

3. GAZ ATOMİZASYONU

Gaz atomizasyonu, 1920'li yıllardan bu yana demir dışı metallere toz üretilmesinde kullanılan bir yöntemdir [6]. 1960'lı yılların başında yüksek sıcaklıklara dayanıklı, yüksek mukavemet ve çok düşük genleşme karakteristiklerine sahip alüminyum alaşım tozlarının üretilmesi gaz atomizasyonu ile gerçekleştirilmiştir [15].

Son 20 yıldır gaz atomizasyonu ile metal tozu üretim tekniği kimyasal homojenlik ve düzgün mikroyapı gibi özelliklerden dolayı geniş kullanım alanına sahiptir. Atomize tozlar ince toz dağılımı gereken ileri teknoloji uygulamalarında kullanıldığı için üretilen tozların mekanik performansları yüksek üretim maliyetini geride bırakıyordu. Günümüzde ise atomizasyon işleminin verimini artırmak için yapılan araştırmalar istenilen boyutta toz üretiminin ekonomik bir şekilde gerçekleştirilebilmesi hususunda yoğunlaşmıştır [16].

Gaz atomizasyonu; sıvı metalin yüksek hızlara sahip gaz akışının etkisiyle küçük damlacıklara ayrılması işlemidir. Sıvı metal damlacıklar aniden küreselleşir, soğur ve katılaşır. Bu parçaların çapları 1 μm 'den 1 mm'ye kadar değişir. Küresel metal alaşım tozları işlem esnasında gösterdiği hızlı katılaşma karakteristiğinden dolayı üstün özelliklere sahiptir. Oluşan tozların mikroyapısı diğer yöntemlerle elde edilen tozlara göre daha üstündür [17]. Toz boyutu ve dağılımının kontrol edilebilir olmasından dolayı gaz atomizasyon yöntemi tercih edilen bir yöntemdir [18].

Gaz atomizasyon yönteminde amaç yüksek hızda genleşen gazın kinetik enerjisini sıvı metale aktararak metali küçük damlacıklara ayırmaktır [19]. Yüksek basınçlı gaz atomizasyon yöntemi ince metal ve alaşım tozu üretiminde kullanılan etkili bir yöntemdir. Düzenli bir atomizasyon işlemi için aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır [20]:

1. Yüksek gaz kinetik enerjisi,
2. Metal akış borusu ucunda negatif basınç oluşumu,
3. Metal akış borusu ucunda radyal basınç farkı. (Bu fark sıvı metali merkez akış çizgisinden dolaşım bölgesine doğru iter. Dolaşım bölgesinde gazın enerjisi daha yüksektir.)

Atomizasyon değişkenleri sıvı metal sıcaklığı, sıvı metal debisi, metal akış borusunun geometrisi, atomizasyon hızı, nozul tasarımı ve metal akış borusu çıkıntı mesafesi gibi değişkenlerdir [21].

Bu parametreler genel olarak 3 kısımda toplanabilir [22] :

1. Sıvı Metal Değişkenleri
 - Metalin Aşırı Isıtılması
 - Kimyasal Kompozisyon
 - Özgül Ağırlık
 - Yüzey Gerilmesi
 - Viskozite
 - Koruyucu Atmosfer
2. Nozul Değişkenleri
 - Jet Geometrisi
 - Nozul Açısı
 - Jet Tipi ve Adedi
 - Metal Akış Borusu Çıkıntı Mesafesi
3. Atomizasyon Gazının Değişkenleri
 - Basınç
 - Yoğunluk
 - Hız
 - Debi
 - Akış Oranı (Gaz / Sıvı Metal Kütlesel Debi Oranı)

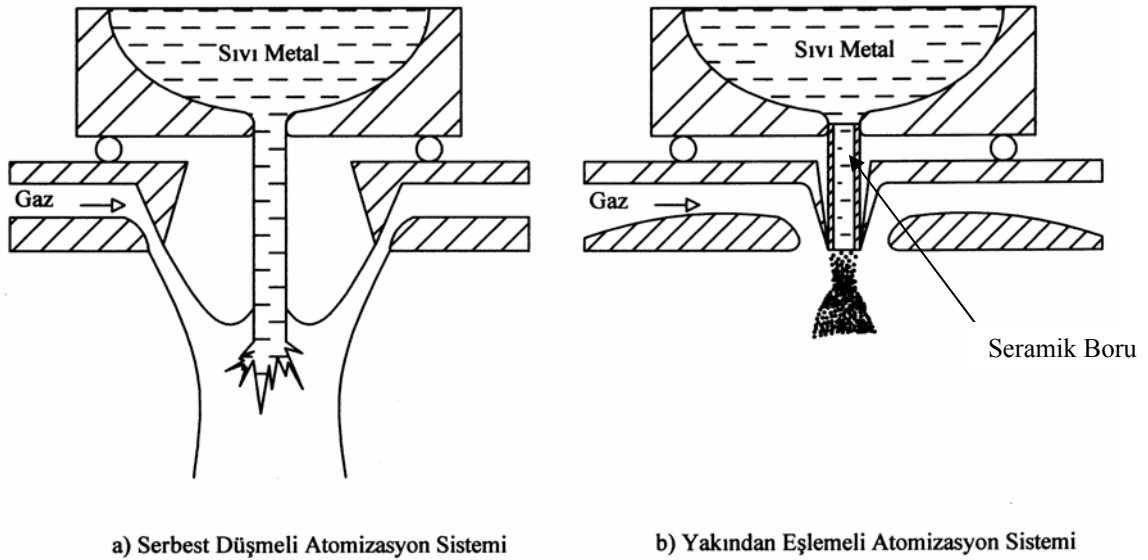
Başarılı bir atomizasyon işlemi aşağıdaki parametreler tarafından karakterize edilebilir

[22]:

- Toz Tane Şekli
- Ortalama Toz Boyutu
- Toz Boyut Dağılımı
- Görünür Yoğunluk
- Toz Akış Hızı
- Kimyasal Kompozisyon
- Sıkıştırılabilirlik Kapasitesi
- Ekonomiklik

3.1 Atomizasyon Sistemleri

Atomizasyon sistemleri serbest düşmeli ve yakından eşlemeli olmak üzere iki çeşittir (şekil 3.1). Serbest düşmeli sistemlerde sıvı metal, gaz jeti ile temas edinceye kadar serbest olarak akar. Sıvı metal, yerçekimi etkisinde belli bir süre aktıktan sonra gaz jeti ile tepkimeye girer. Yakından eşlemeli sistemlerde, sıvı metal nozul gaz çıkış bölgesine seramik bir akış borusu ile gönderilir. Yakından eşlemeli sistemlerde daha iyi enerji aktarımı gerçekleştiği için atomizasyon verimleri yüksektir.



Şekil 3.1 Atomizasyon sistemleri : a) Serbest düşmeli atomizasyon sistemi, b) Yakından eşlemeli atomizasyon sistemi.

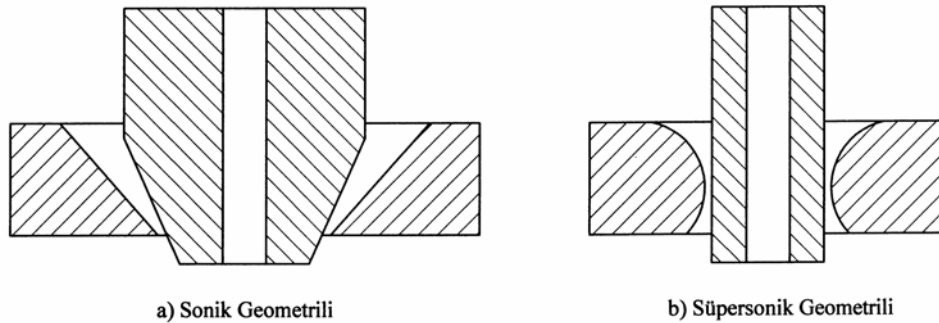
Yakından eşlemeli sistemler yüksek verimde çalışmalarına rağmen bazı zorluklara sahiptir. Bunlardan en önemlisi metal akış borusu ucunda oluşan basınçtır. Bu basınç negatif veya pozitif olabilir. Yüksek atomizasyon basınçlarında, sıvı metal akışının kararlılığı, nozul ve metal akış borusunun boru ucunda negatif basınç oluşturacak geometride tasarlanmasıyla kontrol edilebilir. Yakından eşlemeli sistemlerde yaşanan sorunlardan bir diğeri ise yüksek atomizasyon basınçlarında sıvı metalin metal akış borusu içerisinde katılaşması sorunudur. Sıvı metalin katılaşması sonucu atomizasyon işlemi sona erer. Bu yüzden metal ergime sıcaklığının 100-150°C üzerinde ısıtılır. Aşırı ısıtılmış metal atomizasyon bölgesine girmeden önce seramik akış borusunun içinden geçer. Sıvı metalin seramik akış borusu içerisinde katılaşmasını önlemek için seramik boru direnç telleri ile ısıtılır. Bu sistemlerde serbest düşme sistemlerine

göre daha kolay bölünme gerçekleşir ve daha ince boyutlarda, sıkıştırılma kapasitesi ve akıcılığı yüksek küresel tozlar üretilir. Yakından eşlemeli sistemlerde gaz dolaşım bölgesi ve bu bölgenin atomizasyona olan etkisinin araştırılması yeni bir araştırma konusu olmuştur. Metal tozlarının boyutlarının düşmesi ile birlikte mekanik özelliklerinin artıyor olması gerçeği, yapılan araştırmaları yakından eşlemeli sistemlerin gaz akış modellerinin incelenmesi yönüne kaydırmıştır. Gaz akış dinamiği konularında yapılan araştırmalar sonucu daha ince toz boyut dağılımına sahip tozlar üretilmiş ve atomizasyon işleminin verimi artırılmıştır [9, 16, 17, 18, 23 ve 24].

3.2 Nozul Çeşitleri

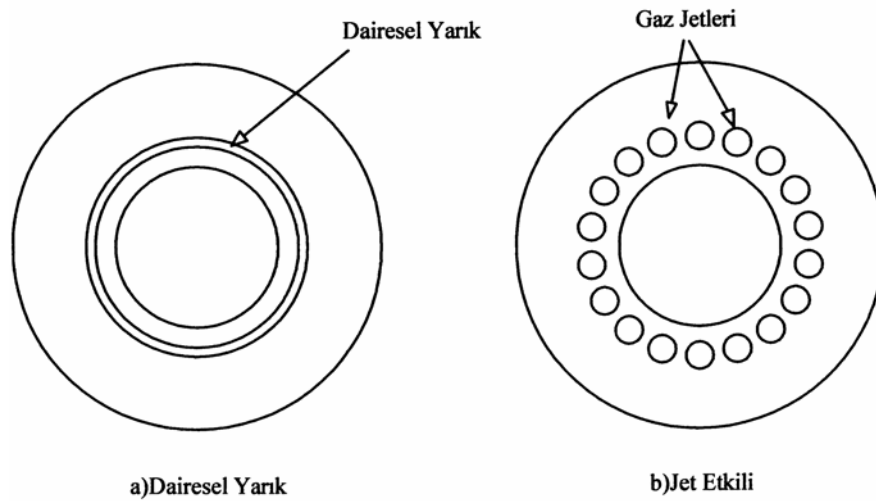
Nozul parçası, gaz iletim sisteminde yüksek hızlı gaz jeti ve sıvı metal arasındaki etkileşimi sağlayan önemli bir parçadır [16]. Atomizasyon işleminde nozul geometrisi oldukça önemli bir yere sahiptir. Nozul, toz üretim ünitesine monte edildikten sonra geometrisinde herhangi bir değişiklik oluşmadığı için atomizasyon ünitesinin sabit parçalarından bir tanesidir. Bu yüzden atomizasyon işlemi gaz basıncı, gaz tipi, sıvı metal akış oranı, akış borusunun çıkıntı mesafesi ve sıvı metalin aşırı ısınması gibi işlem parametrelerinin optimizasyonu ile gerçekleştirilir. Buna rağmen bazı parametrelerdeki değişim oldukça sınırlıdır. Örneğin helyum gazının kullanımı ortalama toz boyutunu düşürür fakat azot gazının kullanımı ekonomiktir [24]. Nozul tipleri ile ilgili teknik bilgilerin bilimsel bir sır olarak saklanması dolaylı nozul tipleri genel olarak sınıflandırılmamaktadır [22]. Az sayıda yayınlanmış bilgilere göre nozullar geometrilerine göre ikiye ayrılırlar (şekil 3.2) :

1. Süpersonik Nozullar (daralan-genişleyen geometrili)
2. Sonik Nozullar (daralan geometrili)



Şekil 3.2 Farklı nozul geometrileri: a)Sonik geometrili b)Süpersonik geometrili [22].

Sıvı metaller yüksek yüzey gerilmesine sahip olduğu için atomizasyonlarında genellikle süpersonik geometrili nozullar kullanılır. Sonik geometriye sahip nozullar ile oldukça yüksek basınç değerlerinde ses üstü hızlara ulaşılırken, süpersonik geometriye sahip nozullarda ise daha düşük atomizasyon basınçlarında ses üstü hızlara ulaşmak mümkündür [25]. Nozullar sahip oldukları gaz çıkış geometrilerine göre jet etkili veya dairesel yarıklı olmak üzere ikiye ayrılır (şekil 3.3).



Şekil 3.3 Dairesel yarıklı ve jet etkili nozulların şematik resimleri [22].

Yüksek verimli atomizasyon işlemi için yapılması gereken en önemli aşama uygun şartlarda çalışabilecek bir nozul tasarımının yapılmasıdır. Bunun için nozul performansının araştırılması gerekir. Nozul performansının incelenmesi için nozula sadece gazın gönderilmesi sonucu oluşan gaz akış bölgeleri incelenir [18].

3.3 Gaz Akış Modelleri

Atomizasyon işlemi sırasında sıvı metal akış borusu ucundaki basınç ölçümü oldukça zordur. Genellikle iki akışkanlı (sıvı metal + gaz) sistemin incelenmesi karmaşık olduğu için yapılan araştırmalarda sadece gazın olduğu akış bölgeleri incelenmiştir [20]. Atomizasyon nozullarında gaz; hızın maksimum olduğu bölgede tamamen genişerek sıvı metal ile temas eder [24].

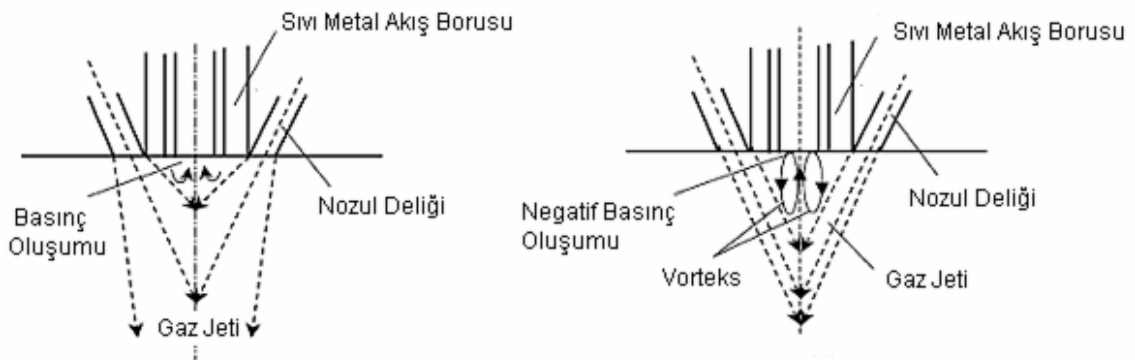
Atomizasyon işleminde genişleme her zaman nozul çıkışında gerçekleşir. Genleşmenin etkisiyle gaz hızı ses üstü hıza ulaşır. Genleşme sonucu olarak gaz jeti basıncı ortam basıncı değerine düşer. Bu türde bir genişleme denklemi için aşağıdaki denklem yazılabilir ;

$$\frac{P_2}{P_a} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2 \right)^{(-\gamma / (\gamma - 1))} \quad (3.1)$$

Burada P_2 genişleme basıncı değerini, P_a atomizasyon basıncını, M_2 genişmiş gazın mach sayısını ve γ gazın özgül ısı oranını belirtmektedir [26].

3.3.1 Negatif basınç oluşumu

Sıvı metal akış borusu ucunda oluşan gaz akışı ve negatif basınç oluşumu gaz dinamiğine bağlıdır. Gaz atomizasyonu işlemi esnasında sıvı metal akış borusunun ucundaki gaz basıncı atomizasyon değişkenlerinin durumuna göre pozitif veya negatif olabilir (şekil 3.4). Negatif basınç oluşumu sonucunda sıvı metal potadan metal akış borusuna doğru çekilir. Pozitif basınç oluşumu sonucu metal akışı gerçekleşmediği gibi pota içinde püskürme oluşabilir. Bu yüzden negatif basınç oluşumu istenen bir durumdur [26]. Metal akış borusu ucunda oluşan negatif basınç, sıvı metale etki eden dolaşım bölgesindeki gaz akış kuvvetlerinin toplamıdır [23]. Atomizasyon işleminde gaz akışı nozul geometrisine bağlıdır [19]. Yapılan araştırmalarda, süpersonik geometrili nozulların, sonik geometrili nozullara göre daha kuvvetli negatif basınç oluşumu gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir [26].



Şekil 3.4 Metal akış borusu çıkışında basınç oluşumu.

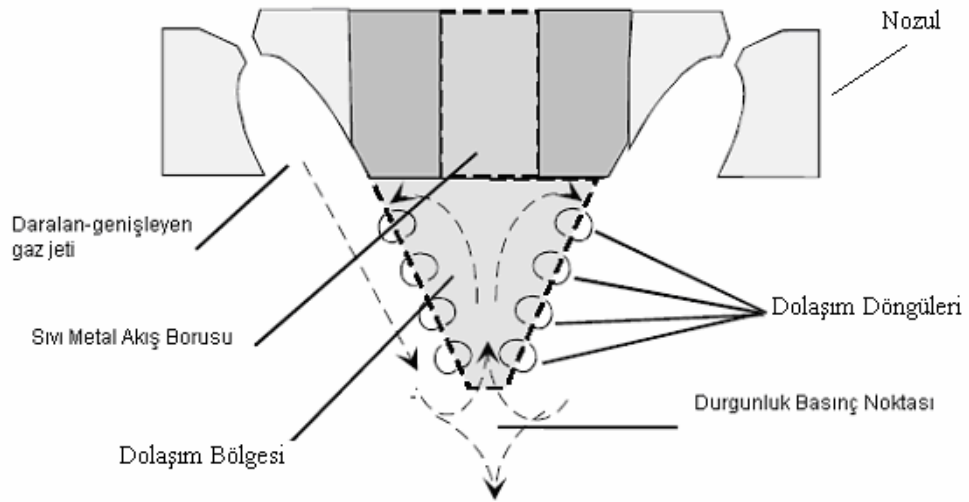
Negatif basınç oluşumuna etki eden en önemli faktörlerden biri metal akış borusunun nozul gaz çıkışına göre konumudur. Genel olarak metal akış borusu çıkıntı mesafesinin artması

sonucu daha etkili negatif basınç oluşumu gerçekleşir fakat borunun uzaması sıvı metalin donması problemini beraberinde getirir. Le ve Henein [9] yaptığı araştırmalarda, metal akış borusunun nozul çıkışının 10 mm altında olduğu konumda maksimum negatif basıncın oluştuğunu tespit etmişlerdir. Negatif basınç ölçümleri atomizasyon işleminin verimliliğinin araştırılması açısından oldukça önemlidir.

Yüksek basınçlı gaz atomizasyonunda negatif basınç bölgesi, metal akış borusu ucundaki sıvı metal beslemesini kontrol edebilir. Negatif basınç oluşumu daha dengeli bir sıvı metal beslemesi sağlar ve böylelikle toz boyut dağılımı daha kolay kontrol edilir [23].

3.3.2 Geçiş bölgesinin gaz atomizasyonuna etkisi

Gaz dolaşım bölgesi, atomizasyon gazı tarafından metal akış borusu ucunda oluşur. Dolaşım bölgesinde gaz, durgunluk noktasından metal akış borusuna doğru, merkez akış çizgisine paralel olarak akar ve metal akış borusuna ulaştığında radyal olarak ivmelenerek borunun dış yüzeyine doğru hareket eder (şekil 3.5) [17].

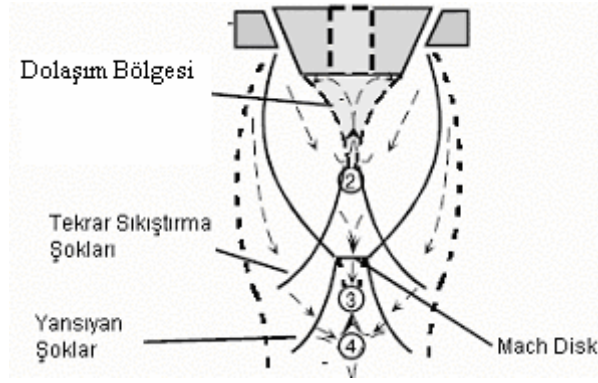


Şekil 3.5 Süpersonik jet etkili nozulda dolaşım bölgesinin şematik gösterimi [17].

J. Ting ve diğerleri [17] yaptıkları çalışmada yüksek basınçlı atomizasyon nozulunda belli bir basınç değerinde metal akış borusu ucunda ani bir basınç değişimi olduğunu tespit etmişlerdir. Bu ani basınç değişimini, metal akış borusunun alt bölgesinde meydana gelen ve gaz dolaşım bölgesinin kapanma basıncı (wake closure pressure) adı verilen basınçta, atomizasyon işlemini etkileyen geniş bir gaz genişleme bölgesi oluşmasına bağlamışlardır (şekil

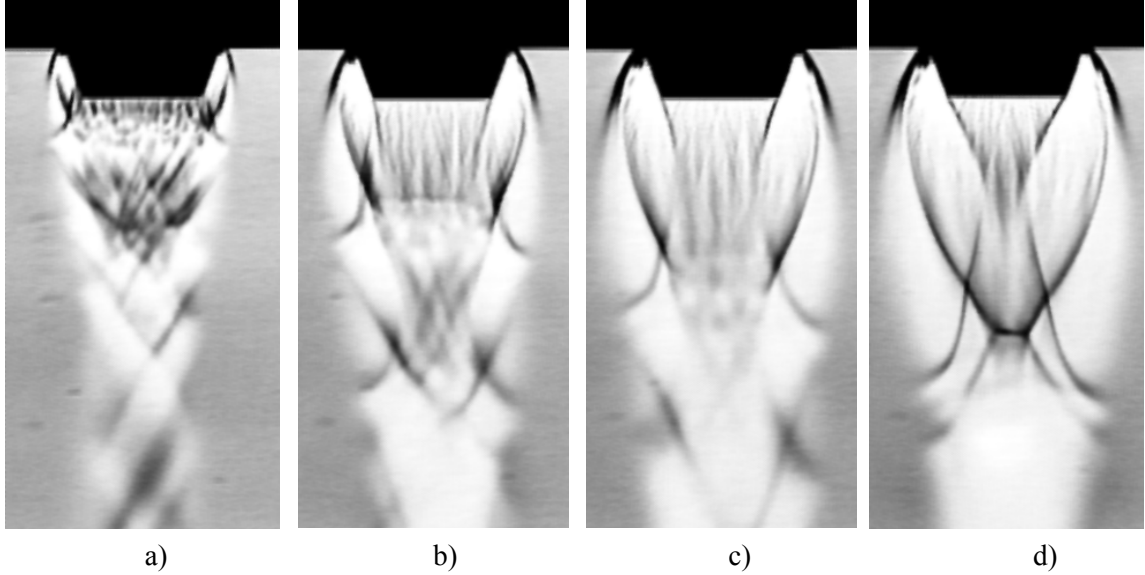
3.6). Sadece gaz ile yapılan deneylerde gaz dolaşım bölgesi kapanma basıncının üzerinde her ne kadar metal akış borusu ucundaki negatif basınç artsa da, metal ile yapılan atomizasyon işlemlerinde sıvı metal akış hızının azaldığını tespit etmişlerdir. Bu nedenle gaz/metal debi oranı artmış ve daha küçük toz boyutu ve daha dar bir boyut dağılımı elde etmişlerdir.

Dolaşım bölgesinin kapanma basıncına yakın veya hemen üzerindeki basınç değerlerinde hızla genişleyen gaz dolaşım bölgesinin boyutunu küçültür (şekil 3.6) [17]. Merkez çizgideki gaz basıncı, iç ve tekrar sıkıştırma şokları sonucu oluşan basınç değerlerine ulaşarak Mach disk oluşturur. Mach disk oluşumu sonucu dolaşım bölgesi kapanır ve bu duruma dolaşım bölgesinin kapanması durumu denir [17].



Şekil 3.6 Mach disk oluşumu [17].

S.P. Mates ve G.S. Settles [18] tarafından yapılan çalışmalar sonucu yukarıda anlatılan Mach disk oluşumuna benzer schlieren (şekil 3.7) görüntüleri elde edilmiştir. Schlieren görüntüleme tekniği, akış bölgesindeki şok dalgaları ve kesme düzlemleri gibi yoğunluk farklarının görüntülenmesinde kullanılan bir tekniktir. Farklı atomizasyon basınçlarında elde edilen görüntülerden de anlaşıldığı üzere basınç arttıkça şok dalgaları daha da kuvvetlenerek Mach disk oluşumuna sebep olmuştur (şekil 3.7-d) [18].



Şekil 3.7 Farklı atomizasyon basınçlarında oluşan akışların schlieren görüntüleri :

a)24 bar b)43 bar c)53.5 bar d)57 bar [18].

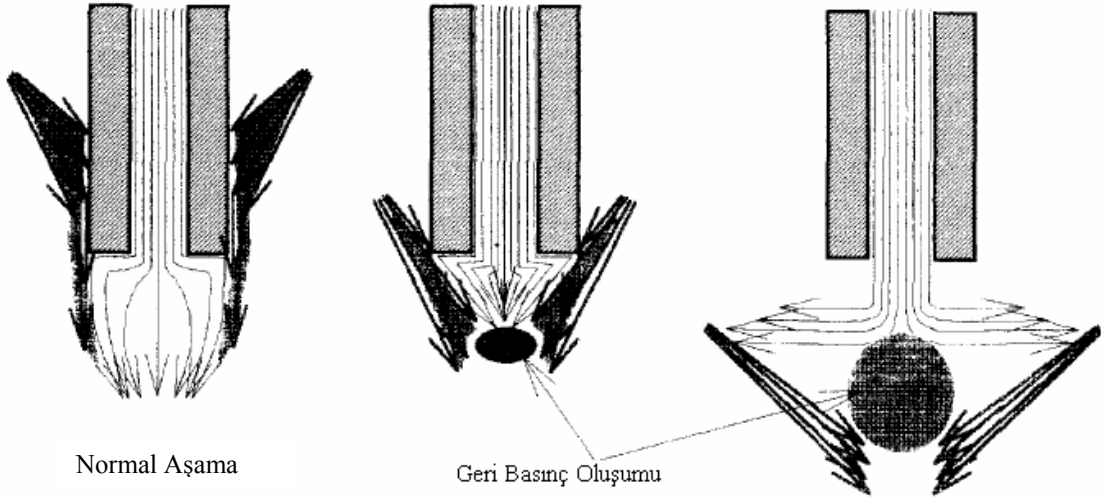
3.3.3 Geri basınç oluşumu

Atomizasyon işlemi esnasında akış borusunun ucunda oluşan basınç değerinin pozitif olması durumunda sıvı metal akışı yavaşlar hatta bazı durumlarda durur yada ters yönde akış özelliği gösterir [19].

Bu basınç değerinin atmosfer basıncından büyük olması durumunda gaz, akış borusu içerisine girer ve bu durum genellikle metalin katılmasına sebep olur. Bu duruma ters akış durumu denir [16].

Chen ve diğerleri [21] yaptığı araştırmalarda metal akış borusu çıkıntı mesafesinin değişmesi ile birlikte atomizasyon işleminde 3 farklı aşamanın gerçekleşebileceğini gözlemlemişlerdir (şekil 3.8). Metal akış borusu, nozul gaz çıkışının alt bölgelerinde yerleştirilmesi sonucu gaz boru çeperlerine çarpar ve bu çeperler boyunca hareket ederek sıvı metal ile buluşur. Bu aşamaya normal aşama denir. Metal akış borusu çıkıntı mesafesi azaldıkça atomizasyon hızı azalır ve sıfır olur. Bu aşama geri basınç oluşumu aşamasıdır. Bu aşamada gaz jetleri metal akış borusunun uç çevresinde buluşurlar ve sıvı metalin akmasına izin vermezler. Geri basınç oluşumu atomizasyon gaz basıncına, nozul geometrisine ve metal akış borusu çıkıntı mesafesine bağlıdır. Metal akış borusu çıkıntı mesafesinin daha da azalmasıyla

birlikte gaz jetlerinin buluşma noktası bir miktar aşağı yönde kayar. Bu aşamada da geri basınç bölgesi mevcuttur fakat metal akış borusunun hemen ucunda değil belli bir miktar alt bölgededir [21].



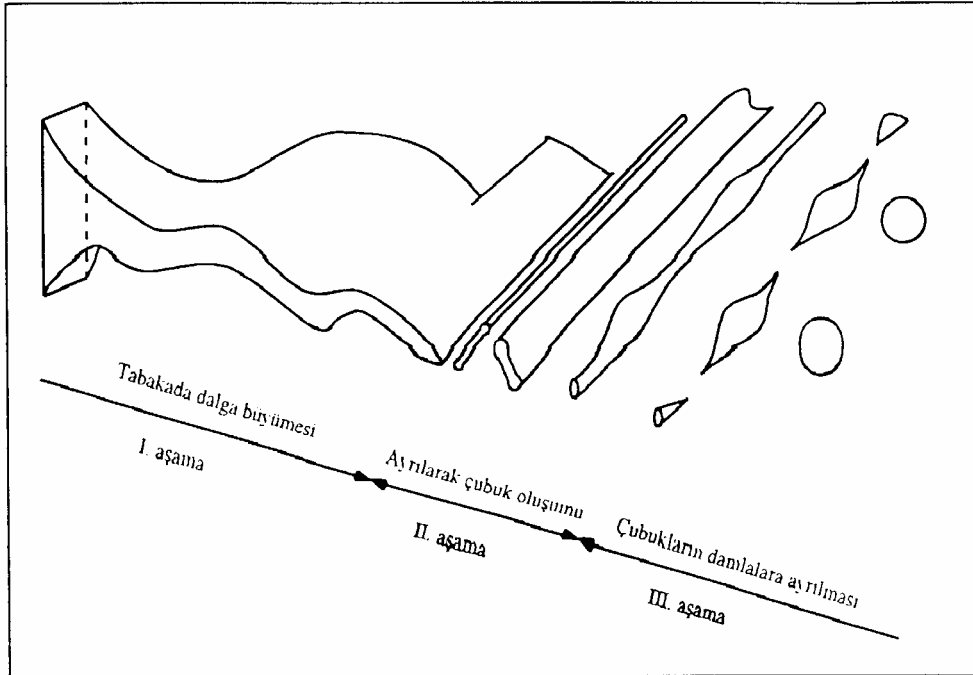
Şekil 3.8 Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi [21].

3.4 Atomizasyon Mekanizmaları

Atomizasyon işlemi genel olarak 3 aşamadan oluşur ;

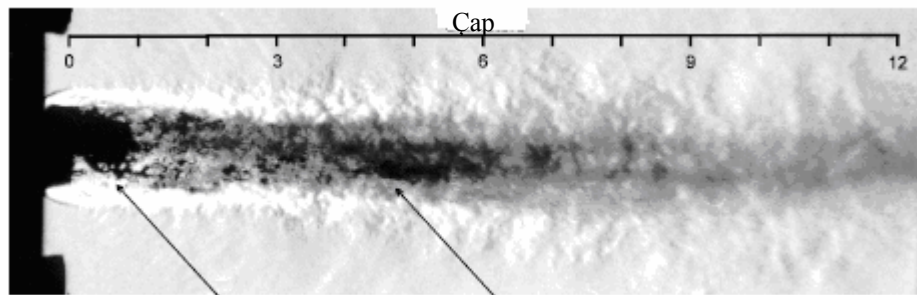
1. Birinci Aşama : Sıvı metalden tabakaların oluşması aşaması.
2. İkinci Aşama : Tabakalardan çubuk oluşması aşaması.
3. Üçüncü Aşama : Çubuklardan tanecik oluşumu ve katılaşma aşaması [11, 27, 28].

Dombrowski ve Johns [29] tarafından geliştirilen atomizasyon mekanizmalarının fiziksel modeli şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Sıvı metal yassı tabakasının bölünmesi ile damlacık oluşumu [29].

Bu modele göre tabaka üzerinde kritik bir genliğe ulaşına kadar dalgalar büyür. Sonra dalgaların tepe ve dip bölgelerinde yırtılmalar oluşur ve yarım dalga boyuna karşılık gelen kısımlardan kırılır. Kırılan bu kısımlar yüzey gerilmesinin etkisiyle kararsız çubuk haline gelerek damlacıklar oluşur [6].



Geçiş bölgesinde tabaka oluşumu.

Tabakadan çubuk oluşumu.

Şekil 3.10 Atomizasyon mekanizmasına ait bir görüntü [25].

Şekil 3.10'da verilen kalay atomizasyonunun schlieren görüntüsü yukarıda anlatılan atomizasyon mekanizmasını doğrulamaktadır. İkinci atomizasyon mekanizmasında henüz

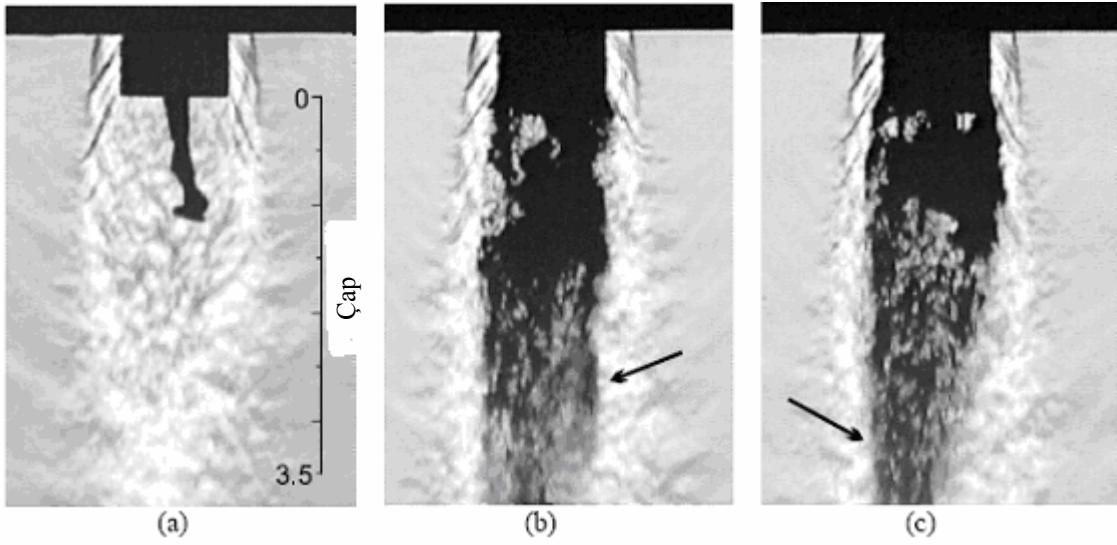
katılaşmamış taneciklerin katılaştıran taneciklerle teması sonucu uydulaşma olayı görülür. Uydulaşma toz özelliklerini olumsuz yönde etkilediği için istenmeyen bir durumdur.

Süpersonik ve sonik geometrili nozullar arasındaki en önemli fark süpersonik nozulda oluşan geniş geçiş bölgesi, ince toz oluşumunu nozul çıkışının daha alt kısımlarında gerçekleştirmesidir [25]. Ünal tarafından yapılan çalışmalarda birincil bölünmede yaklaşık 500 µm çaptaki damlacıkların oluştuğu; daha ince tozların ise ikincil bölünmenin ürünü olduğunu göstermiştir [29]. Süpersonik nozul, gaz enerjisinin daha iyi bir şekilde atomizasyon bölgesinin daha da alt kısımlarına gönderilmesini sağlar. Böylelikle ikinci mekanizmada parçalanmış iri parçacıklar daha etkili bir şekilde atomize olurlar (şekil 3.11).

Toz büyüklüğü için genel bir hesaplamanın mümkün olmamasına rağmen Lubanska, hava atomize demir, çelik ve kalay üzerine yaptığı çalışmalar sonucu, ortalama toz boyutu (d_{50}) için sistem ve malzeme değişkenlerine bağlı olarak boyutsuz ampirik bir formül geliştirmiştir. Gaz atomizasyonu ile üretilmiş tozların boyutlarını en iyi ifade eden denklem Lubanska'nın geliştirdiği boyutsuz ampirik formül aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d_{50}}{D} = K \left[\left(\frac{v_m}{v_g W} \right) \left(1 + \frac{M}{A} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Burada; D, sıvı metal demetinin çapını (µm); v_g , gazın kinematik viskozitesi (m^2/s); v_m , sıvı metalin viskozitesi (m^2/s); W, gazın Weber sayısı; M/A, metal/gaz debisi oranı (kg/dak:kg/dak) ve K, malzeme cinsine göre değişen 40 ile 50 arası bir katsayıdır [30].



Şekil 3.11 Süpersonik geometrili nozulda kalay atomizasyonunun schlieren görüntüleri. Oklar ince tanecikleri göstermektedir [25].

İyi bir nozul tasarlanırken, süpersonik gaz akışını mümkün olduğu kadar atomizasyon bölgesinin daha da alt kısımlarına gönderebilen ve buradaki iri parçacıkları daha etkili bir şekilde atomize eden bir gaz akışının gerçekleştirilmesine dikkat edilmelidir [25].