için kullanılan gazlar yüksek basınç tüplerinden temin edilirler. Atomizasyon işleminde kullanılan gaz hızının, parçalanma mekanizmalarının oluşmasını sağlamaya yeterli büyüklükteki değerlere ulaştırılabilmesi zorunludur. Bunun için yüksek basınçlı ortamda depolanan gazların nozuldan geçerek atomizasyon odası/hücre adıyla verilen kapalı bölümüne girmeden önce hızlandırılmaları gerekir. Atomizasyon odası genellikle atmosfer basıncı altındadır, fakat bazı uygulamalarda vakum altında veya nadiren de olsa pozitif basınç altında da olabilir. Her üç durumda da, yüksek basınç

altında depolanan atomizasyon gazları, daralıp-genişleyen kesit alanına sahip bir nozuldan geçtikten sonra atomizasyon bölmesine alınır. Daralıp-genişleyen nozullar, gaz akışının gerçekleşeceği kesit alanının büyüklüğüne göre üç bölüme ayrılabilir (Şekil 5). Nozulun daralan bölgesi atomizasyon gazının hız kazanmaya başladığı bölgedir. Bu bölgeden geçerken bir miktar yükselen gaz hızı, nozulun boğaz olarak adlandırılan en dar kesitine gelindiğinde ses hızı değerine (1,0 Mach) kadar yükselmiş olur. Nozulun üçüncü ve son bölümü, boğaz bölgesinden sonra gelen ve nozul çapının sürekli olarak genişlediği bir bölümdür. Atomizasyon gazları, atomizasyonun başlangıcındaki basınç değerlerinin büyüklüğüne bağlı olarak genişleyerek üç numaralı bu bölgede de hız kazanmaya devam ederler.



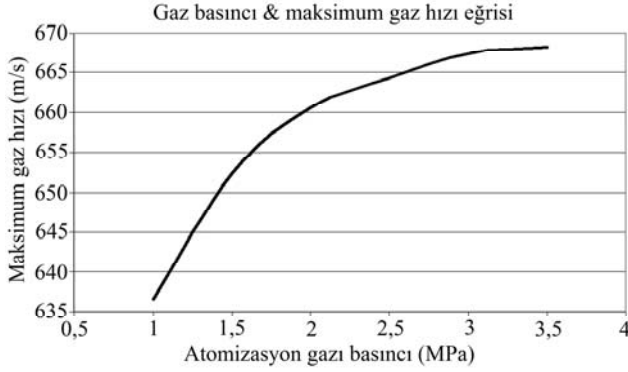
Şekil 5. Daralıp-genişleyen gaz atomizasyon nozul kesiti ve akış anındaki hız konturları

(Cross section of converging-diverging gas atomization nozzle and velocity contours during gas flow)

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

Atomizasyon gaz hızını artırmanın en basit yolu gaz basıncını artırmaktır. Ancak basınç artışı ile elde edilen gaz hızındaki artış, belirli bir basınç değerinde optimum değerine ulaşır ve bu noktadan sonra basınç artırılmaya devam edildiği takdirde gaz hızında kayda değer bir artış meydana gelmezken gaz kütleli debisi yüksek oranda artacaktır. Atomizasyon düzeneğinin tasarlanması aşamasında en verimli nozul geometrisinin belirlenmesi de bu anlamda

büyük önem taşımaktadır. Şekil 6'da artan gaz basıncı ile atomizasyon gazının ulaşabildiği en yüksek hız değerlerinin değişimi grafik halinde gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Daralıp-geişleyen gaz atomizasyon nozulunda basınca dayalı gaz hızları

(Gas velocity through the converging-diverging gas atomization nozzle depending on gas pressure)

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

Her iki etken yardımıyla metal akış borusu boyunca akışını tamamlayan ergitilmiş metal, metal akış borusunun atmosfere açık ucuna geldiğinde yeni bir etkiyle karşılaşır. Bu etki, literatürde toroidal vorteks olarak da adlandırılmış olan gaz geri dönüşüm bölgesindeki girdap oluşumunun bir sonucudur. Girdap hareketi, gaz geri dönüşüm bölgesinde hapsolan atomizasyon gazlarının daimi bir sirkülasyonuna yol açar. Sirkülasyonun nozul ucundaki yönü merkezden dışarıya doğrudur. Metal akış borusu ucuna gelen ergitilmiş sıvı metal öncelikle nozul ucunda bir merkezkaç kuvvet varmışçasına nozul merkezinden dışarıya doğru harekete geçer (Şekil 7a). Sıvı metalin nozul merkezinden dışarıya doğru kazandığı hızın büyüklüğü, gaz geri dönüşüm bölgesinde dolaşım halinde olan gazların akış hızıyla doğru orantılıdır. Gaz geri dönüşüm bölgesindeki gazların akış hızı ise atomizasyon gaz basıncı ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Radyal yönlü harekete geçmeden önce sadece dairesel kesitli metal akış borusu içinde eksenel yönde akmakta olan sıvı metal bundan böyle nozul ucu dış

çap dairesine ulaşıncaya kadar ince bir tabaka halinde akış hareketi yapar. Şekil 7b'de görüldüğü gibi nozul ucu dış çap dairesine ulaşan sıvı metal bu noktadan itibaren çok büyük bir kesme kuvvetine maruz kalır. Çünkü bu kesme kuvvetini oluşturan gazların nozul ucuna gelene kadar kademeli olarak basınç azalmış ve hızı süpersonik değerlere kadar yükselmiştir. Nozul ucu dış çap dairesinde ilk defa doğrudan atomizasyon gazı ile karşılaşan sıvı metalde birincil atomizasyon başlar. Birincil atomizasyon, ince plaka halindeki sıvı metali öncelikle dalgalı bir forma sokar, ardından ince uzun pullar haline getirip parçalar halinde koparır. Kopan uzun ince pullar, tamamen boşlukta hareket etmeye başladıklarında atomizasyon gaz akışı doğrultusunda hızlanarak sürüklenirler. Sürüklenme şeklinde gerçekleşen taşınım hareketi atomizasyon odası boyunca devam eder. Hareketin belirli bir noktasından itibaren sıvı metal parçacıkları, yüzey geriliminin de etkisiyle kendi kütle merkezlerine doğru toplanarak, yüzeylerinde oluşmaya başlayan ayrılmalar sonucu kendinden çok daha küçük plakalara (kirişlere) ve tanelere (damlacıklara) dönüşecektir. Bazı hallerde, taşınım halinde başıboş sürüklenen parçacıklar gaz geri dönüşüm bölgesindeki sirkülasyona katılabilirler (Şekil 8).

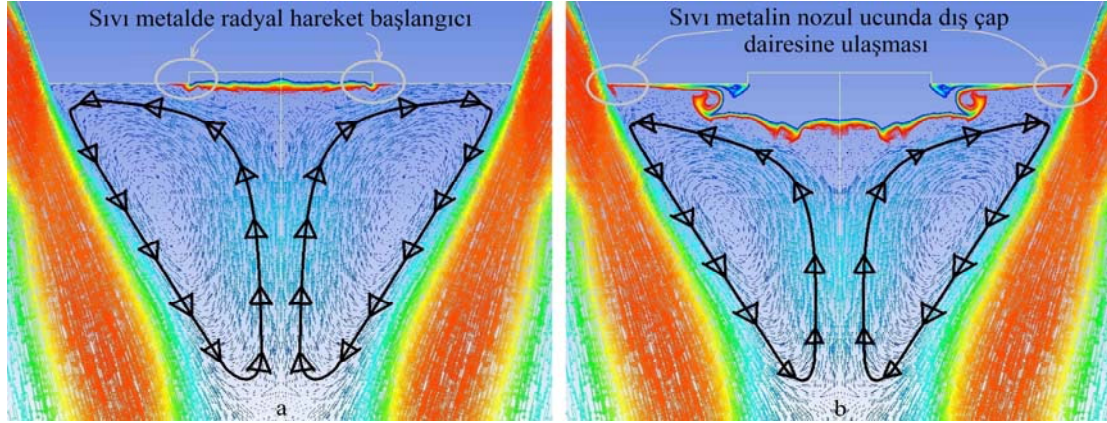
Oluşan plaka ve taneler nozul ucundan uzaklaştıkları esnada yüksek hızlı atomizasyon gazlarının etkisiyle ikincil parçalanmaya maruz kalırlar. İkincil parçalanmalar sonucu nihai tozlar oluşur. Bazı durumlarda daha önce oluşmuş olan toz taneleri havada çarpışarak birleşmelere veya uydulaşmalara yol açabilirler. Şekil 9'da; silindirikleşen (kısa kiriş haline gelen) bir yapının bölünerek iki ayrı toz oluşturması ve bunun tersi olarak iki farklı tozun birleşerek tek bir toz haline gelmesi şematik olarak gösterilmiştir. Burada ifade edilen parçalanma veya birleşme olayı tersinir olarak gerçekleşebilir.

Şekil 8'de işaretlenen ve birincil parçalanmaları temsilen seçilen "a" bölgesinin yakından görünümü Şekil 10'da verilmiştir. Verilen şekilde nozul ucu dış çap dairesi üzerinde sıvı metal filminin kirişler ve damlacıklar oluşturması görülebilmektedir.

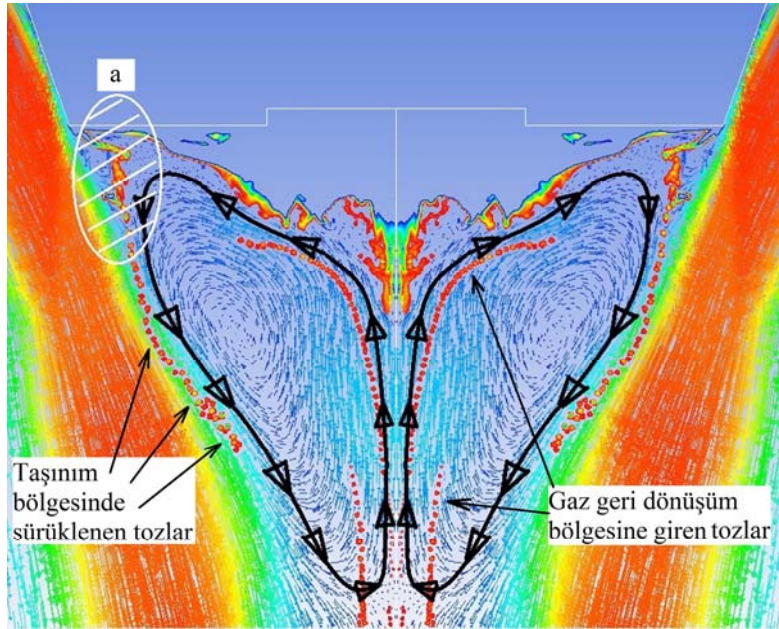
### 3.1. Halter Mekanizması (Dumbbell Mechanism)

Toz taneleri oluşurken sıklıkla karşılaşılan bir parçalanma mekanizması halter mekanizması olarak da adlandırılan bir oluşumdur (Şekil 11). Bu olay, atomizasyon sırasında çubuk şekline dönüşmüş sıvı metalin iki ayrı toz oluşturmak üzere bölünürken adından da anlaşılacağı üzere halter şeklinde bir yapıya dönüşmesidir. Halter geometrisinin her iki ucu arasındaki bağlantıyı sağlayan incelmış sıvı metal kiriş, her iki uç tarafından kendilerine doğru çekilmek suretiyle koparılır. Kopma sonrası iki bağımsız toz tanesinin olduğu bu mekanizma ikincil parçalanmalar esnasında sıklıkla gerçekleşir.

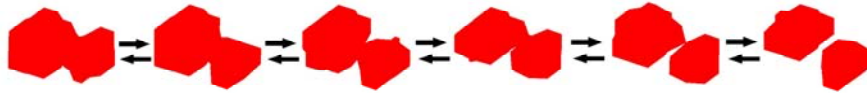
Halter mekanizması ile parçalanmış bir toz tanesinin yeni oluşturduğu her iki elemanında tekrar halter mekanizması oluşturmaları beklenmez. Çünkü halter mekanizması



Şekil 7. a) Sıvı metalin radyal hareketine başlaması b) Sıvı metalin nozul ucu dış çap dairesine ulaşması  
(Molten metal a) initiates its radial movement b) arrives at the nozzle tip outer diameter)



Şekil 8. Gaz geri dönüşüm bölgesinde dolaşan ve taşımın bölgesinde sürüklenen tozlar  
(Particles go around in the gas-recirculation zone and transportation area)

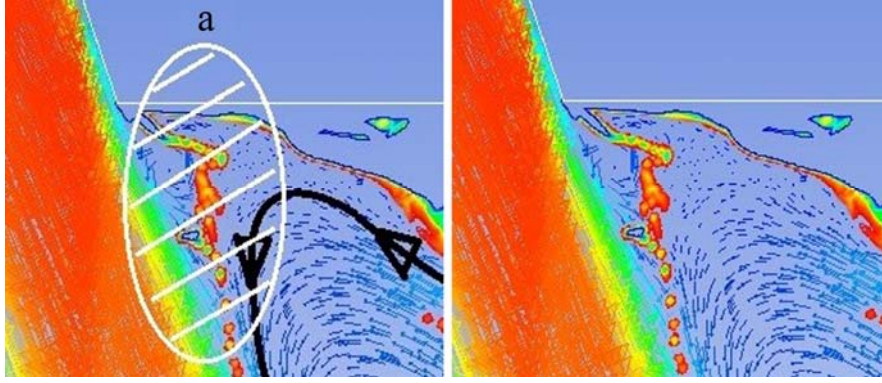


Şekil 9. Tozların parçalanma/birleşme mekanizması (Integration/disintegration mechanism of particles)

oluşturan çubuk şeklindeki sıvı metal daha önce birçok kez parçalanmıştır. Başka bir deyişle halter mekanizmasına uğrayacak toz tanesinin ikincil parçalanma veya en erken birincil parçalanmanın son evrelerinde bulunduğu söylenebilir. Elde edilen sonuçlar ile literatüre geçmiş olan gerçek toz resimleri büyük oranda benzerlik göstermekte olup, bu çalışmada kullanılan yaklaşımın sıvı metalin parçalanmasını iyi bir şekilde ortaya koyduğunu değerlendirilmektedir.

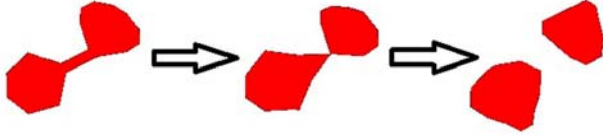
### 3.2. Boyut Dağılımının Hesaplanması (Calculation of Particle Size Distribution)

VOF modelinde fazların hacim oranlarının takibi bir kaç farklı hesaplama yöntemiyle yapılmaktadır. Yöntemlerden bazıları fazlar arası bölgeyi keskin hatlarla belirler ancak çok yüksek işlem hacmi oluştururlar. Özellikle atomizasyon işlemi gibi yüksek hızlarda gerçekleşen akış olaylarının bahsedilen yöntemlerle çözülmesi, günümüzdeki mevcut



**Şekil 10.** Nozul dış çap dairesinde başlayıp gelişen birincil ve ikincil parçalanma olayı  
(Primary and secondary disintegration process starting and progressing at the nozzle outer diameter)

işlemci hızlarıyla mümkün görünmemektedir. Buna karşın beraberinde aşırı işlem yoğunluğu getirmeyen hesaplama yöntemleri de mevcuttur. Bu çalışmada kullanılan yöntem ile işlem süresi kısaltılarak, fazlar arasındaki bölgelerin sadece toz boyut değerlerinin ölçülmek istenildiği anlarda net olarak hesaplatıldığı bir yaklaşım geliştirilmiştir.



**Şekil 11.** Toz oluşumunda sıkça karşılaşılan halter mekanizması  
(Frequently experienced dumbbell mechanism during powder formation)

Şekil 12'de 2,5 MPa basınç altında yapılan modellemeye ait görüntüler verilmiştir. Her iki şekil modellemenin hemen hemen aynı anına aittir. Soldaki şekilde sıvı metal ve gaz fazı arasındaki bölgelerin net olarak hesaplatılmadığı bir görünüm verilmişken, sağdaki şekilde ise parçacıkların keskin yüzeylerle oluşturulduğu görünüm verilmiştir. Toz parçacıklarının görünür hale getirilmesinin ardından boyut hesabına geçilmiştir.

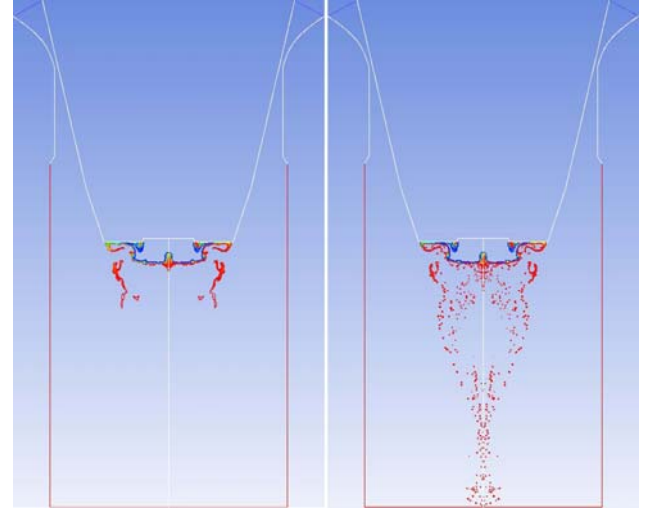
Toz boyutu hesaplanırken iki boyutlu simülasyon sonuçlarından elde edilen izdüşüm kesit alan değerleri ( $\epsilon$ ) kullanılmıştır. İzdüşüm kesit alan değerlerinin birimi "piksel kare" cinsindedir. 1 piksellik uzunluk 1  $\mu\text{m}$  uzunluğa tekabül edecek şekilde simüle edilmiştir. Bu değerler kullanılarak eşdeğer küresel parçacık çapları ( $D_A$ ) Eş. 6'ya göre hesaplanmıştır.

$$D_A = \sqrt{\frac{4\epsilon}{\pi}} \quad (6)$$

Şekil 13'de toz oluşumları büyütülmüş halde görülebilmektedir. Oluşan yüzlerce toz parçacığı arasından numune olarak seçilen 7 adet toza ait boyut hesabı örnek olarak Tablo 1'de verilmiştir.

2,5 MPa basınç altında gerçekleştirilen modelleme sonucunda 5 farklı zamanda toz görüntüleri

oluşturulmuştur. Sonuçlar detaylı şekilde incelenerek elde edilen 698 adet toza ait boyut dağılım eğrisi Şekil 14'de verilmiştir. Soldaki şekilde görüldüğü gibi parçacık boyut dağılımı log-normal olarak adlandırılan karakterdedir. Birikimli parçacık boyut dağılımı eğrisinden elde edilen ortalama toz boyutu değeri ( $d_{50}$ ) 49,8 mikron olarak hesaplanmıştır.

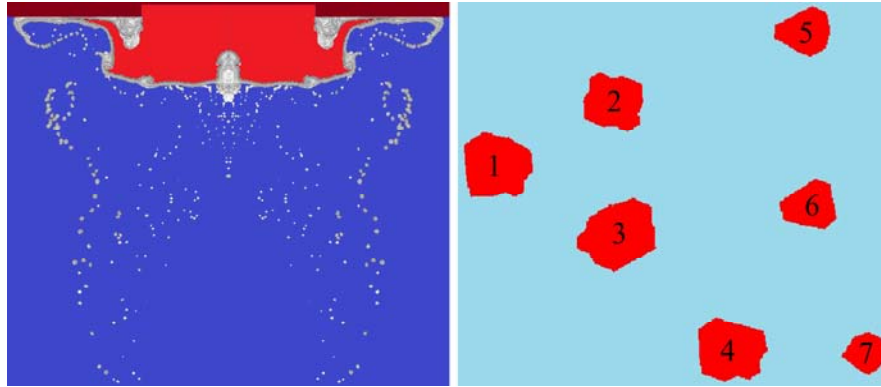


**Şekil 12.** Sayısal çözümde parçacıkların görünüşü (Particle visualization in numerical solution)

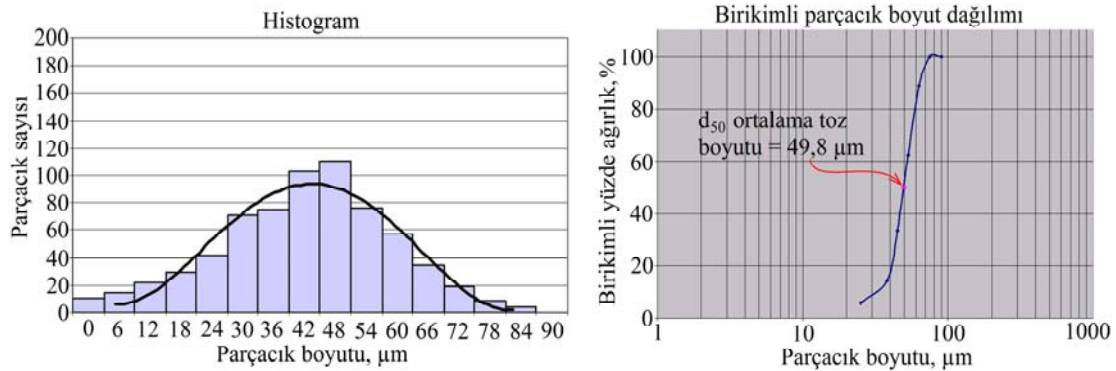
**Tablo 1.** Numune olarak seçilen tozların boyut değerleri  
(Size values of powders selected for sampling)

Toz No.	Toz Kesit Alanı (piksel kare, $\epsilon$ )	Toz Eşdeğer Çapı ( $\mu\text{m}$ )
1	2942	61
2	2244	53
3	3269	65
4	2823	60
5	1564	45
6	1648	46
7	1045	36





Şekil 13. Numune olarak seçilen tozlar (Sample of powders)



Şekil 14. Boyut dağılım grafikleri (Particle size distribution graphs)

#### 4. SİMGELER (SYMBOLS)

$p$	: Basınç
$F$	: Dış momentum kaynakları
$\nabla$	: Diverjans
$k_{eff}$	: Efektif termal iletkenlik
$E$	: Enerji
$D_A$	: Eşdeğer küresel toz çapı
$q$	: Fazlardan herhangi biri
$\alpha$	: Hacim oranı
$v$	: Hız
$p$	: İkincil faz (Hacim-oran denklemi)
$S_h$	: Kaynak terimi (Enerji denklemi)
$S_{\alpha q}$	: Kaynak terimi (Hacim-oran denklemi)
$l_{krş}$	: Kiriş boyu
$d_{krş}$	: Kiriş genişliği
$\mu m$	: Mikrometre
$d_{50}$	: Ortalama toz boyutu
$\dot{m}_{pq}$	: p fazından q fazına kütle transferi
$\dot{m}_{qp}$	: q fazından p fazına kütle transferi
$T$	: Sıcaklık
$d_{tbk}$	: Tabaka genişliği
$\varepsilon$	: Toz kesit alanı
$\mu$	: Viskozite
$g$	: Yerçekimi
$\rho$	: Yoğunluk
$t$	: Zaman

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmanın konusunu oluşturan "iki-fazlı akışların modellenmesi" konusu, özellikle atomizasyon nozulu gibi çok küçük bir boğazdan geçen ve ses üstü hızlarda gerçekleşen akışlar için sonuca ulaşılması zor bir konudur. Literatür taraması yapıldığında, atomizasyon yöntemleri araştırmacılar tarafından bilgisayarda simüle edilirken genellikle tek-fazlı (sadece gaz jeti uygulanmış) akış modellerinin yapıldığı görülmektedir. Atomizasyonun iki-fazlı olarak simüle edildiği çalışmaların sayısı azdır ve mevcut çalışmaların kapsamı sınırlıdır. Bununla birlikte bu konu üzerine çalışan araştırmacılar tarafından atomizasyon mekanizmalarının tam manasıyla anlaşamadığı sıklıkla vurgulanmaktadır. Ayrıca atomizasyon işleminin geliştirilmesi ve daha kaliteli ürün elde edebilmek amacıyla atomizasyon mekanizmalarının doğru olarak anlaşılması büyük önem arz etmektedir. İşlemin yüksek basınç, yüksek sıcaklık ve ses üstü hızlarda yapıyor olması, bir takım sensörlerle veri toplanmasını olanaksız kılmakta veya güçleştirmektedir. Sayılan bu sebeplerden ötürü gaz atomizasyonu işleminin modellenmesi, parçalanma olayları ve toz oluşumunun açıklanması üzerine yapılan bu çalışma, şimdiki kadar önerilen mekanizmaların iki-fazlı modelle gösterimi ve parçacık boyutunun hesaplanmasıyla birlikte bu alanda yapılan ilk çalışmalardan biri olma niteliğine sahiptir.

Yapılan çalışmanın sonucunda, VOF modeli kullanılarak iki akışkanlı modelleme yaklaşımında gaz atomizasyonu esnasında sıvı metalin nozul uç kısmındaki hareketi ortaya konmuş ve parçalanma mekanizmaları görüntüleriyle elde edilmiştir. Atomizasyon sürecinde oluşan parçacıkların eşdeğer küresel çapları hesaplanarak parçacık dağılımı gösterilmiş ve ortalama toz boyutu hesaplanmıştır.

Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi alanında ilerleyen dönemde yapılacak çalışmalarda CFD yöntemlerinin uygulandığı başka programların denenerek benzer sonuçların elde edilebileceği, model geometrileri oluşturulurken ağ yapısının toz oluşumlarına etkisinin araştırılabileceği, atomize edici olarak farklı özelliklerde gazlar kullanılarak toz boyutu değişiminin gözlenebileceği ve üç boyutlu modelleme yapılarak çalışmanın bir üst seviyeye çıkarılabileceği değerlendirilmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Duangkamchan W., Ronsse F., Depypere F., Dewettinck K. and Pieters J.G., CFD study of droplet atomisation using a binary nozzle in fluidised bed coating, *Chemical Engineering Science*, 68, 555-566, 2012.
2. Zeoli N., Tabbara H., Gu S., CFD modeling of primary breakup during metal powder atomization, *Chemical engineering Science*, 66, 6498-6504, 2011.
3. Persson F., Eliasson A., Jösso P., Prediction of particle size for water atomised metal powders: parameter study, *Powder Metallurgy*, 55 (1), 45-53, 2012.
4. García J.A., Lozano A., Alconchel J., Calvo E., Barreras F., Santolaya J.L., Atomization of glycerin with a twin-fluid swirl nozzle, *International Journal of Multiphase Flow*, 92, 150-160, 2017.
5. Dongxiang Wang, Xiang Ling, Hao Peng, Zhenwei Cui, Xinjun Yang, Experimental Investigation of Ligament Formation Dynamics of Thin Viscous Liquid Film at Spinning Disk Edge, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55, 9267-9275, 2016.
6. Astrid Günther, Aljoscha Lampa, Udo Fritsching, Jewe Schröder, Agnes Kleinhans, Volker Gaukel, Heile P. Schuchmann, Jan-Martin Loth, Marcus Petermann, Karl-Ernst Wirth, Benchmarking of Gas-Assisted Atomization Systems for Liquid Disintegration, *Chemical Engineering Technology*, 39 (4), 699-707, 2016.
7. Aydın Ö. ve Ünal R., Experimental and numerical modeling of gas atomization nozzle for gas flow behavior, *Computers & Fluids*, 42, 37-43, 2011.
8. Ünal A., Leon D.D., Gurganus T.B., Hildeman G.J., Production of Aluminum and Aluminum-Alloy Powder, *Powder Metal Technologies and Applications*, ASM Handbook, ASM International, 7, 353-363, 1998.
9. Ünal R., The Influence of the Pressure Formation at The Tip of The Melt Delivery Tube On Tin Powder Size And Gas/Melt Ratio In Gas Atomization Method, *Journal of Materials Processing Technology*, 180 (1-3), 291-195, 2006.
10. Ansys Fluent 15.0 Theory Guide, Ansys Inc., Canonsburg, PA, 2013.