

# TOZ METALURJİSİ

# Giriş

Toz metalürjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri, dökümde olduğu gibi net şekilli parça üretimine imkan tanır. Fakat toz teknikleri, sadece düşük sıcaklıkta eriyen metallere uygulanan dökümden farklı olarak hemen hemen her malzemeye uygulanabilir.

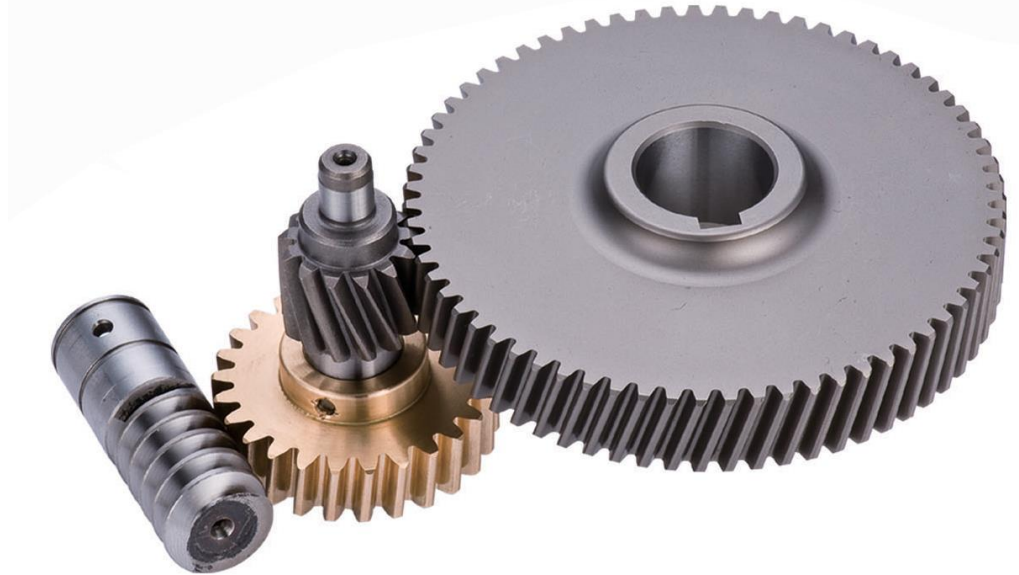
Bundan dolayı toz metalürjisi yoluyla üretilen ürünlerin pek çoğu; mesela kompozitler, yüksek sıcaklık seramikleri, bazı polimerler, bakırlı çelikler, refrakter metaller, geniş bir dağılım gösteren intermetalikler, sermetler ve karışık fazlı bileşimler, döküm yoluyla üretilemezler.



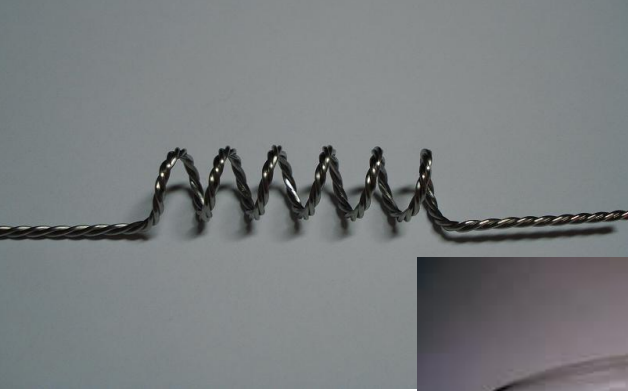
# Giriş

Toz teknolojileri, tekrar tekrar aynı ürünü kopyalamaya izin veren kalıp boşlukları sayesinde çok sayıda üretim yapılmasına imkan sağlarlar.

Serbest şekilli üretimlerde ise bu teknoloji tek bir ürünün elde edilmesine imkan tanır. Maliyet daima önemli aktörlerden biridir. Bundan dolayı karmaşık şekilleri son boyuta getirebilmek ve şekil verebilme özelliği önemli ölçüde ekonomik yarar sağlar. Ayrıca yüksek oranda malzeme kullanımı ve izafi olarak daha düşük enerji tüketimi sağlayan otomasyonun toz süreçlerinde kullanımı da ekonomik kazançlar sağlamaktadır.



# Giriş



Toz metalürjisi teknikleri ile üretilen mamuller her yerde kullanılır. Bu bölümde oldukça fazla örneğe yer verilecektir. Fakat kullanımın çokluğunu göstermek amacı ile aşağıdakilerin üretiminde tozların kullanımını düşününüz; yüksek şiddetli ışıklar, diş yenileme, yataklar, otomobil transmisyon milleri, zırh delici mermiler, elektrik temas elemanları, nükleer güç yakıt çubukları, ortopedik protezler, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balatları, len doldurulabilen piller, saat gövdeleri, elektronik kapasitörler ve jet motoru türbinleri. Açıkçası, tozlar her alanda kullanılmaktadır.

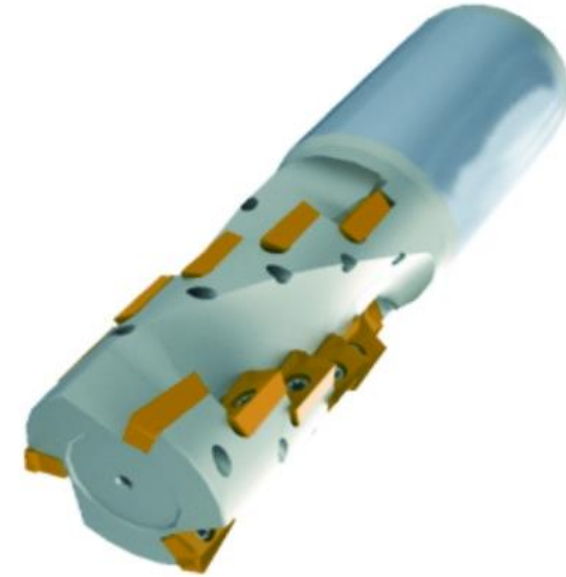


# Giriş



APM2 steel penetrator after impact with titanium armor

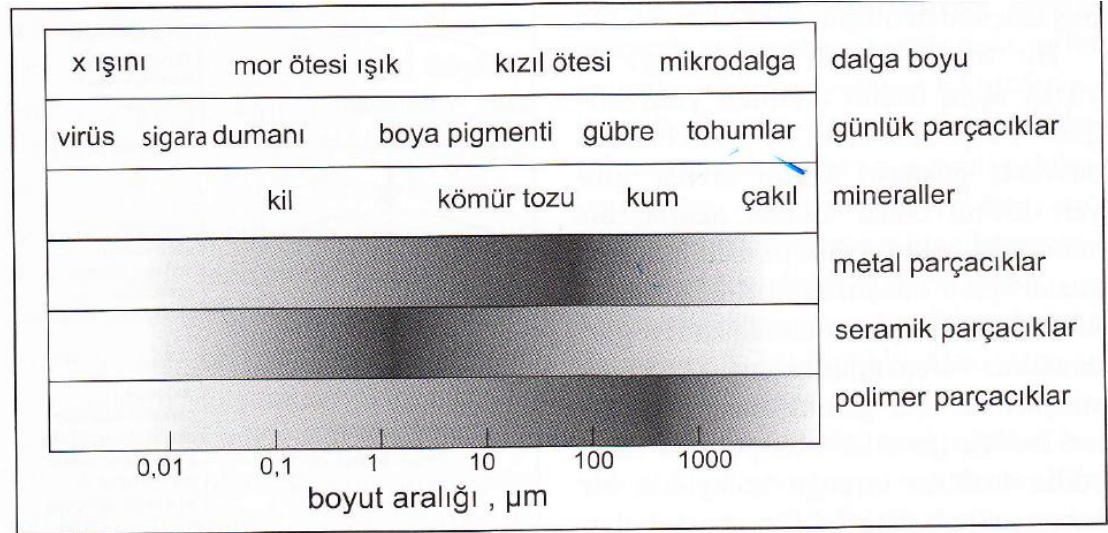
APM2 after impact with ceramic armor



# Giriş

Tartışmayı başlatmak için birkaç terim tanımlanmıştır. İlk olarak, parçacıklar katıların küçük ayrı bölümleridir. Parçacıklar virüsten kumtanesine kadar değişen pek çok boyutta olabilir. Şekil 1.1'de tipik mühendislik parçacıklarının (metaller, seramikler ve plastikler) büyüklük ölçeği bazı günlük nesnelerin boyutlarıyla karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

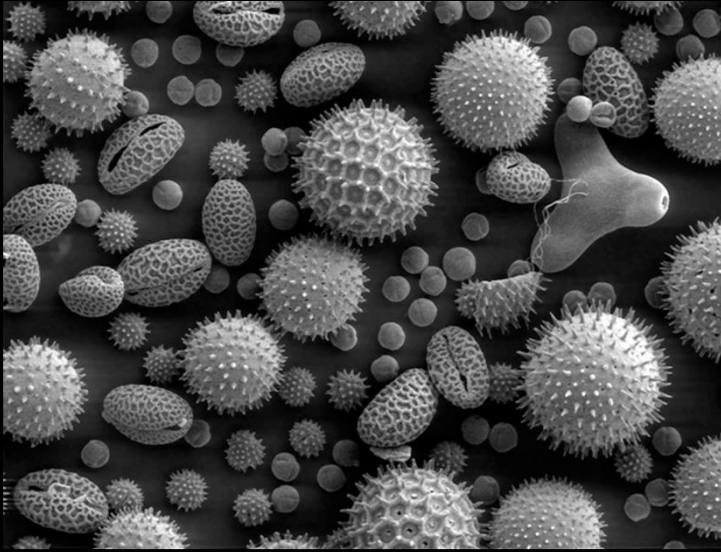
Parçacık boyutu için uygun birim,  $10^{-6}$  m olan, mikrometredir ( $\mu\text{m}$ ). Toz metalurjisinde kullanılan birçok mühendislik parçacığının boyutu 0,1 ila 200  $\mu\text{m}$  aralığında değişir, seramik parçacıklar genellikle daha küçükken, plastik parçacıklar daha büyüktür. Referans olarak, insan saçı tipik olarak 100  $\mu\text{m}$  aralığında ve boyalardaki pigmentler ise tipik olarak 1  $\mu\text{m}$  aralığında bulunur.



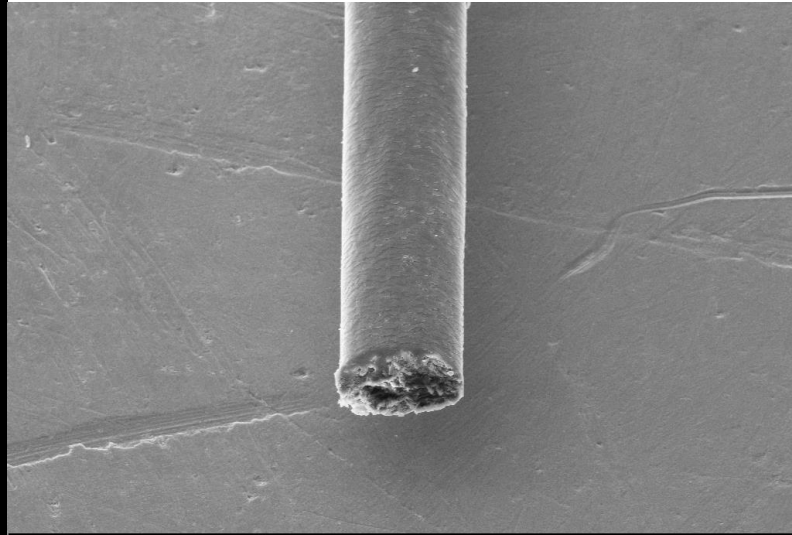
Şekil 1.1. Pek çok toz için boyut aralığının tipik mühendislik seramiği, metal ve plastik parçacık sistemleri ile ve günlük hayatta kullanılan tozlar ve boyut aralıkları ile karşılaştırılması.



# Giriş



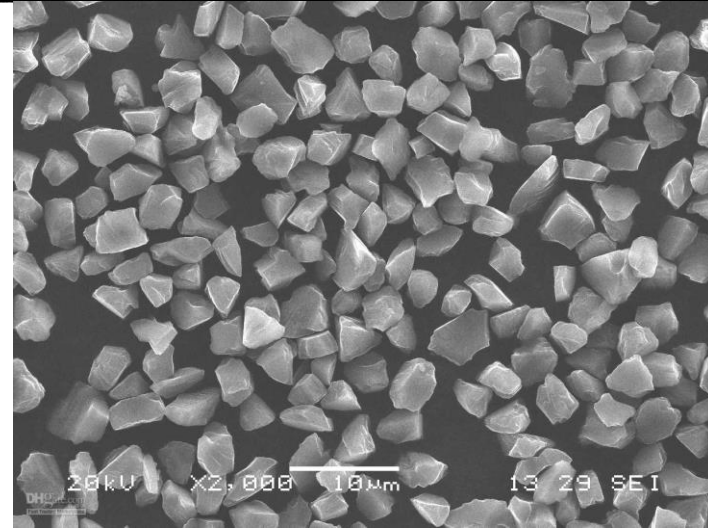
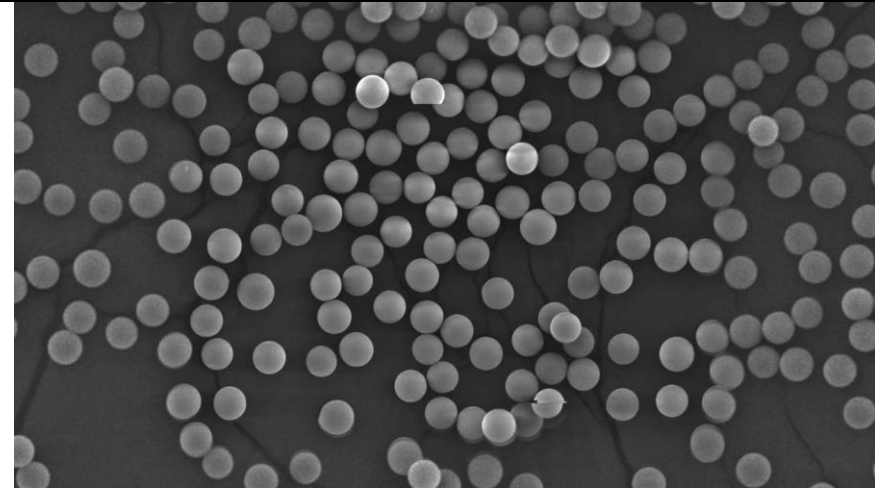
Polen Taneleri



MAG = 150 X  
EHT = 20.00 kV

100µm

Detector = SE1  
Date : 8 Apr 2003



20kV X2,000 10µm 13 29 SEI

Burada bahsedilen tozlar metaller, seramikler, intermetalikler değişik kompozitler veya sermetlerdir. Fakat geçtiğimiz yıllarda toz polimer kullanımında çok önemli gelişmeler olmuştur. Birçok mühendislik uygulamalarında arzu edilen alişilagelmiş özelliklere ulaşmak için, toz metalürjisinde kullanılan tozlar, fazların miktarı, boyut ve yerleri seçilmiş karışımlarıdır. Basit bir örnek olarak; otomobil piston kolunu oluşturan toz karışımı demir, bakır, grafit ve çinko stearat parçacıklarından oluşur.

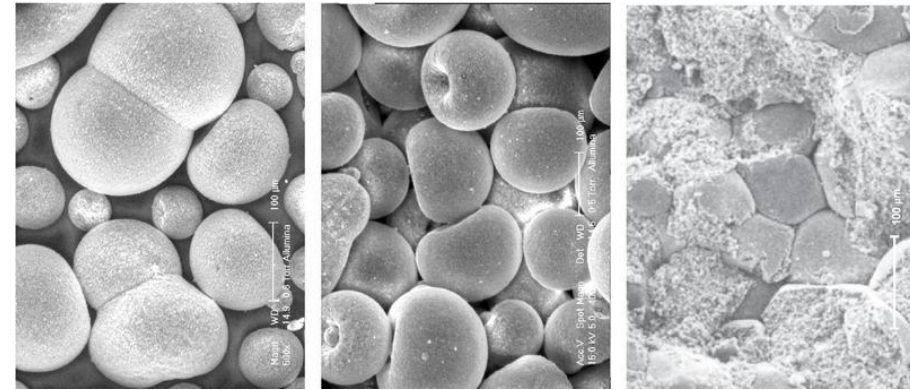
Benzer şekilde, birçok toz metalürjisi sistemleri kompozitlerdir ve üretimde kullanılan tozlar genellikle farklı parçacıkların karışımlarıdır. Parça retimi sırasında, tozlar bağlanarak bir katı oluşturur ve başlangıçtaki özelliklerini kaybeder. Bu noktada, farklı kristal bölgelerine tane adı verilir. Tozları oluşturmak için parçacıklar karıştırılır. Tozlar genellikle yerçekimi etkisiyle akarlar. Sinterlemeden sonra, yapı katı parça oluşturmak için bağlanmiş tanelerden oluşur.



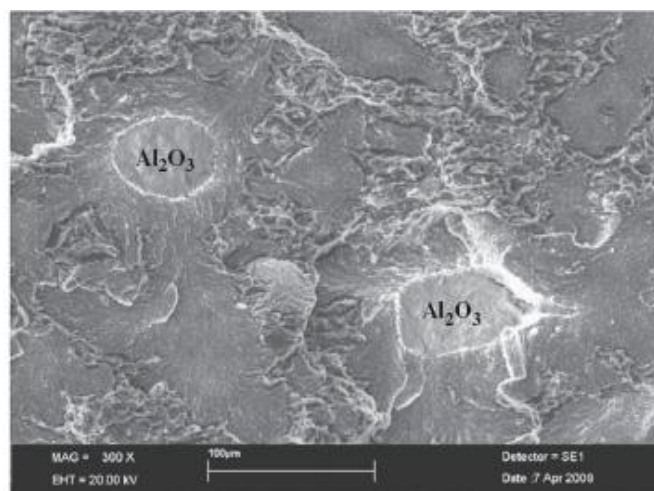
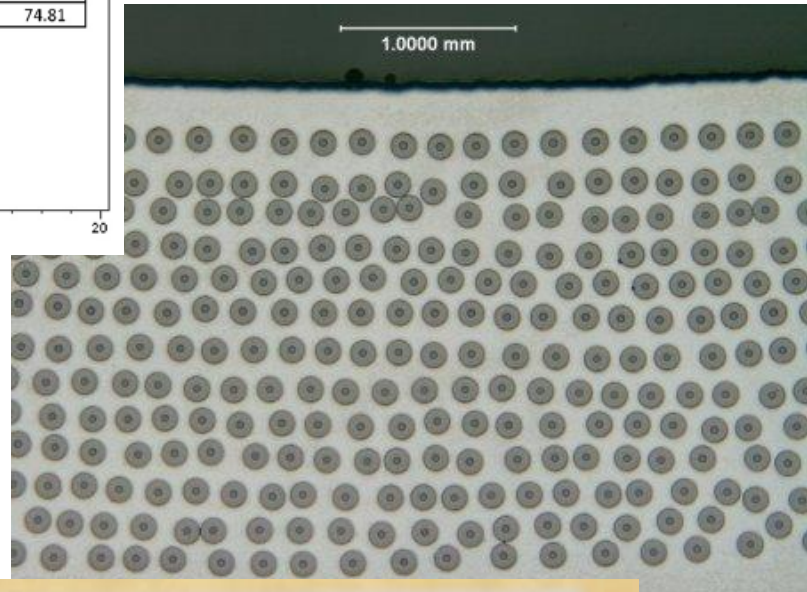
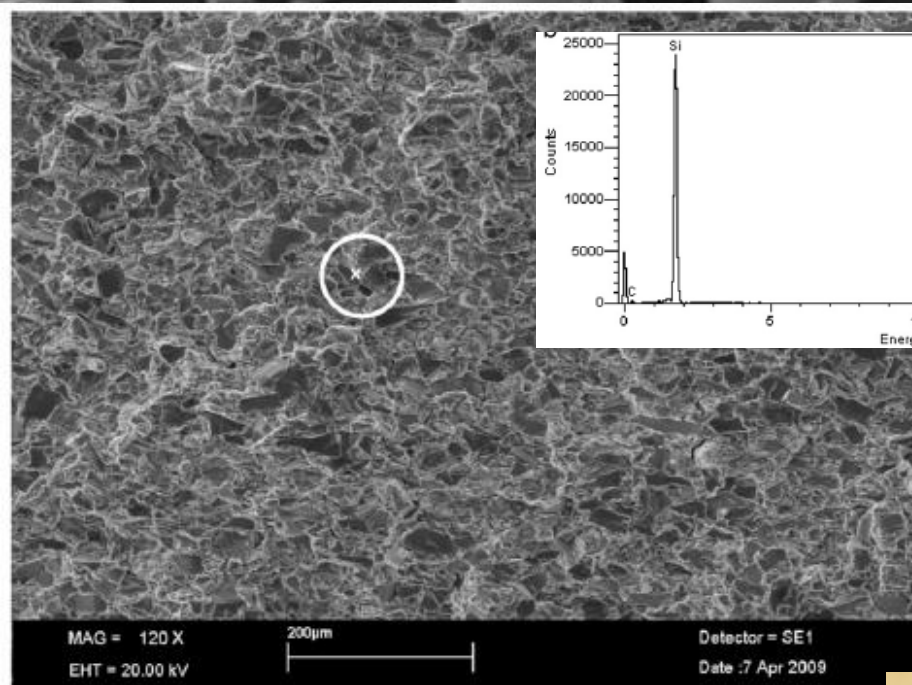
# Giriş

Bir tozun önemli bir özelliği de yüzey alanı hacim oranının yüksekliğidir. Parçacıklar katı ile sıvı arasında davranış gösterir. Tozlar sıvılar gibi yer çekimi etkisi altında akarak bir kabı veya kalıbı doldurur. Bütün tozlar gazlar gibi sıkıştırılabilirlik gösterir fakat deformasyon sonunda katılar gibi davranır. Parçacıklarda sertlik arttıkça sıkıştırmak için gerekli basınç da artar. Tozlara genellikle bir polimer ilave edilir, tozların birçoğu kolaylıkla bir parça şekline getirilebilir, ancak kolay deformasyona uğramaları beklenemez.

Bu sebepten dolayı şekillendirme ve sıkıştırma teknolojileri ham bir parçanın oluşturulmasında iki önemli yoldur. Sinterleme ısıl işlemi öncesi parçaya "ham" veya "yeşil" adı verilir. Dolayısı ile bir toz, özellikle de işleme yardımcı olan polimerler ile kolaylıkla şekillendirilebilir ve sintirlenmiş parça bir katı gibi davranır.



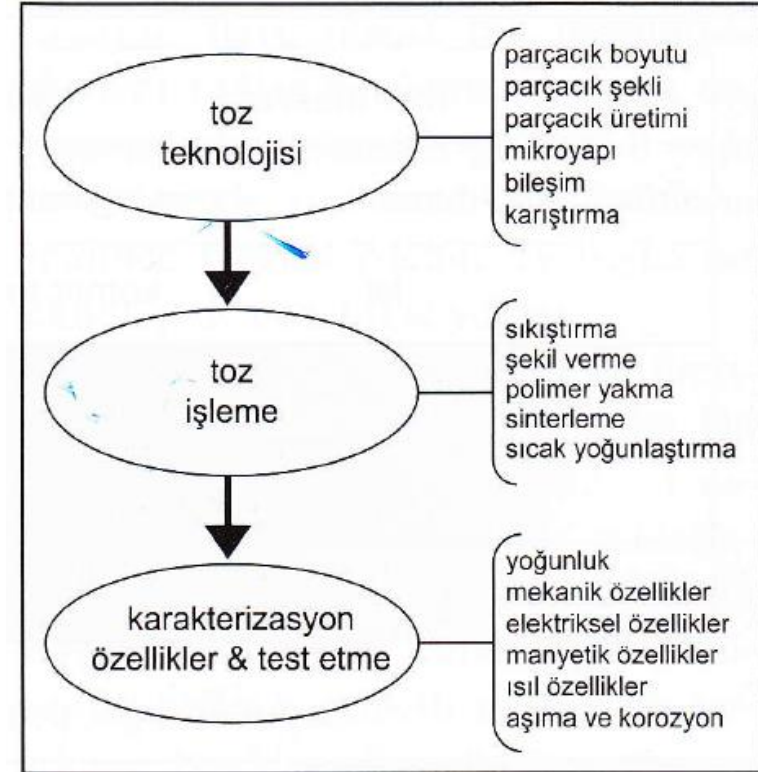
# Giriş





# Giriş

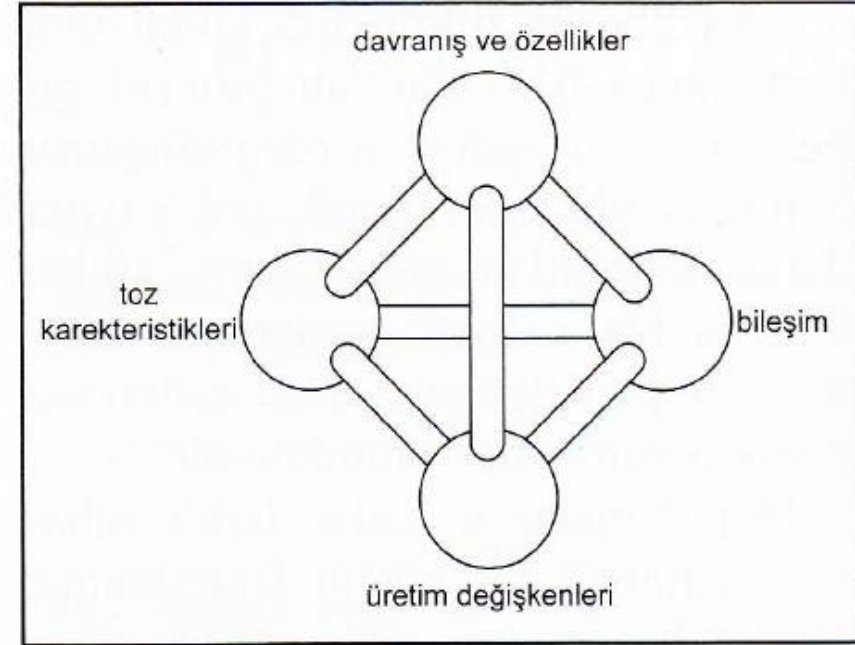
Toz metalürjisi, tozların işlem den geçirilerek yararlı mühendislik parçalarına dönüştürülmesi ile ilgilendir. Toz metalürjisinin ana adımları Şekil 1.2'de gösterilmiştir. İlk genel alan "toz teknolojisi" dir ve ilgi alanı parçacıkların yapısı ve karıştırma ile parça şekillendirme için besleme stoğu oluşturmaktır. Ağırlık verilmesi gereken konular tozların üretim teknikleri, sınıflandırma, karakterizasyon ve taşınmasıdır. Numune alma, güvenlik, ambalajlama ve taşıma diğer önemli konulardır. Tozların boyut ve şekillerinin incelenmesi toz teknolojisinin önemli ve sıkça başvurulan faaliyetlerindedir.



*Şekil 1.2. Toz metalurjisinde parça üretim iş akışı adımları. Her üç adım için de dikkat edilmesi gerekli hususlar şekilde verilmiştir.*

# Giriş

Toz tipi ve üretimi ile ilgili kararlar sıkıştırma ve sinterleme işlemlerinin kolaylaştırılmasına etki eder. Benzer şekilde, yoğunlaştırma sırası mikro yapıyı etkiler ve o da parça özelliklerini belirler. Şekil 1.3'teki dört yüzlü şekil bize bileşim, toz özellikleri, üretim değişkenleri ve ürün performansının birbirine bağlı olduğunu göstermektedir.



*Şekil 1.3. Bileşim, toz özellikleri, üretim değişkenleri ve ürün performansının birbirlerine bağlılığını gösteren dört yüzlü şekil.*



# Giriş

Seramik terimi yunancada keramos kelimesinden kaynaklanmaktadır ve kil esaslı sinterlenmiş çömlek anlamına gelmektedir.

Tozlardan metal parçaların elde edilmesi İnkalar tarafından mücevher üretimine uygulanmış, Mısırlıların demir tozlarını kullanmaları ise milattan önce 3000'li yıllara kadar uzanmaktadır.

Hindistan'daki 6,5 tonluk Delhi sütunudur. milattan sonra 375 ile 414 yılları arasında indirgenmiş demir tozlarından yapılmıştır.

1800'lü yıllarda tozlar, platinden laboratuvar gereçleri yapımında kullanılmıştır. Yaklaşık aynı tarihlerde madeni paralar presleme ve sinterleme ile bakır, gümüş ve kurşun tozlarından üretilmiştir.



Tozların kullanımında en önemli dönüm noktalarından biri, Edison için, tungsten tozları kullanarak dayanıklı lamba flamanı geliştiren Coolidge'e atfedilmektedir. Hemen ardından 1930'lu yıllarda sert metaller (WC-Co), gözenekli yataklar ve elektrik temas elemanları geliştirilmiştir.

Bugün, bu genişletme gayreti sayesinde silisyum karbür, renyum, titanyum diborür, zirkonyum, tantalyum, berilyum oksit ve titanyum gibi çok sayıda malzeme sadece tozdan oluşturulabilmektedir.

İlave olarak, çok yaygın olarak kullanılan alüminyum, silika, alümina, bakır, demir, paslanmaz çelik, bronz ve porselen gibi malzemeleri toz olarak temin etmek mümkündür.

## METİN KUTUSU 1.2

Edison ışık yayan flamanlı lambasını 1879 yılında sergiledi. Teknolojinin gelişmesi için, tekrarlanan aydınlatma çevrimlerinde ısıya dayanıklı ve ucuz filaman malzemesine ihtiyacı vardı. İlk seçimi karbonlaştırılmış doğal elyaflardı. İngilteredeki ilk denemelerde vakumlu cam kab içinde platin flaman kullanılmıştır. 1905'te Whitney wat başına 4 lümen aydınlatma veren metallenmiş karbon filaman geliştirdi. Aynı zamanlarda araştırmalar refrakter metallere yöneldi, önce tantalyum ve daha sonra tungsten. Tungsten'den ilk filaman, bağlayıcı yardımı ile tozdan ekstrüzyon ile üretildi. Bağlayıcı yakıldı ve tozlar sinterlenerek kırılğan filaman üretildi. Aydınlatma wat başına 8 lümen ile karbon filamanın iki katı oldu. Coolidge 1910 yılında tungsten tozundan sünek filaman üretti. Diğer malzemelere göre tungsten daha yüksek sıcaklıklara ısıtma imkanı verdiği için daha fazla aydınlatma yaptı. 1937 yılında sarımsı filaman icat edildi ve 1959 yılında filaman ömrünü uzatan halojen ilavesi yapıldı. Bugün, 1 kg tungsten tozundan 40 W'lık her biri 1000 saat ömürlü 150.000 filamanlı lamba üretilmektedir ve verimleri wat başına 13 lümen'dir. Tungsten filaman kullanımı son bulabilir: içinde sodyum-civa buharı olan alümina tüpler kullanan yeni elektrotsuz lambalar 30.000 saat ömürlü olup wat başına 135 lümen aydınlatma vermektedir.

Önceleri, toz esaslı parçalar sadece ucuzluk sebebi ile tercih edilirken, günümüzde tercih sebebi kalite, homojenlik, özellikler ve üretilebilirlik gibi hususları da içermektedir.

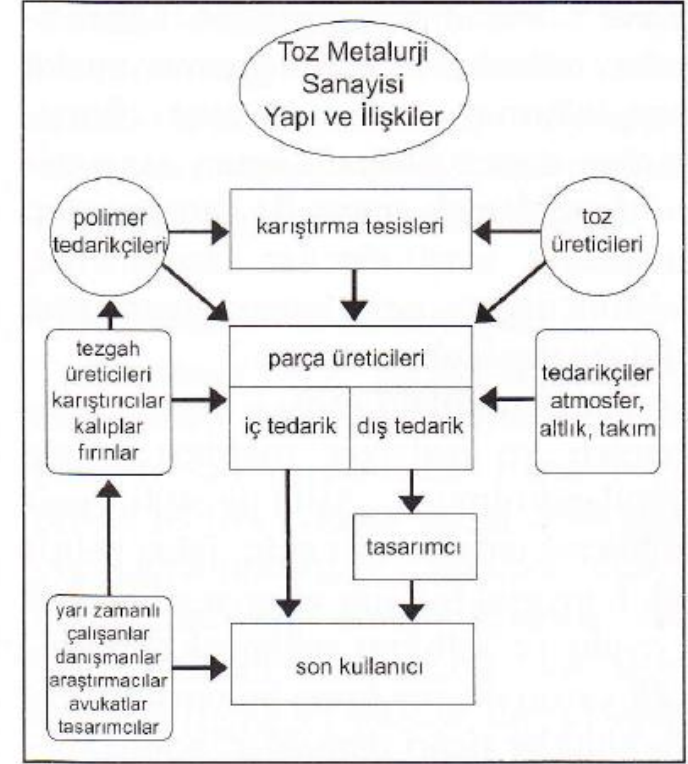
Yeni bileşimler, jet motorundan biyomedikal protezlere kadar farklı alanlarda istenilen özellikleri sağlamak amacı ile genellikle kompozit haldedir.

Örnek olarak, bilgisayar elamanlarındaki minyatürleşme silisyumda ciddi ısı atımı sorunu ortaya çıkarmıştır. Çözüm olarak ısı iletkenliği yüksek ve ısıl genleşmesi düşük ısı emici kompozitler geliştirilmiştir. Bu kompozitler sadece tozdan üretilebilmektedir.



# Giriş

Parça üretimi merkezi faaliyettir; içeride üretilenler ve dışarıdan tedarik edilenler olarak ikiye ayrılır. Bazı firmalar, elektrik güç sistemleri, iş makineleri, kesici takımlar ve otomotiv parçaları gibi toz metalürji ürünlerini kendi kullanımları için üretirler. Diğer alternatifler ise jet motorları, kol saatleri, lamba ampulleri, silah mühimmatları, yemek takımları, petrol kuyusu matkapları, diş dolguları, cerrahi takımlar, bujiler, bilgisayarlar ve çelik döküm sistemleridir. Sanayi çoğunlukla malzemelere ve üretim yöntemlerine göre sınıflandırılır.



*Şekil 1.4. Endüstriyel organizasyon şeması. Parça üretimi ana odak noktasıdır ve iç veya dış üreticilerden tedarik edilebilir. Tezgâh satıcıları, malzeme tedarikçileri ve çeşitli organizasyonlar destek amacı ile kullanılır.*



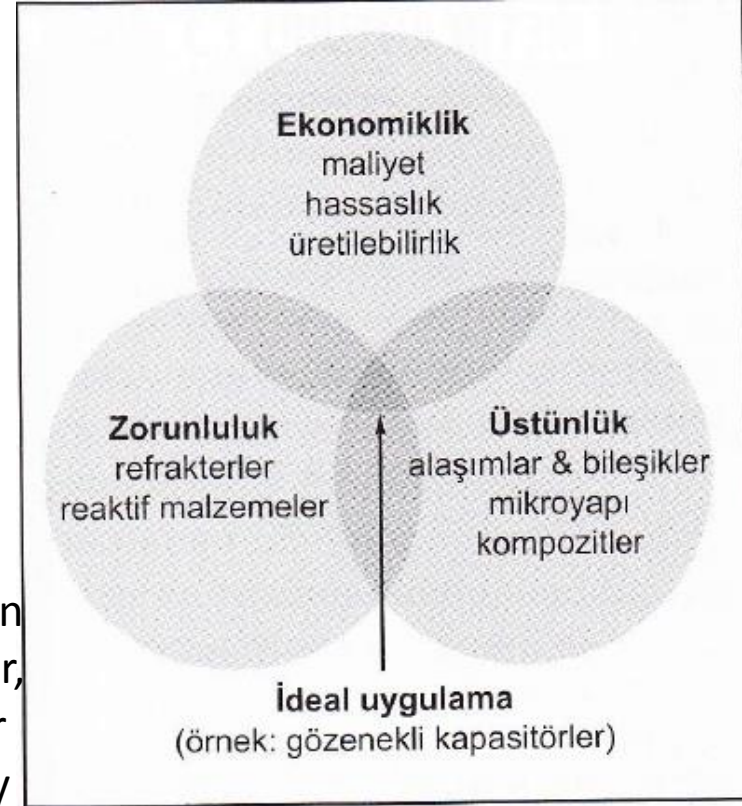
# Giriş

Toz metalürjisinin başarısına birçok özellik katkıda bulunmaktadır. Üç anahtar etken; maliyet, özellikler ve reaktivitedir.

Bunlardan ilki karmaşık geometrili parçaların ekonomik üretimine dayalı pek çok uygulamadır. yataklar, supap yuvaları, emisyon algılayıcıları, katalitik konvertörler, darbe emiciler, bujiler, piston kolları, zincir dişlisi ve pek çok motor zamanlama parçaları.

Toz metalurjisi ürünlerinin kullanılması için pek çok üstün özellik ve mikroyapısal uygunluk vardır. gözenekli filtreler, oksit dağılımlı güçlendirilmiş türbin alaşımları, sermetler (seramik-metal kompozitleri), fonksiyonel tabakalı yapay kemikler (metal-seramik,) temas alaşımları (bakır-krom) ve tungsten karbürden sert kesici takımlar verilebilir.

Diyagramında gösterilen son daire zorunluluk uygulamalarına karşılık gelmektedir. Bu malzemelerin diğer tekniklerle üretilmeleri oldukça zordur.

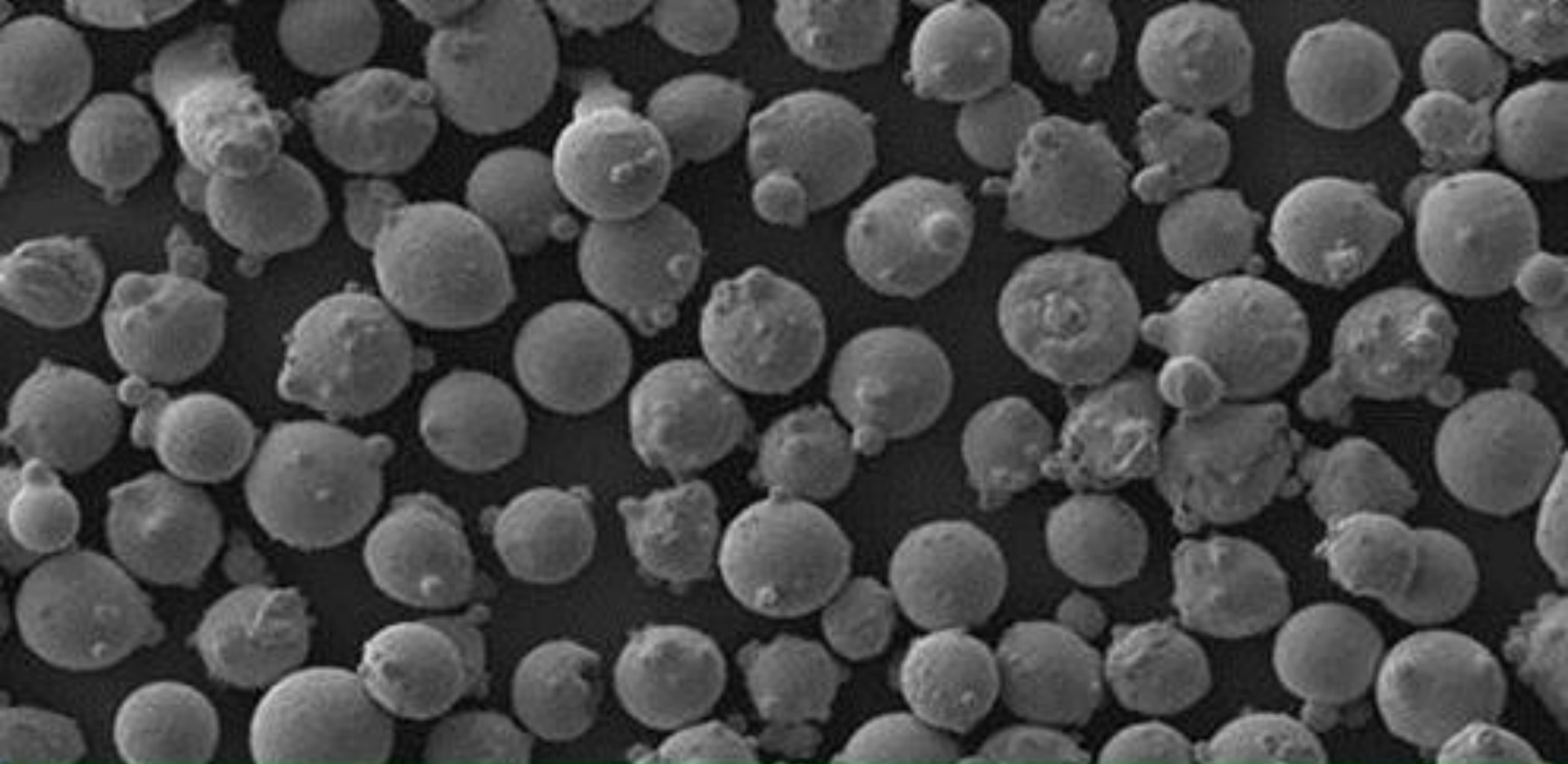


*Şekil 1.5. Toz metalurjisi tekniklerinin kullanılmasının üç ana sebebinin Venn şeması olarak gösterilişi. Üç dairenin ortak kesim alanı toz metalurjisi tekniklerinin ideal uygulama alanını gösterir, elektronik kapasitör üretimi gibi.*

## Gelecekteki Beklentiler

Geçmişte toz teknikleri kullanılarak elde edilen başarılar maliyet düşüklüğünden kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak maliyeti düşük tozlar daha yaygın kullanılmaktadır.

- Düşük maliyetli malzemelerden hassas, yüksek kaliteli yapısal parçaların çok miktarda üretilmesi,
- Tam yoğunluk ve güvenilirliğin ön planda olduğu yüksek performanslı malzemelerin üretilmesi
- İşlemi zor olan homojen mikroyapılı, tam yoğunluklu ve yüksek performanslı alaşımların üretilmesi
- Özel alaşımlardan, tipik olarak karışık fazlı kompozitlerin, ekonomik olarak sıkıştırılması
- Amorf, mikrokristalli, nano ölçekli veya yarı kararlı alaşımlar gibi denge durumunda bulunmayan malzemelerin sentezlenmesi
- Benzersiz içeriğe sahip, karmaşık, sıra dışı ve işlevli parçaların üretilmesi.



# Toz Karakterizasyonu



# Toz Karakterizasyonu

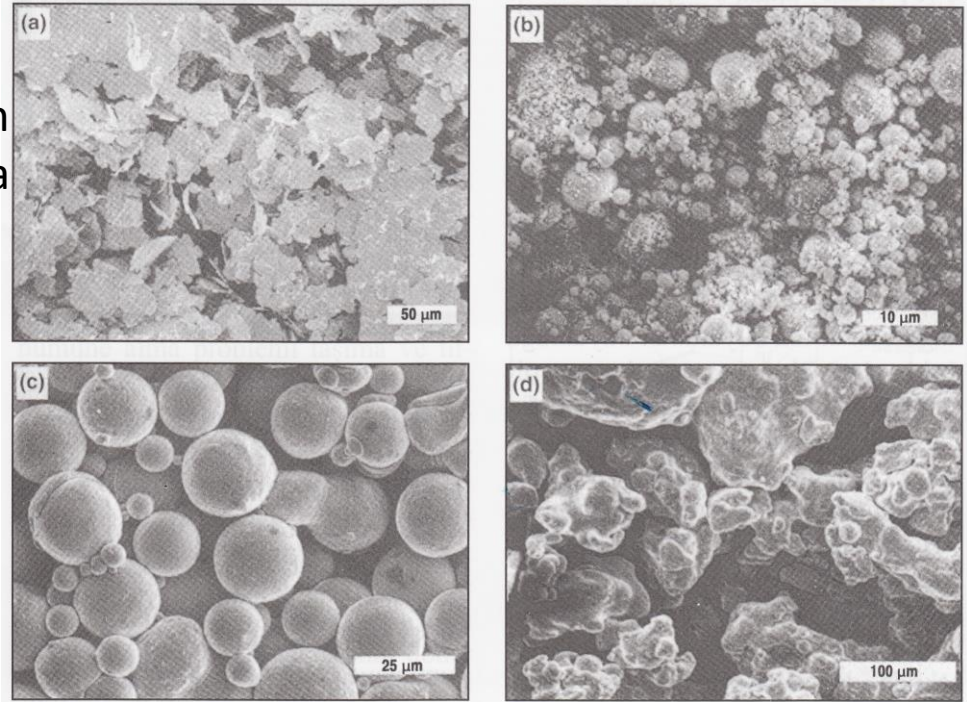
Toz metalurjisi teknolojileri parçacıkların bir araya gelmesiyle oluşan tozlarla başlar. Yoğunlaştırma işleminde önemli bir girdi olması nedeniyle tozun iyi anlaşılması gerekir. Teknik detaylar oluşturulurken işlem kontrolünün sürdürülmesinde toz özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin ürün performansını nasıl etkilediğinin bilinmesi önemlidir.

Parçacık, tozun bölünemeyen en küçük birimi olarak tanımlanır.

Toz işleme teknolojileri genellikle dumandan daha büyük ( $0,01-1 \mu\text{m}$ ), fakat kumdan daha küçük ( $0,1-3 \text{ mm}$ ) parçacıklarla ilgilenir.

Her bir toz, yoğunlaştırma sırasında farklı tepki verir.

- 1) Parçacık boyutu ve dağılımı,
- 2) Parçacıkların topaklanması
- 3) Yüzey alanı,
- 4) Parçacıklar arası sürtünme,
- 5) Akış ve paketleme,
- 6) İçyapı,
- 7) Bileşim, homojenlik ve kirlilik,

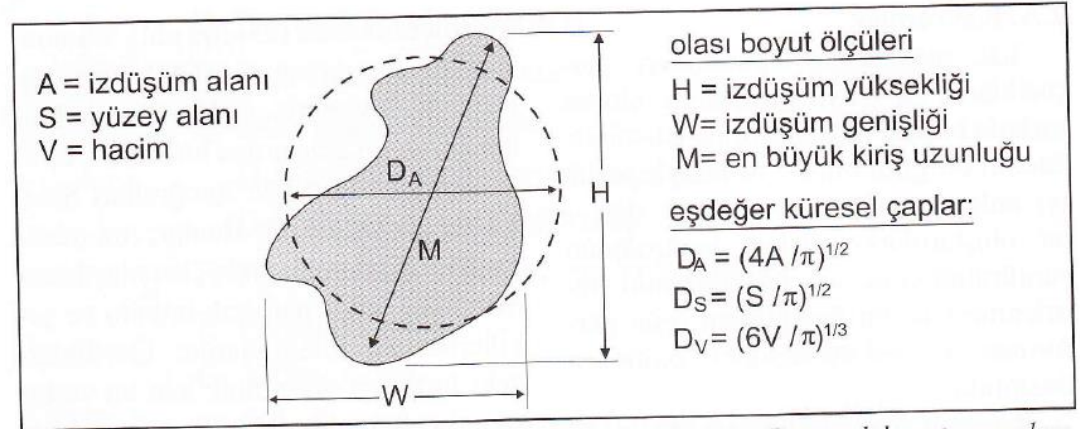


*Şekil 2.1. Toz metalurjisi uygulamalarında karşılaşılabilecek farklı toz boyutları ve şekillerine ait örnekler: a)  $50 \mu\text{m}$  genişliğinde pul şeklinde tantalyum tozları, b)  $2 \mu\text{m}$  çapında topaklanmış küresel silisyum nitrit tozları, c)  $20 \mu\text{m}$  çapında küresel paslanmaz çelik tozları, d) yaklaşık  $100 \mu\text{m}$  uzunluğunda düzensiz şekilli demir tozları.*



# Toz Karakterizasyonu

Şekil 2.2'de şematik olarak verilen yuvarlak fakat düzensiz şekilli parçacığı göz önüne alalım. Ölçülen özelliğe bağlı olarak toz boyutunun büyüklüğü farklı olur. Olası bazı toz boyutu ölçümleri şekil üzerinde gösterilmiştir, Parçacığı küre olarak kabul etmek yaygın bir uygulamadır. Böylece parçacık boyutunu belirtmek için sadece çap yeterlidir. Ancak eşdeğer küre çapı; alan, hacim, kütle veya ölçülen başka bir özelliğe dayandırılabilir.



**Şekil 2.2.** Yuvarlak fakat düzensiz şekilli parçacığın izdüşümü. Parçacık boyutunun olası altı ölçüsü gösterilmiştir. Bunlardan üçü izdüşüm boyutları, diğer üçü ise eşdeğer küresel çaplar ile ilgilidir.

# Toz Karakterizasyonu

## Toz Numunesi Alma

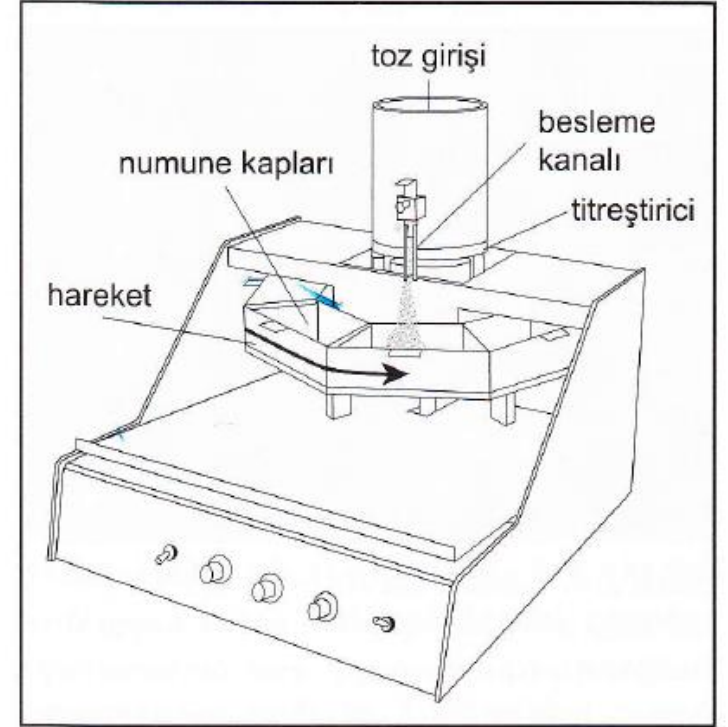
İlk yapılacak iş, analiz için temsil edici toz numunesi almaktır. Bu durum sanılandan daha zor bir iştir, Modern test cihazları tonlarca tozdan oluşan bir üretim partisinden sadece birkaç gram numune kullanabilir. Toz partisinin kabul veya ret edilmesi çok az bir numuneye bağlıdır. Bu yüzden numune, partinin tamamını temsil etmelidir, Parçacık şekli küresel varsayıldığında, 1 g içindeki parçacıkların sayısı, parçacık boyut ve malzeme yoğunluğuna bağlıdır.

**ÇİZELGE 2.1. Tek Boyutlu Alüminyum, Demir ve Tungsten Tozlarına ait 1 g'lık Numunelerin İçindeki Parçacıkların Sayısı**

parçacık çapı, $\mu\text{m}$	malzeme (teorik yoğunluk, $\text{g/cm}^3$ )		
	Al (2,70)	Fe (7,86)	W (19,3)
0,01	$7,0 \times 10^{17}$	$2,4 \times 10^{17}$	$9,9 \times 10^{16}$
1,0	$7,0 \times 10^{11}$	$2,4 \times 10^{11}$	$9,9 \times 10^{10}$
1000	$7,0 \times 10^2$	$2,4 \times 10^2$	$9,9 \times 10^1$

# Toz Karakterizasyonu

Numune alma hataları bazı basit tedbirler ile önlenabilir. Mümkün olduğunca, toz numuneler hareketli parçacık demetinden alınmalıdır. Çok sayıda küçük numune almak en iyisidir. Pek çok numune alma problemi taşıma ve titreşimden kaynaklanmaktadır. Titreşim parçacıkları boyutlarına göre büyükler üstte, küçükler altta olacak şekilde ayırabilir. Taşıma veya titreşimden sonra numune almak için toz partisi karıştırılmalıdır. Ayrıca, bir çok noktadan küçük numuneler alınmalı ve karıştırılmalıdır. Endüstriyel testler, en düşük numune alma hatalarını döner bir numune bölücü kullanıldığında olduğunu göstermektedir.

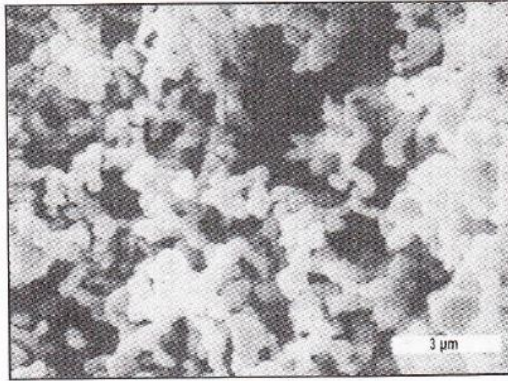


*Şekil 2.3. Döner numune bölücü, tozu çok sayıda küçük ve rastgele numunelere ayırmak için kullanılır. Yeterince küçük son numuneye kadar her numune tekrar bölünebilir.*

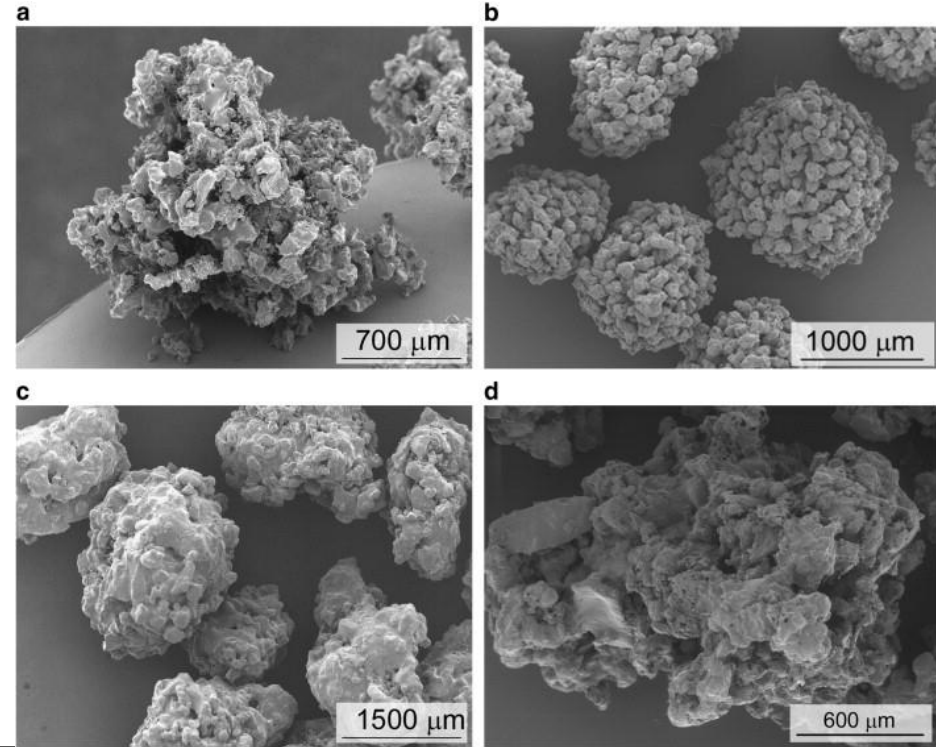
# Toz Karakterizasyonu

## Topaklar ve Agregalar

Parçacıkların çoğu kohesivdir ve doğal olarak birbirine yapışır. Şekil 2.4'te buna iyi bir örnek gösterilmiştir. Toz özelliklerinin belirlenmesi için parçacık kümelerini ayırmak veya dağıtmak bazı durumlarda zordur. Böyle durumlarda çok sayıdaki küçük parçacıklar, doğru olmayan bir biçimde büyük bir parçacık gibi ölçülür. Bunun sorumlusu, parçacıkların topaklanmasına sebep olan yüzey nemidir. Bu nedenle boyut analizinden önce, yüzeydeki nemden kaynaklanan kılcal kuvvetleri önlemek için parçacıkların bir sıvı içinde dağıtılması tercih edilir.



*Şekil 2.4. Tantalum tozunda açıkça görüldüğü gibi, topaklanma küçük boyutlu parçacıklarda yaygındır. Her bir tane boyutu yaklaşık 0,3 µm olmasına rağmen, topaklanmış boyut oldukça büyüktür, 35 µm civarı. Ölçüm öncesi yeterli dağıtma yapılmadığında, parçacık boyutu analiz tekniklerinin çoğu toz boyutu yerine topak boyutunu verir.*





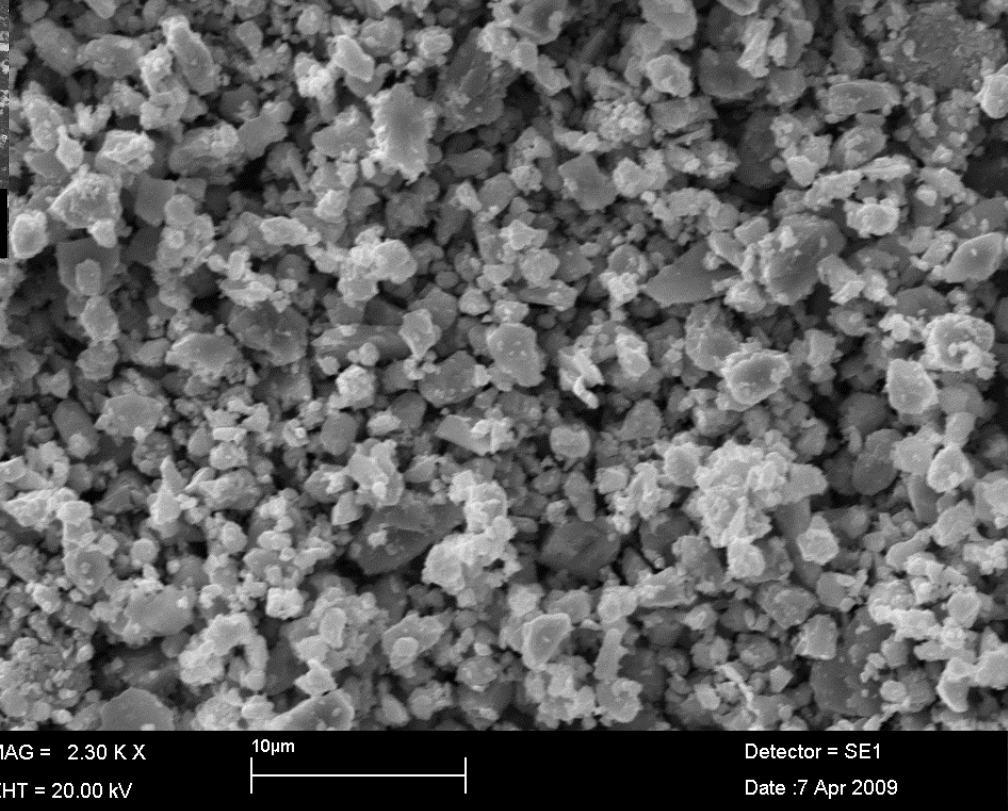
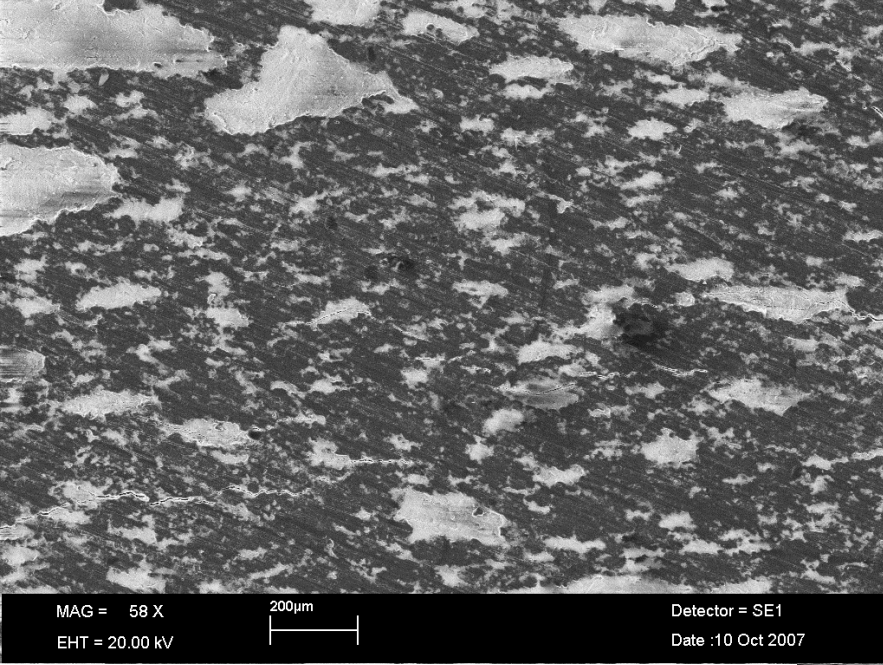
# Toz Karakterizasyonu

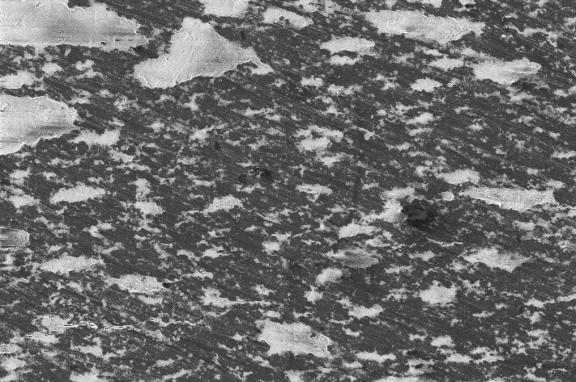
## Dağılım

Bir tozun boyutunu veya diğer özelliklerini doğru olarak belirlemek için, tozun uygun bir biçimde dağıtılması gerekir. Boyutla ters orantı kuralına göre, dağıtma işlemi parçacık boyutu ne kadar küçük olursa o kadar güçleşir.

Bir çok parçacık için yüzey aktifleştiren sıvılar, mekanik veya ultrasonik çalkalama; parçacıkların dağıtılması ve özelliklerin doğru olarak belirlenmesinde etkili olabilir. Özellikle 100  $\mu\text{m}$ 'den daha küçük parçacıklar, dağıtma işlemine direnç gösteren yüksek çekim kuvvetlerine sahiptirler. Önemli derecede topaklanmaya neden olan kılcal kuvvetler, ağırlıkça %0,1 gibi oldukça küçük nem düzeylerinde oluşur. Nem topaklanmaya neden olduğu için, toz kurutma işlemi genellikle iyi bir ilk adımdır. Tozu su, alkol veya diğer bir çözücü ile tamamen doyurmak başka bir seçenektir. Daha sonra dağıtıcı sıvılar, tozları birbirinden uzaklaştırmak için sulu çamura eklenir. En yaygın dağıtıcı sıvılar, yüklü anyonik veya katyonik terminal grupları olan karbon zincirlerine sahip küçük polar moleküllerdir.

# Toz Karakterizasyonu

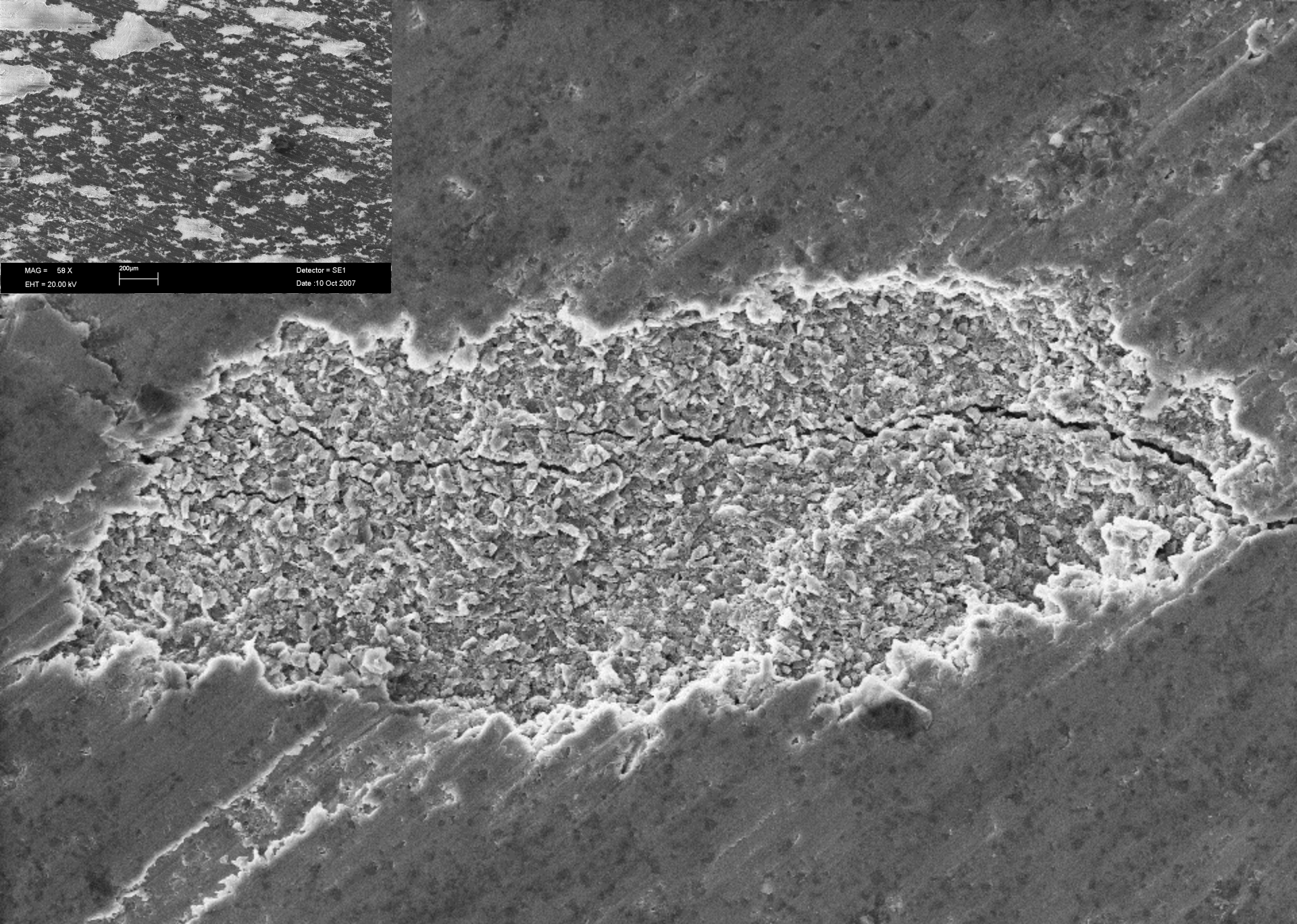




MAG = 58 X  
EHT = 20.00 kV



Detector = SE1  
Date :10 Oct 2007



MAG = 230 X



Detector = SE1



# Toz Karakterizasyonu

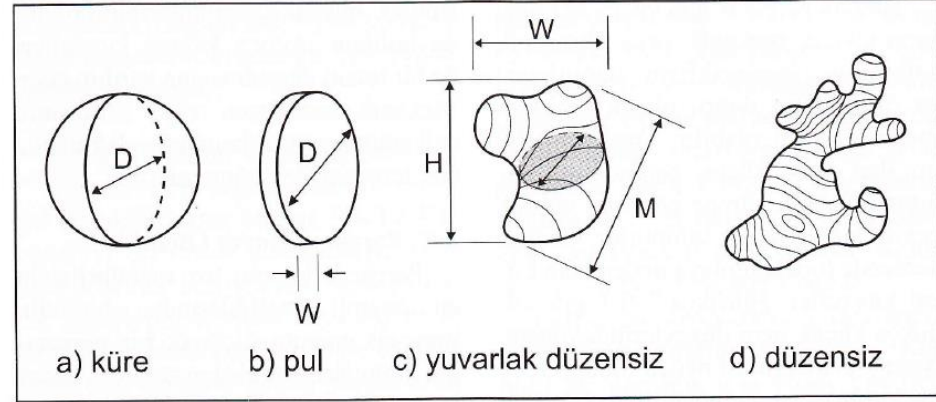
## Parçacık Boyut Ölçümü

Parçacık boyutu toz metalurjisinin en önemli özelliklerinden birisidir. Parçacık boyutu ölçümü, bir parçacığın boyutlarının belirlenmesidir. Ancak bu belirleme ölçüm tekniğine, ölçülen özgül parametreye ve parçacık şekline bağlıdır. Parçacık boyut analizi çeşitli tekniklerle gerçekleştirilebilir. Ancak, ölçülen parametrelerdeki farklılıklar nedeniyle, çeşitli parçacık boyut analiz tekniklerinin genellikle aynı sonucu vermediği bilinmelidir.

Parçacık boyutunu ölçen cihazların çoğu tek bir geometrik parametreyi ölçer ve parçacık şeklinin küresel olduğunu kabul eder. Parçacık yizey alanı, izdüşüm alanı, en büyük uzunluk, en küçük kesit alanı veya hacmi, analizlerde genellikle kullanılan parametrelerdir. Sonuçları yeterince anlamak için, varsayılan parçacık şekli ve ölçülen parametre ile ilgili ek bilgiler gereklidir.

# Toz Karakterizasyonu

Küresel bir parçacık için boyut tek bir parametre olup, çap olarak verilir. Ancak, parçacık şekli daha karmaşık olduğunda, boyutu tek bir parametre ile belirlemek zordur. Yassı veya pul şeklinde bir parçacık göz önüne alındığında (b); boyutu tanımlamak için çap ve genişliğin her ikisi de gereklidir. Şekil daha düzensiz olduğunda, olası boyut parametrelerinin sayısı artar.



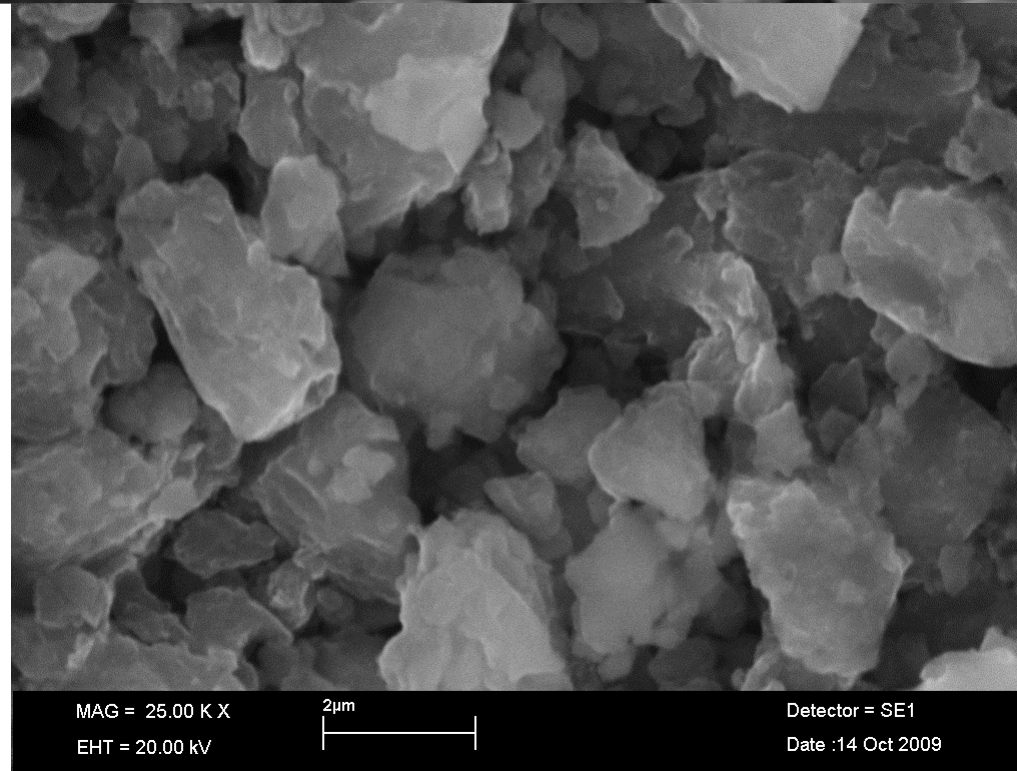
Şekil 2.5. Parçacık boyutu ölçümündeki zorlukların gösterilişi. Olası boyut ölçülerinin sayısı parçacık şekli karmaşıklıkça artar.

## ÇİZELGE 2.2. Şekil 2.2'de Gösterilen Parçacığa Ait Parçacık Boyut Belirlemelerinin Karşılaştırılması

ölçüm	sembol	değer
<i>doğrusal ölçüler</i>		
izdüşüm yüksekliği	$H$	1,00
izdüşüm genişliği	$W$	0,72
en büyük giriş uzunluğu	$M$	1,03
<i>eşdeğer küresel çaplar</i>		
izdüşüm alanı	$D_A$	0,76
yüzey alanı	$D_S$	1,45
hacim	$D_V$	0,95

# Toz Karakterizasyonu

Mikroskop ile inceleme  
Parçacık boyutu ölçmenin evrensel yolu, sayısallaştırılabilen veya dijital ortama aktarılabilen bir görüntü elde edebilmektir. Basit bir yaklaşım, parçacık görüntülerinin üzerini çeşitli boyutlarda dairelerle örterek, her bir boyuttaki parçacık adedini saymaktır. Günümüzde bu otomatik görüntü analizi ile bir mikroskopta gerçekleştirilebilir. Bu analizi elle yapmak çok yorucu olduğundan, istatistiksel olarak anlamlı boyut belirleme, genellikle mikroskoba bağlı bilgisayarlar ile gerçekleştirilir.



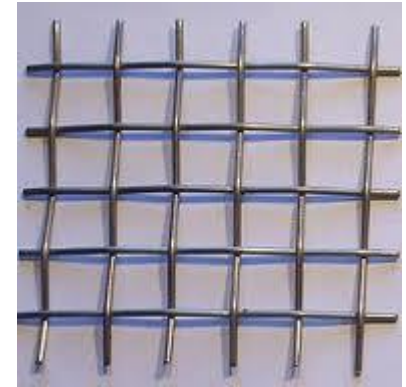


# Toz Karakterizasyonu

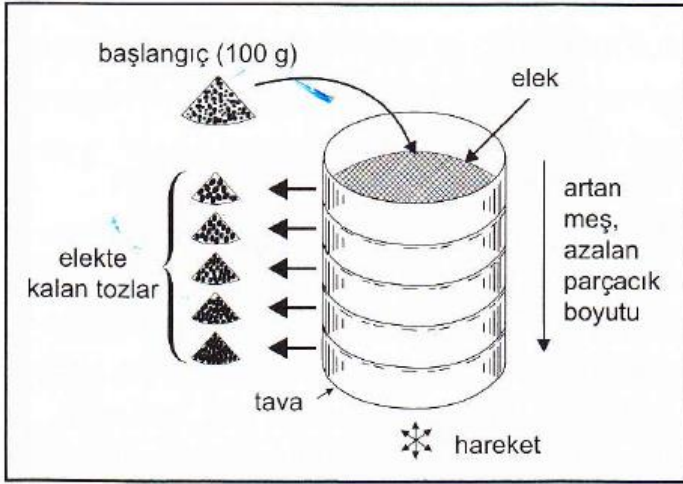
## Eleme

Elek analizi olarak da bilinen eleme, büyük parçacıkların boyut dağılımlarının ölçümünde kullanılan eski bir tekniktir. Eşit aralıklı tellerden oluşan bir kare ızgara elek oluşturur. Elek boyutu birim uzunluktaki tellerin sayısından belirlenir. Açıklık boyutu, elek boyutu ile ters orantılı olarak değişir, Büyük elek değerleri (325 gibi), küçük açıklık değerlerini ( $45 \mu\text{m}$ ) veya tersini belirtir,

Elek boyutunun belirlenmesinde en yaygın kabul, bir inçteki tel sayısına dayanır. Örneğin 200 elek, doğrusal bir inçteki 200 teli ifade eder. Bu elek değeri, tel merkezleri arasındaki  $127 \mu\text{m}$  aralığı verir. Fakat teller  $52 \mu\text{m}$  çapında olduğundan, geriye kalan açıklığın boyutu  $75 \mu\text{m}$ 'dir. Elek boyutları çok küçük açıklık boyutlarına gidemez. Sonuç olarak elek analizi genellikle  $38 \mu\text{m}$ 'den daha büyük parçacıklara uygulanır. Ancak son yıllarda  $5$  ve  $10 \mu\text{m}$ 'lik elekler kullanılmaya başlamıştır.



# Toz Karakterizasyonu



*Şekil 2.8. Elek analizi, izdüşüm kesit alanına ait boyuta sahip parçacıkların tutulması için kademeli olarak daha küçük açıklık boyutlarına (daha büyük meş sayılarına) sahip eleklerin kullanımı esasına dayanır.*

**ÇİZELGE 2.3. Standart Elek Boyutları**

elek boyutu	açıklık, $\mu\text{m}$	elek boyutu	açıklık, $\mu\text{m}$
18	1000	100	150
20	850	120	125
25	710	140	106
30	600	170	90
35	500	200	75
40	425	230	63
45	355	270	53
50	300	325	45
60	250	400	38
70	212	450	32
80	180	500	25
		635	20

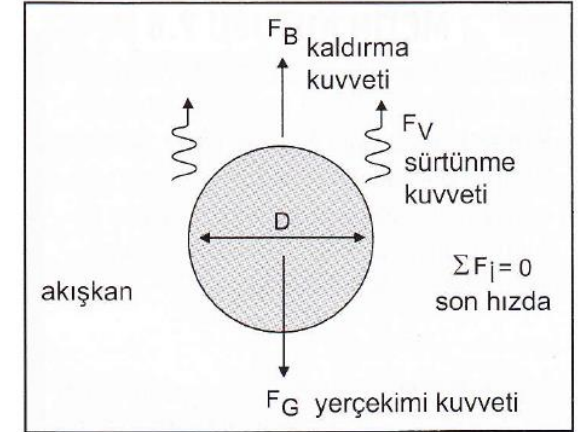
**STANDARD MESHOPENING PARTICLE**

Tyler	U.S.	mm	inches	
4	4	4.75	0.187	●
6	6	3.35	0.132	●
8	8	2.36	0.094	●
10	12	1.70	0.066	●
12	14	1.40	0.056	●
14	16	1.18	0.047	●
16	18	1.00	0.039	●
20	20	0.85	0.033	●
24	25	0.71	0.028	●
28	30	0.60	0.023	●
32	35	0.50	0.020	●
35	40	0.425	0.017	●
42	45	0.355	0.014	●
48	50	0.300	0.012	●
60	60	0.250	0.0098	●
65	70	0.212	0.0083	●
80	80	0.180	0.0070	●
100	100	0.150	0.0059	●
115	120	0.125	0.0049	●
150	140	0.106	0.0041	●
170	170	0.090	0.0035	●
200	200	0.075	0.0029	●
250	230	0.063	0.0025	●
270	270	0.053	0.0021	●
325	325	0.045	0.0017	●
400	400	0.038	0.0015	●
—	500	0.025	0.0010	●

# Toz Karakterizasyonu

## Sedimentasyon

Sedimentasyon ile parçacık boyut analizi küçük parçacıklara uygulanabilir. Bir sıvı veya gaz içinde çöken tozlar, parçacık boyutu ve akışkan vizkositesine bağlı olarak bir son hıza ulaşır. Böylece lise fiziğinin aksine, serbest düşen cisimler sürekli ivmelenmez, ancak bir son hıza kadar ivmelenirler. Bu esasa göre, parçacık boyutu çökme hızından hesaplanabilir. Serbest düşme veya sedimentasyon teknikleri, parçacık yoğunluğu ve merkezkaç kuvvetine bağlı olarak, 0,02-100  $\mu\text{m}$  parçacık aralığını kapsayacak şekilde ayarlanabilir. Su içinde yerçekimi etkisinde çökmenin gerçekleştiği sedimentasyon analizi, sadece yaklaşık 1-20  $\mu\text{m}$  boyut aralığında uygulanabilir. Tekniğin 1  $\mu\text{m}$ 'den küçük parçacıklara uygulanabilmesi için merkezkaç kuvveti, 20  $\mu\text{m}$ 'den büyük parçacıklara uygulanabilmesi için ise vizkositesi sudan daha yüksek bir akışkan gerektirir.



**Şekil 2.9.** Viskos bir akışkan içindeki küresel bir parçacık için sabit çökme hızını sağlayan kuvvet dengesi.



# Toz Karakterizasyonu

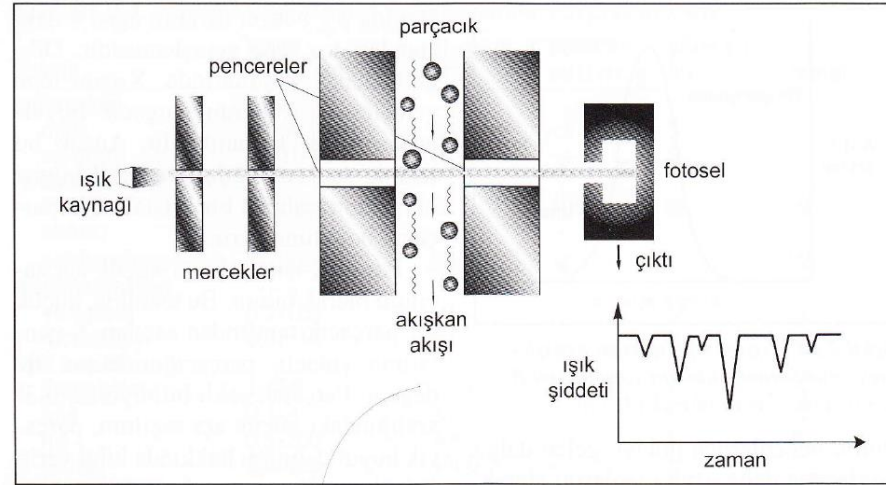
Sedimentasyon ile Parçacık boyut analizi, tozun bir çökme tüpünde dağıtılması ile başlar. Test genellikle su gibi bir akışkan içinde yapılır, fakat daha küçük parçacıklar için hava kullanılabilir. Çökme zamanına karşı, tüpün dibine çöken tozun hacim veya ağırlık ölçümleri, parçacığın boyut dağılımını hesaplamaya imkan verir.



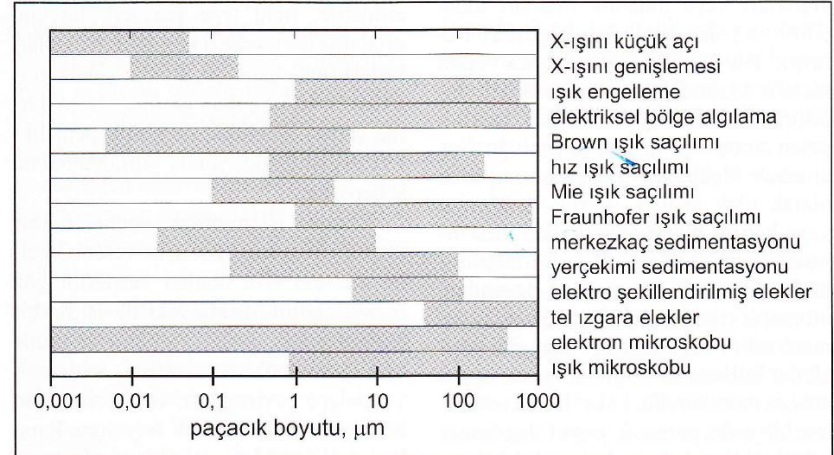
# Toz Karakterizasyonu

## Işık Engelleme

Işık engelleme esasına dayalı parçacık boyut analizi, yukarıda tanımlanan elektriksel bölge algılaması tekniğine benzer başka bir akışla taşınmalı analiz tekniğidir. Şekil 2.17'de gösterildiği gibi bir ışık demeti, dağıtılmış parçacık akışı ile kesilir. Pencerenin önünden geçen bir parçacık, ışığın fotosel detektörüne ulaşmasını kısmen engeller. Parçacık şekli küresel kabul edilerek, engellenen ışık miktarı eşdeğer dairesel kesit alana eşitlenir. Bu teknikteki dinamik oran, en büyük parçacık boyutunun en küçük parçacık boyutuna oranı, 45'tir. En düşük alt boyutun 1  $\mu\text{m}$  olduğu parçacık boyutu optik çözünürlükle elde edilir. Açıklığın tıkanması ve çakışma sorunlar yaratır. Parçacık dağıtımı ve akışkan içindeki seyreltme, çakışmaların önlenmesi için önemlidir. Veriler elde edilirken, sayımlar her bir boyuttaki parçacıkların sayısına göre sınıflandırılır.



Şekil 2.17. Işık engellenmesine dayalı parçacık boyut analizi. Ölçümde parçacıkları izdüşüm alanlarına bağlı olarak saymak ve ölçmek için kesintili ışık demeti kullanılır.



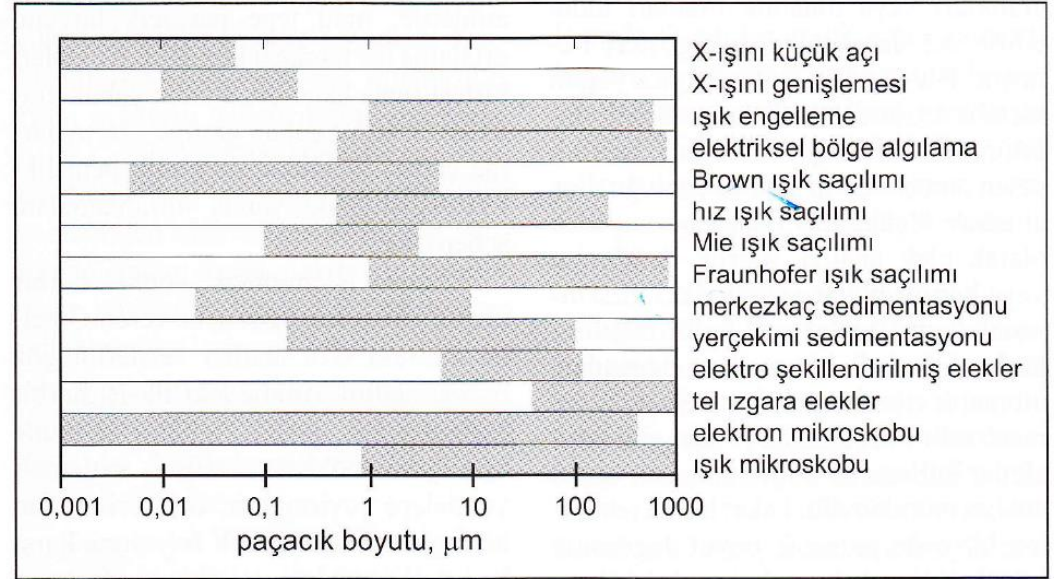
Şekil 2.19. Parçacık boyut analiz tekniklerinin ve her biri için uygun boyut aralıklarının karşılaştırmalı çizimi.



# Toz Karakterizasyonu

## Parçacık boyut analizi

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



Şekil 2.19. Parçacık boyut analiz tekniklerinin ve her biri için uygun boyut aralıklarının karşılaştırmalı çizimi.

# Toz Karakterizasyonu

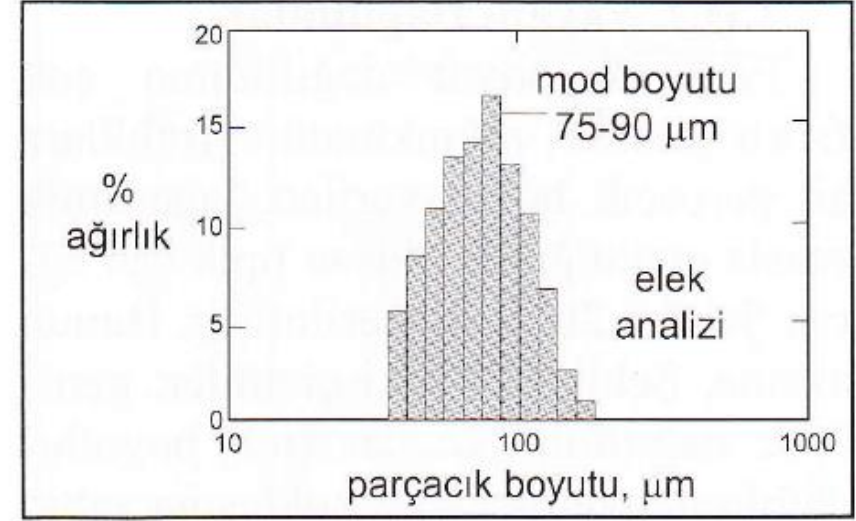
## Parçacık Boyutu Verileri

Parçacık boyut verileri toplandıktan sonra dağılım analiz edilir. Bazen parçacık boyut dağılımı, her bir boyut artışındaki parçacıkların sayısı veya miktarını gösteren bir histogram veya frekans çizimi olarak verilir. Böyle çizimlerde; mod tepe parçacık boyutu, ortalama ise merkezi boyuttur. Noktaları birleştirmek hatalıdır. Bunlar çubuk grafiklerdir ve bir çubuk grafiğe eğri uydurma çabası, özellikle de aralık genişlikleri değiştiğinde, yanlış yorumlamalara sebep olur.

ÇİZELGE 2.5. Örnek Parçacık Boyut Dağılımı Verileri

elek boyutu	açıklık $\mu\text{m}$	kalan ağırlık, g	aralık yüzdesi	birikimli yüzde
70	212	0,0	0,0	0,0
80	180	1,1	0,9	0,9
100	150	3,0	2,5	3,3
120	125	8,7	7,1	10,4
140	106	13,2	10,8	21,2
170	90	16,5	13,5	34,7
200	75	20,8	17,0	51,7
230	63	18,0	14,7	66,4
270	53	16,9	13,8	80,2
325	45	13,6	11,1	91,3
400	38	10,8	8,8	100,0
500	25	0,0	0,0	100,0

toplam ağırlık = 122,6 g



Şekil 2.20. Çizelge 2.5'teki eleme işlemi verilerinin logaritmik esaslı parçacık boyutu eksenli histogram çizimi. Mod en yoğun boyut olarak tanımlanır. Çizimdeki mod değeri 75-90  $\mu\text{m}$  olarak verilmiştir.

# Toz Karakterizasyonu

Eleme işleminden sonra herbir elekte kalan toz ağırlığını veren Çizelge 2.5'teki elek analizi verilerini göz önüne alalım. Analizdeki ilk iş, herbir kademedeaki ağırlığı toplam numune ağırlığına bölerek verileri kademeli yüzdelere çevimektir. Bu veriler için histogram, elek açıklık boyutuna karşı kademeli yüzdeler çizilerek oluşturulur.

AL2124 :Run Number 6

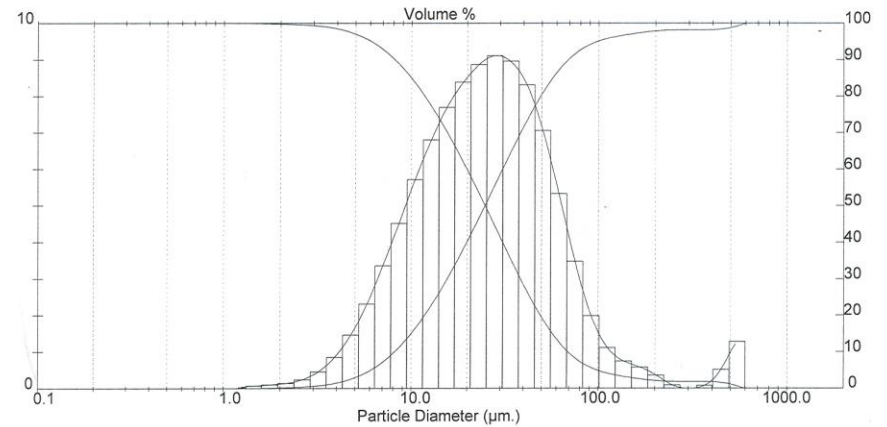
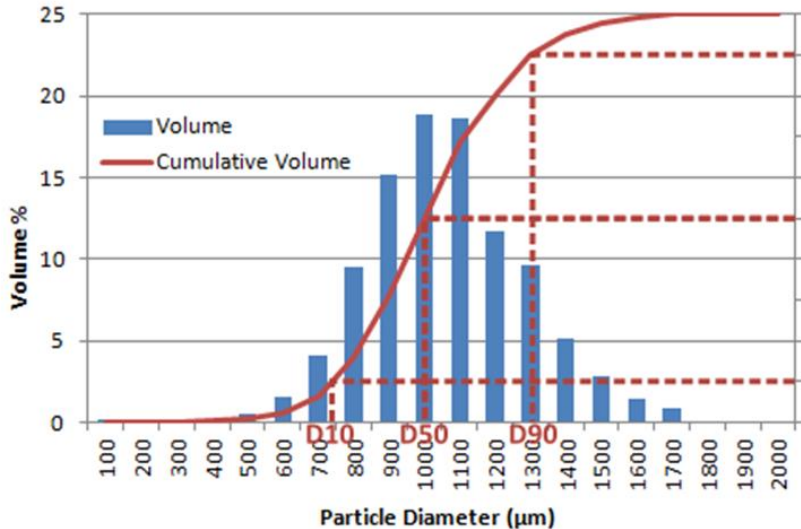
Sample File Name: LEVENT , Record: 139 Source: Analysed  
Measured on: 23 Jan 2008 Wed 00:42 Last saved on: 23 Jan 2008 Wed 00:42

Presentation: 2OHD Polydisperse model Volume Result Focus = 300 mm.

Residual = 0.292 % Concentration = 0.023 %  
d (0.5) = 24.91 µm d (0.1) = 8.16 µm  
D [4, 3] = 41.34 µm Span = 2.45  
Sauter Mean (D[3,2]) = 17.01 µm Mode = 28.72 µm  
Specific Surface Area = 0.3526 sq. m. / gm Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.03	1.32	0.03
1.32	0.07	1.60	0.10
1.60	0.10	1.95	0.21
1.95	0.15	2.38	0.35
2.38	0.24	2.90	0.60
2.90	0.45	3.53	1.05
3.53	0.85	4.30	1.90
4.30	1.46	5.24	3.36
5.24	2.30	6.39	5.66
6.39	3.36	7.78	9.02
7.78	4.51	9.48	13.53
9.48	5.70	11.55	19.24
11.55	6.80	14.08	26.04
14.08	7.70	17.15	33.74
17.15	8.39	20.90	42.13
20.90	8.87	25.46	51.00

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
25.46	9.11	31.01	60.11
31.01	8.96	37.79	69.07
37.79	8.31	46.03	77.38
46.03	7.06	56.09	84.44
56.09	5.32	68.33	89.77
68.33	3.47	83.26	93.24
83.26	1.99	101.44	95.23
101.44	1.11	123.59	96.34
123.59	0.75	150.57	97.09
150.57	0.58	183.44	97.67
183.44	0.36	223.51	98.03
223.51	0.10	272.31	98.13
272.31	0.00	331.77	98.13
331.77	0.09	404.21	98.21
404.21	0.52	492.47	98.73
492.47	1.27	600.00	100.00

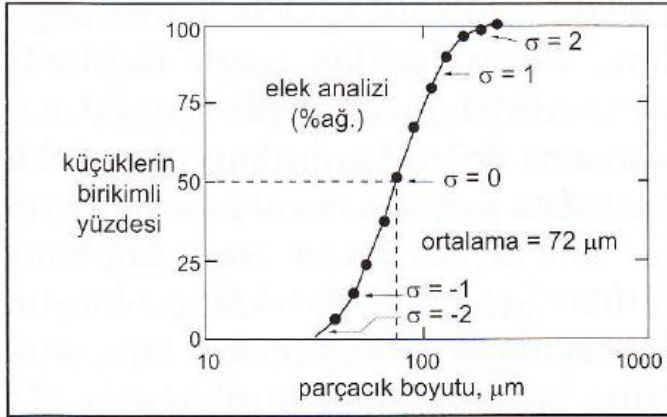




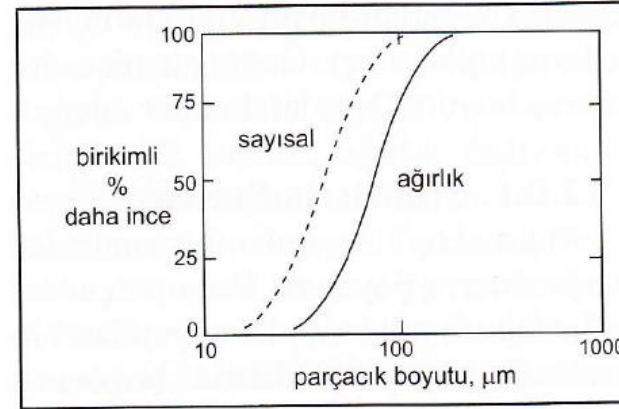
# Toz Karakterizasyonu

## Grafiklerin Esasları

Mikroskop ile yapılan bir analizde, parçacıkların boyutuna karşı parçacıkların sayısal miktarı, eleme yapılan bir analizde ise, parçacıkların boyutuna karşı parçacıkların ağırlığı elde edilir. Bunlar aynı olmadığı için, parçacık boyut bilgisinin çizimi için neyin esas alındığını belirtmek önemlidir. Aksi halde karışıklık olur. Büyük bir parçacık; çok sayıdaki küçük parçacıkla aynı kütleye sahip olacağı için ağırlık dağılımı, sayısal çokluk esaslı dağılımla karşılaştırıldığında, büyük parçacık boyutlarına doğru kaydırılmış olur.



**Şekil 2.21.** Çizelge 2.5'teki veriler için birikimli parçacık boyutu dağılımının çizimi. Oklar dağılım için standart sapmaları göstermektedir.

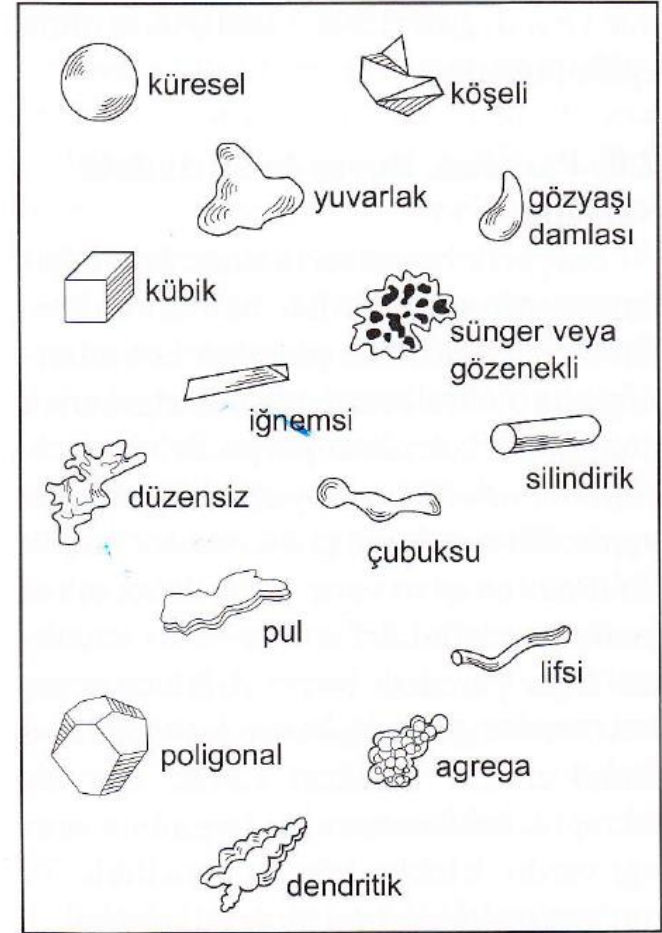


**Şekil 2.22.** Ağırlık (örnek: eleme) ve sayısal (örnek: mikroskop) esasına dayalı olarak elde edilmiş birikimli parçacık boyut dağılımlarının karşılaştırılması. Sayısal esaslı dağılımın yeri daha küçük parçacık boyutlarına doğru kaymıştır.

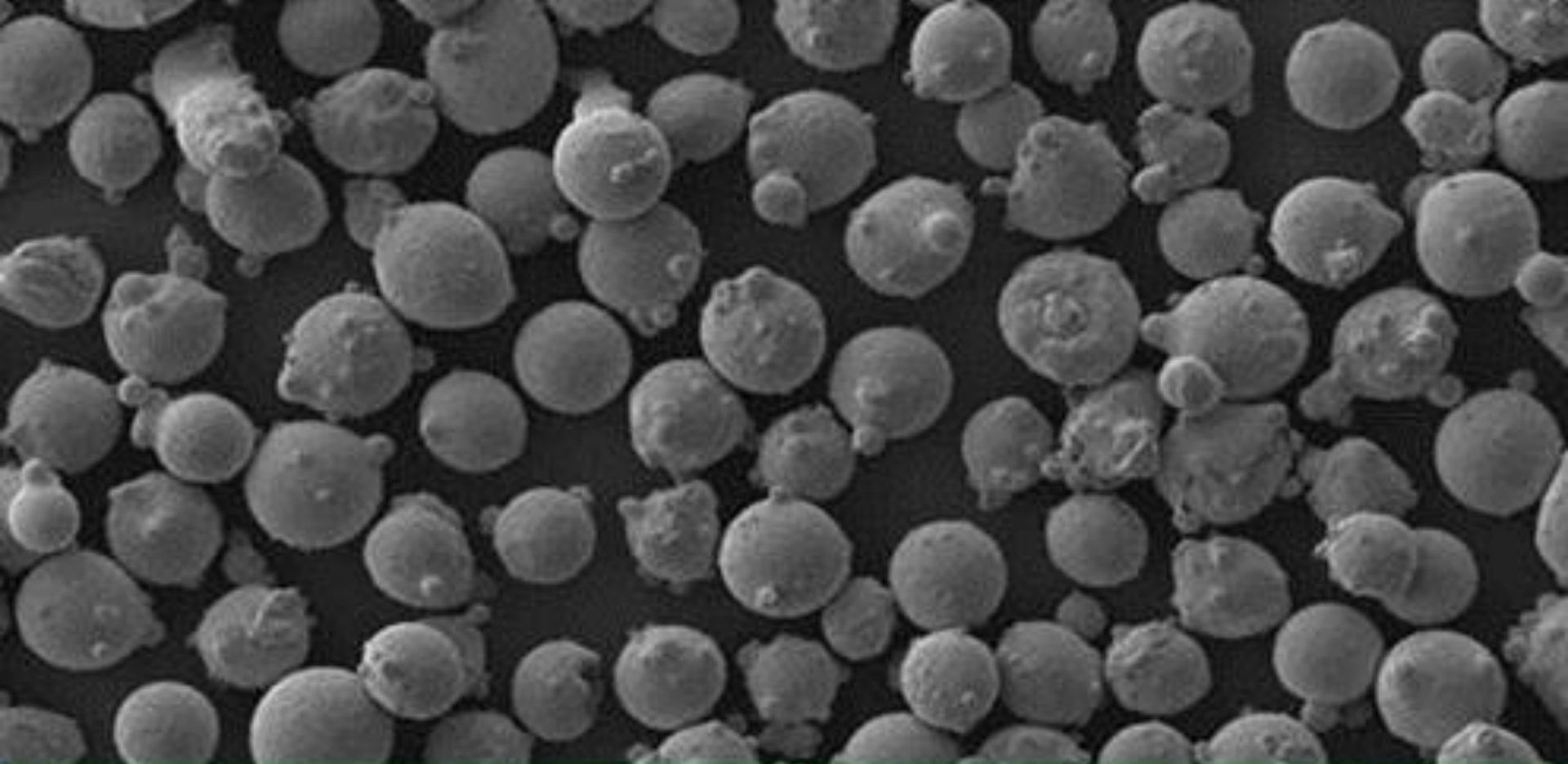


# Toz Karakterizasyonu

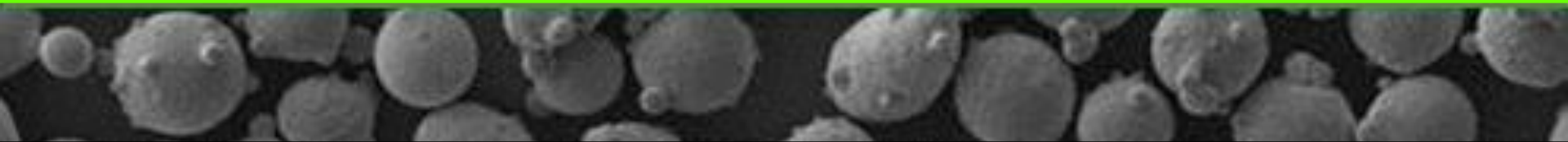
Toz metalurjisi teknolojileri parçacıkların bir araya gelmesiyle oluşan tozlarla başlar. Yoğunlaştırma işleminde önemli bir girdi olması nedeniyle tozun iyi anlaşılması gerekir. Teknik detaylar oluşturulurken işlem kontrolünün sürdürülmesinde toz özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin ürün performansını nasıl etkilediğinin bilinmesi önemlidir.



*Şekil 2.28. Olası parçacık şekilleri ve önerilen niteliksel tanımlayıcılar.*



# TOZ ÜRETİMİ



# Toz Üretimi

Bir tozun nasıl üretildiğinin bilinmesi o tozun boyutu ve şekli gibi özelliklerinin başlangıçta tahmin edilmesini sağlar. Hemen her malzeme toz haline getirilebilir, fakat belirli bir malzemeyi toz haline getirmek için seçilen yöntem; maliyet, tepkimeler ve istenen özellikler gibi faktörlerin karışımına bağlıdır. Toz üretiminde kullanılan ana yöntemler, mekanik öğütme, kimyasal tepkime, elektrolitik biriktirme, sıvı atomizasyonu ve buharı yoğunlaştırma.



# Toz Üretimi

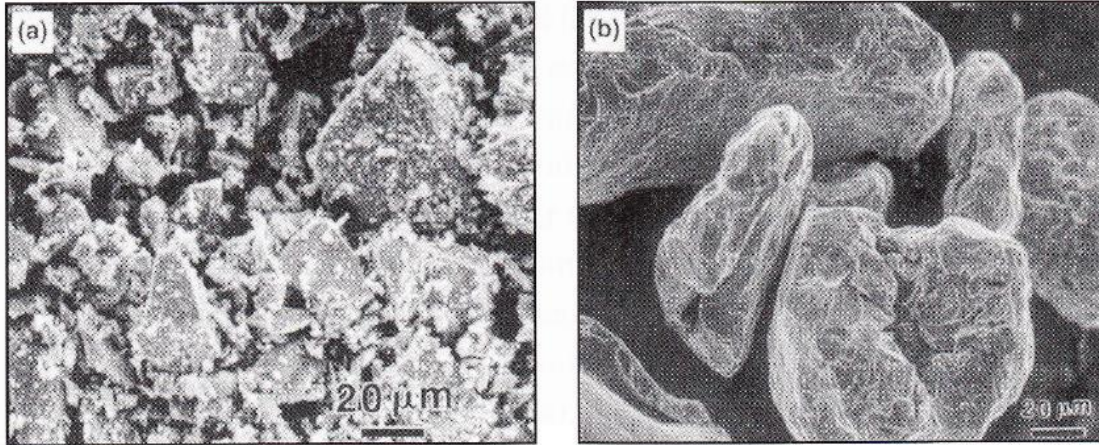
## Mekanik Üretim Yöntemleri

- Darbe
- Aşındırma-öğütme
- Kesme
- Basma



# Toz Üretimi

- Darbe, malzemeye çekiçle vurma gibi çok hızlı ve anlık uygulamaları içerir ve malzeme küçük parçalara ayrılır.
- Aşındırarak öğütme, aşındırıcıların bir biri üzerinde sürtünme hareketi sayesinde parçacıkların boyutunun küçültülmesidir.
- Kesme, talaşlı imalatta olduğu gibi kesme işlemi ile malzemenin parçalanmasıdır. Diş dolgu malzemelerinde kullanılan gümüş gibi pek çok metal tozu önceden tornalama ile elde ediliyordu. Kesme ile oluşturulan tozların büyük olma eğilimi vardır.
- Basma kuvvetleri ile bir malzeme kırılma noktasına kadar deformasyona uğratıldığında toz haline gelir. Yiyecekler de benzer şekilde toz haline getirilir.



*Şekil 3.1. Mekanik yöntemlerle üretilmiş tozların taramalı elektron mikroskop görüntüsü: a) öğütülmüş demir borür, b) talaşlı imalat ile elde edilmiş alüminyum tozları (Fotoğraflar: Deepak Madan ve Kuen Shyang Hwang).*

# Toz Üretimi

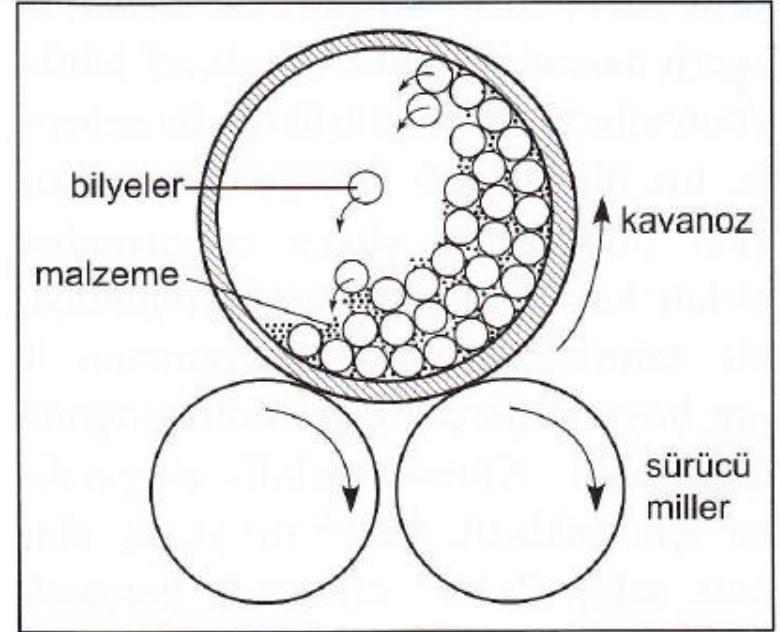
## Talaşlı İmalat

Haddelenmiş malzemelerin talaşlı imalatında kesme ile düzensiz şekilli iri tozlar elde edilir. Metal işleme tekniklerinde ortaya çıkan çok miktarda talaş hurdası metal tozu için büyük bir kaynaktır. Bu hurdalar kimyasal tekniklerle temizlenir ve boyut küçültmek için öğütülürler. Aslında, öğütme ile parçacık boyutunu veya şeklini değiştirmek yaygındır.

# Toz Üretimi

## Öğütme

Öğütme, sert bilyeler, çubuklar veya çekiçler kullanılarak yapılan mekanik darbe işlemini kapsar ve gevrek malzemelerden toz üretmede kullanılan klasik bir yöntemdir. En basit cihaz Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, içerisine bilyeler ve öğütülecek malzeme doldurulan kavanoz öğütücü değirmendir. Kavanoz döndükçe bilyeler toz malzemeye sürekli olarak çarpar ve daha küçük parçacıklara ayrılır.

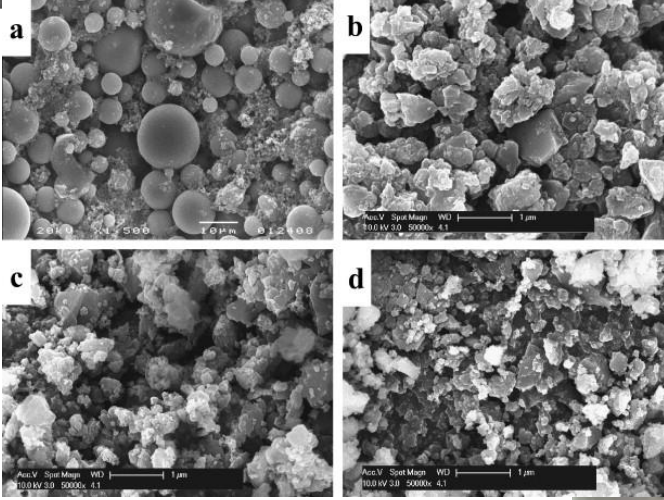


*Şekil 3.2. Silindirik değirmende hareketin gösterilmesi. Silindir döner ve aşağıya düşen bilyeler malzemeyi öğütürerek toza dönüştürür.*



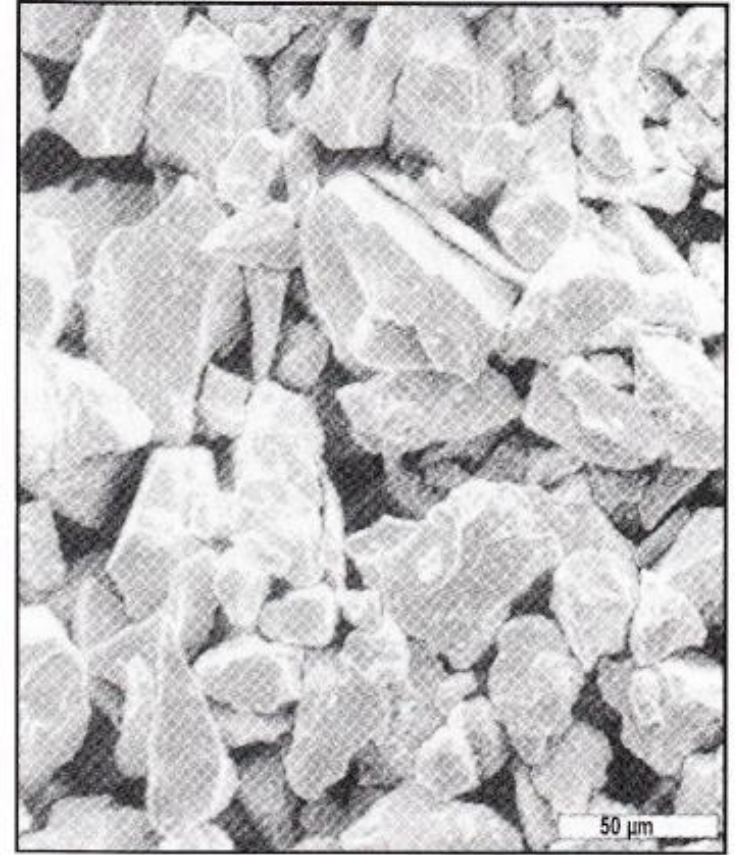
# Toz Üretimi

Öğütme



# Toz Üretimi

Öğütme bir çok sünek malzeme için kullanışlı değildir çünkü bu tür malzemeler kırılarak ufalanma yerine şekil değiştirir veya topaklanır. Ayrıca sistemin verimi de düşük olup, çoğunlukla %1 - 3 arasındadır. Gevrek malzemeler daha kolay öğütüldüklerinden, malzemeleri gevrekleştirilmiş olarak öğütme daha uygundur. Örneğin, titanyum hidrojene maruz kaldığında gevrekleşir ve öğütme sonrası, hidrojen malzemedan uzaklaştırılabilir. Birçok malzeme bu şekilde gevrek tersinir hidrürler oluştururlar. Şekil 3.3'te gösterilen köşeli niyobyum tozları böyle bir hidrür tekniğiyle öğütülmüş ve sünek metalden gevrek malzemelere özgü köşeli parçacıklar elde edilmiştir.



*Şekil 3.3. 50 µm öğütülmüş niyobyum tozlarının taramalı elektron mikroskop görüntüsü: Hidrürleme, öğütme ve vakum altında hidrojeni giderme işlemi sonucu oluşan köşeli parçacık şekli görülmektedir.*

# Toz Üretimi

Akışkanlar veya koruyucu ortamlar oksitlenmeyi azaltmak ve öğütmeye yardımcı olmak amacıyla kullanılır. Öğütme ile elde edilen tozlar sert, düzensiz şekilli ve zayıf akma ve paketlenme özelliğine sahip olduğundan öğütme sonrası tavlama işlemi gerekebilir. Diğer bir problem ise kavanoz ve bilyelerden kaynaklanan kirliliktir. Bilyeler ve değirmen öğütülecek malzemedan seçilerek kirlenme azaltılabilir. Öğütme, tavlama sonrası toz topaklarının dağıtılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu işlem genellikle borürler, karbürler, nitrürler, oksitler ve intermetalikleri kapsayan gevrek malzemelere uygulanır.

# Toz Üretimi

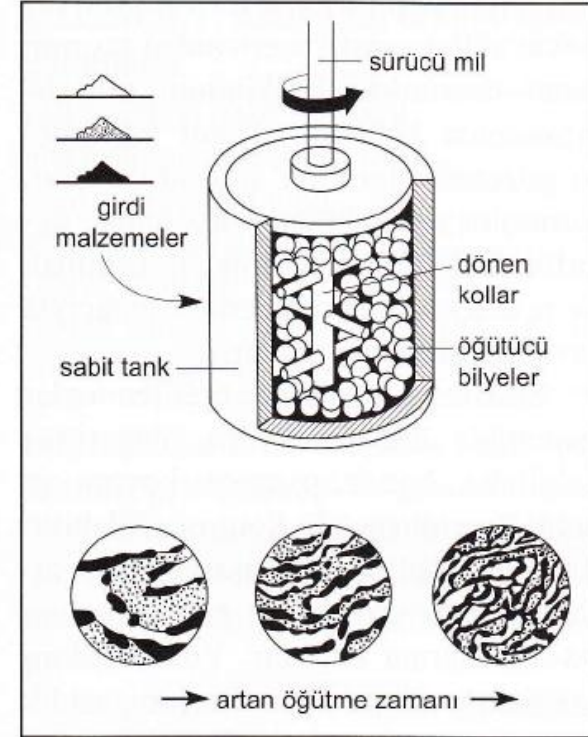
## Aşındırarak öğütme ve Mekanik Alaşımlama

Oksit dağılımı ile güçlendirilmiş malzemeler gibi parçacık takviyeli kompozitler yüksek sıcaklık sürtünme dayanımı nedeniyle uzun zamandır kullanılmaktadır. Bu kompozitlerin üretiminde ana yapının her yerinde sert parçacıkların homojen dağılımını elde etmek zordur. Öğütme teknikleri bu kompozitleri üretmek amacıyla geliştirilmiştir. Hareketli bilyeler arasındaki aşındırma ile alaşımlı kompozit parçacıklar üreten mekanik alaşımlama, bu amaçla başarılı bir tekniktir. İşlem, karıştırmalı bir değirmene konulmuş bilye ve element tozların karışımı ile başlar.



# Toz Üretimi

yüksek verimli bilyeli değirmen olan aşındırıcı öğütücünün şematik çizimini göstermektedir. Mikroskobik ölçekte tekrarlanan çarpışma, soğuk kaynak ve kırılma olayları istenilen kompozit tozları üretir. Şekil 3.4'ün alt kısmında gösterilen, gerçekleşen mikroskobik homojenleştirme kavramıdır. Başlangıçta karışım halinde olan parçacıklar fazların dağılımı ile kaplanmış parçacık haline gelirler. Diğer öğütme tekniklerinden farklı olarak, soğuk kaynak ve kırılma arasındaki denge, parçacık boyutunu oldukça sabit tutar.



**Şekil 3.4.** Mekanik alaşımlamanın şematik gösterimi. Dönen kollar bilye dolu tankı karıştırmaktadır. Girdi malzemeler; sırasıyla soğuk kaynak ve kırılma adımlarını izler. Şeklin alt kısmında gösterildiği gibi öğütme sonucunda mikroyapı daha homojen bir hale gelir.

# Toz Üretimi

Diğer mekanik toz üretim tekniklerinde olduğu gibi mekanik alaşımlamada da kirlilik sorun olabilir. Bilyeler, karıştırma mili, kolları ve tank, öğütülecek toz ile aynı malzemedendir yapılarak kirlilik en aza indirilebilir. Organik bir akışkanın (heptan veya alkol gibi) ortam olarak seçilmesi, mekanik alaşımlamada öğütme ve kaynaklanma arasındaki dengeyi sağlamak için önemlidir. Muma benzer basit polimerler ve stearik asit gibi yağ asitleri ortamı dengelemede başarılı olmaktadır. Tozların aşırı iş-sertleşmiş ve köşeli olmasına rağmen, sıcak yoğunlaştırma teknikleri ile yoğunlaştırılmaları mümkündür.

# Toz Üretimi

## Diğer darbeli teknikler

Gevrek malzemeler için yüksek hızlı gerinme darbesi uygulayan toz üretim teknikleri kullanışlıdır . Zayıf malzemeleri 1 mm parçacık boyutuna indirmek için çeneli kırıcıları kullanmak iyi bir uygulamadır. Parçacık boyutunu daha da küçültmek amacıyla sert kanatçıklı yüksek hızlı darbeli öğütücüler kullanılır, ancak üretim hızları düşüktür.

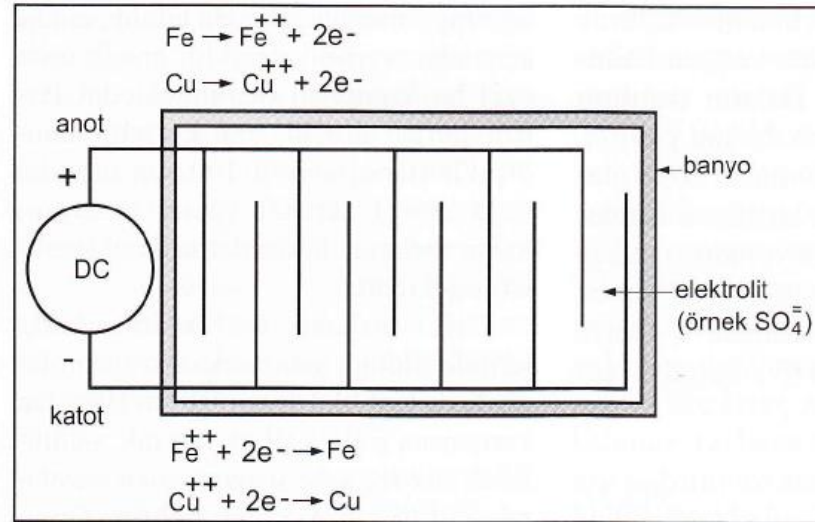
Darbeli tekniklerin değişik bir uygulaması kendinden-darbeli öğütme veya jet öğütme olarak bilinir. İki farklı toz akışı karşılıklı olarak birbiri üzerine yönlendirilir. Momentum, parçacıkları yüksek hızlı çarpışmaya taşır Bu yöntemin amacı hedef malzemedeki kaynaklanan kirlenmeyi önlemektir. Bu yaklaşımı gevrek malzemelerden 50 µm boyut aralığında tozlar üretilir.

# Toz Üretimi

## Elektrolizle Üretim Teknikleri

Bir elektroliz hücresinin katodu üzerinde belirli çalışma şartlarında element tozları biriktirilebilir. Örnek metaller arasında paladyum, krom, bakır, demir, çinko, mangan ve gümüş sayılabilir. Elektroliz yönteminin ana üstünlüğü yüksek ürün saflığıdır.

hücreye uygulanan voltaj altında anodun çözünmesi ile başlar. Bakır ve demir için anot ve katot tepkimeleri şekil içerisinde verilmiştir. Elektrolit (bu örnekte sülfat esaslı) içerisinden taşınım katot üzerindeki birikintinin saflaştırılmasında kullanılır. katot üzerindeki gözenekli birikinti sıyırılır, yıkanır, kurutulur ve öğütülerek toz haline getirilir. Daha sonra gerilmeleri azaltmak ve uçucu maddeleri gidermek amacıyla tavlama işlemi uygulanır.



*Şekil 3.5. Toz biriktirmek için bir elektroliz hücresi. Hammadde anotta çözünür ve katot üzerinde birikir. Demir ve bakır için örnek tepkimeler verilmiştir. Dışarıdan uygulanan voltaj, biriktirme işlemi gerçekleştirir. Toz üretmek için daha sonra katot birikintisi yıkanır, kurutulur, öğütülür, elenir ve tavlama.*

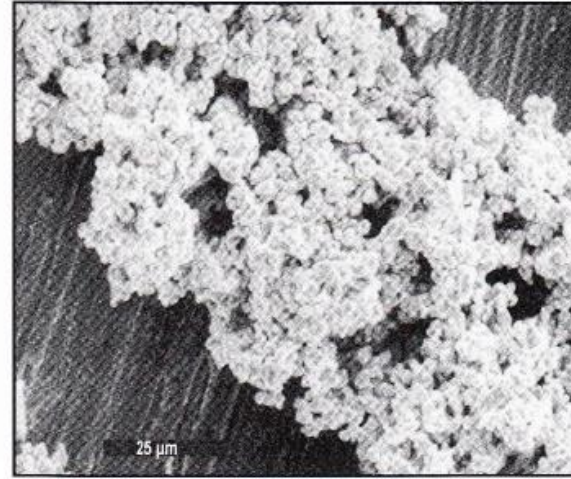


# Toz Üretimi

Elektroliz tekniği ile üretilen tozlar genellikle dendritik veya süngerimsi şekillidir. Ancak, parçacık boyutu ve şekli önemli ölçüde kontrol edilebilir. Tozların özellikleri biriktirme sırasındaki banyo şartları ve sonraki işlem basamaklarına bağlıdır. Yüksek akım yoğunluğu, düşük iyon derişimi, asidik hücre kimyasalları ve kolloidal katkılar, katotta gözenekli ve tozumsu birikinti oluşumunu kolaylaştırılır.



*Şekil 3.6. Elektrolizle üretilmiş bakır tozunun taramalı elektron mikroskop görüntüsü. Yaklaşık 75 µm olan bu tozlar dendritik şekle sahip olup düşük paketlenme yoğunluğu gösterir (Fotoğraf: John Johnson).*



*Şekil 3.7. Kimyasal yerdeğiştirme işlemi ile oluşturulmuş yüksek yüzey alanlı sünger paladyum tozunun taramalı elektron mikroskop görüntüsü. 180 µm'lik sünger parçacık 1 µm boyutlu tanelerin topaklaşması ile meydana gelmiştir.*

# Toz Üretimi

## Kimyasal Üretim Teknikleri

- Isıl Bozunma
- Sıvıda Çökeltme
- Gazda Çökeltme

# Toz Üretimi

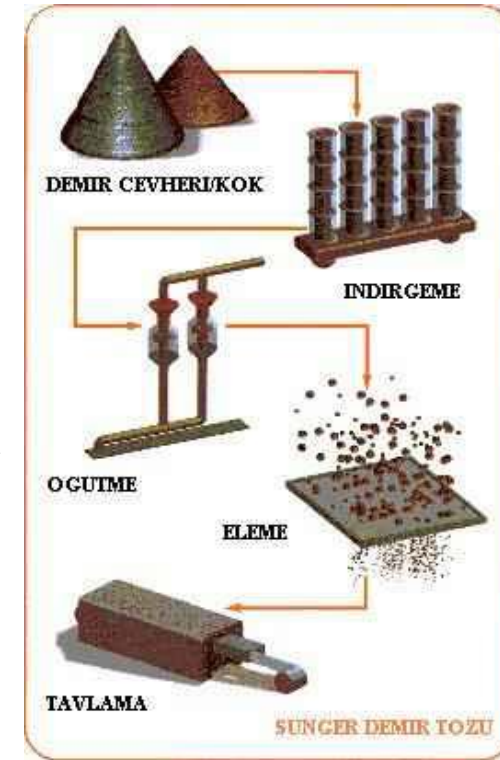
## Isıl Bozunma

Toz parçacıkları buhar bozunması ve yoğunlaştırmanın birlikte kullanılması ile üretilir. En yaygın örnekler demir karbonil  $Fe(CO)_5$  ve nikel karbonil  $Ni(CO)_4$  öncülerdir. İşlem bir metal ile karbon monoksitin tepkimesiyle başlar. Örnek olarak, nikel karbonil üretmek için biçimlendirilebilir nikel ile karbonmonoksit eşzamanlı ısıtma ve basınç uygulanarak tepkimeye sokulur. Karbonil molekülü  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye soğutulur ve saflaştırmak için kısmi damıtma kullanılır. Sıvı bir katalizörle birlikte tekrar ısıtıldığında buhar bozunması ile toz elde edilir.

Elde edilen nikel tozları küçük parçacık boyutuna sahip olup yaklaşık %99,5 saflıktadır ve düzensiz, yuvarlak veya zincir şeklindedir. Şekil 3.12, karbonil yöntemi ile üretilmiş küçük parçacık boyutlu nikel tozlarını göstermektedir. Tepkime şartlarını kontrol ederek toz boyutunu  $0,2-20\text{ }\mu\text{m}$  arasında elde etmek mümkündür, büyük tozlarda küresel parçacıklara çok rastlanır.



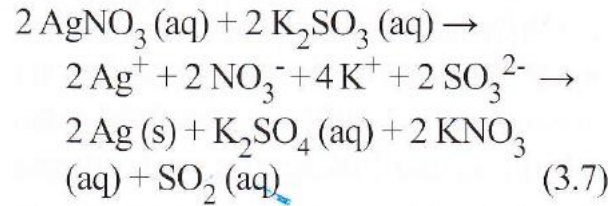
Şekil 3.12. Karbonil bozunması ile oluşturulmuş nikel tozunun taramalı elektron mikroskop görüntüsü (Fotoğraf: Tai Shing Wei).



# Toz Üretimi

- Sıvıda Çökeltme

Nitrat, klorür veya sülfat gibi çözünmüş bileşikler kimyasal işleme tabi tutularak çökeltilmiş parçacıklar üretilebilir. Örnek olarak içerisinde gümüş nitrat bulunan çözeltideki reaksiyonu ele alalım;



burada (aq) su içerisinde çözünme ve (s) katı anlamına gelmektedir. Elde edilen katı gümüş çökelti öğütülerek toz haline getirilir. Alternatif olarak, metal iyonları hidrojen ile tepkimeye girerek metal çökelteleri oluşturur. Yaygın örnekleri %99,8 saflıkta bakır, nikel ve kobalt tozlarıdır. Kimyasal olarak çökeltilmiş tozlar 1 µm civarındadır, fakat toz özellikleri işlem değişkenleri sayesinde ayarlanabilir. **Küçük parçacık boyutları nedeniyle ürünlerin çoğu topaklanma eğilimi gösterir.**

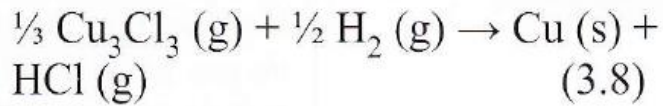
Kapasitörler ve yüksek sıcaklık uygulamaları için önemli olan tantalyum ve benzeri ısıya dayanıklı metaller de sıvıdan çökeltme yöntemi ile üretilirler. İşlem K<sub>2</sub>TaF<sub>7</sub>, gibi halojen tuzu çözeltisi ile başlar. Tantall.um, ergimiş sodyum ilavesi ile serbest bırakılır, çözünen sodyum klorür ve tantalyum tozunu içeren bir kek elde edilir. Bu kekin yıkanması ile NaCl uzaklaştırılır ve sünger tantalyum yıkanır, kırılır ve öğütülerek toz haline getirilir.



# Toz Üretimi

- Gazda Çökeltme

Gaza dayalı tepkimeler küçük tozların az kirlilik ile üretilmelerinde kullanılır. Örnek bir işlem molibden oksitini ( $\text{MoO}_3$ ) saf hidrojen ile tepkimeye girmesi sonucu molibden tozu üretilmesidir. Vanadyum, niyobyum, volfram, hafniyum, titanyum, gümüş, kobalt, nikel veya zirkonyum gibi metallerin klorürleri, florürleri veya oksitleri gazdan çökeltme işlemi için uygundur. Uçucu klorürler (veya diğer tuz buharları) kullanıldığında metal tozları yüksek sıcaklıkta hidrojen tepkimesi ile üretilir.  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta örnek bir tepkime aşağıdaki gibidir:



burada bakır 0,2 mikronluk katı parçacık şeklinde çökeltir ve diğerlerinin tamamı buhardır.

Bu parçacıklar 10-1000 nm boyut aralığındadır ve kolayca topaklanır. Kompozit tozlar veya ısıya dayanıklı kaplamalar bunun gibi buhar fazı tepkimeleri ile oluşturulur. Pahalı bir toz üretim yolu olmasına rağmen parçacık boyutu, saflığı, şekli ve topaklanması buhar tepkimesi koşulları ile ayarlanabilir.

# Toz Üretimi

## Atomizasyon Teknikleri

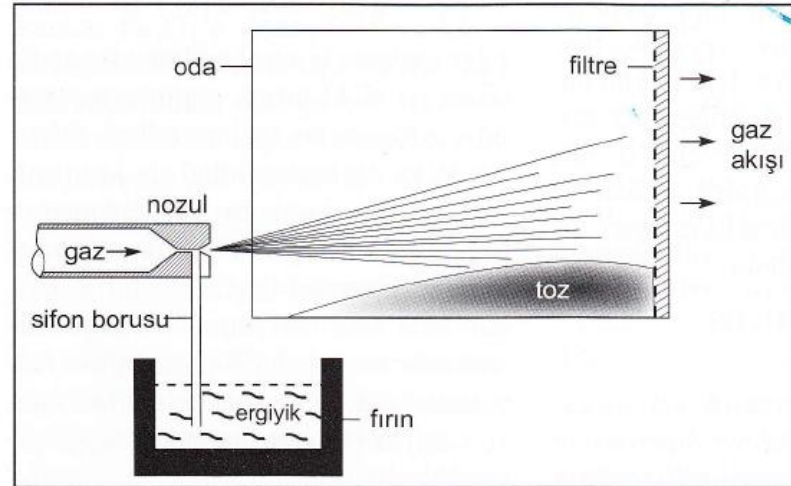
Atomizasyon ergimiş sıvıya ve sıvının damlacıklara parçalanmasına dayanır. Damlacıklar donarak parçacık haline gelirler. Ticari atomizasyon üniteleri 400 kg/dak üretim hızlarına kadar çalışabilmektedir. Yöntem çoğunlukla metaller, alaşımlar ve intermetalikler için kullanılmakla birlikte son zamanlarda polimer ve seramiklere de uygulanmaktadır. Yöntem, iyi işlem kontrolü ile farklı malzemelere uygulanabilirliğinden dolayı caziptir.

- Gaz atomizasyonu
- Sıvı ve su atomizasyonu
- Savurma atomizasyon
- Plazma ve Diğer atomizasyon yöntemleri
- Atomizasyon Sınırlamaları
- Buharlaştırma Teknikleri
- Mikron-altı ve Nano ölçekli tozlar için teknikler
- Özel tozların üretim yöntemleri

# Toz Üretimi

- Gaz atomizasyonu

Hava, azot, argon ve helyumun sıvı metal demetini parçalayan gaz olarak kullanılması gaz atomizasyonu olarak adlandırılır. Sıvı malzeme nozul çıkışında parfümün püskürtülmesi gibi hızlı gaz genişmesi sayesinde parçalanır. Donanım tasarımı, ergitilmiş malzemenin besleme mekanizmasına ve ergilme ve toz toplama odasının yapısına göre değişiklik gösterir.



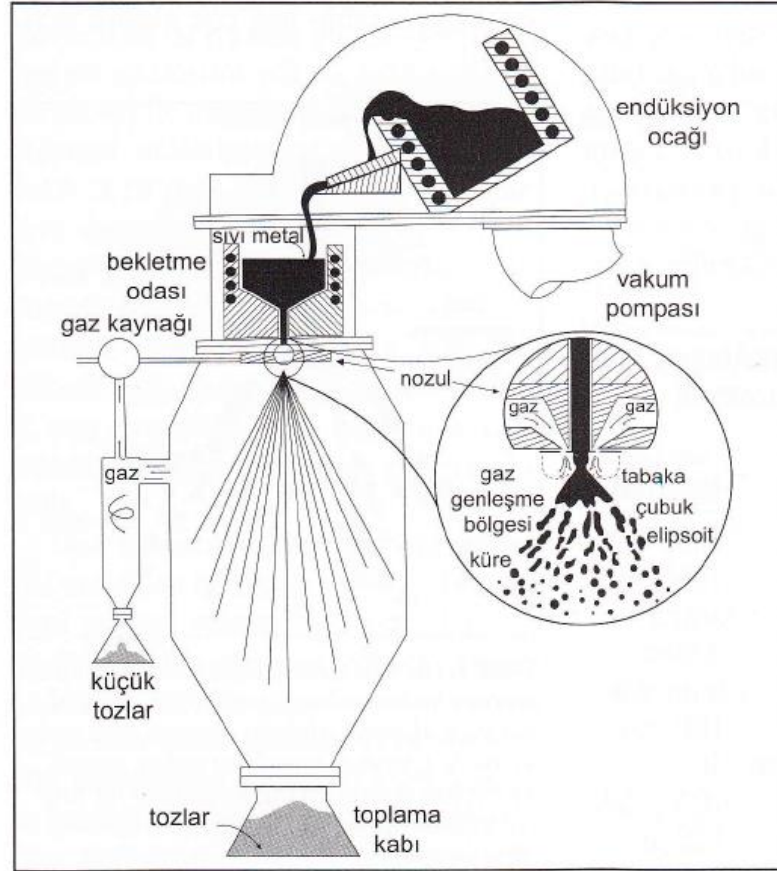
**Şekil 3.14.** Yatay gaz atomizasyonunun şematik gösterimi. Bu teknik düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler için çok uygundur. Ergiyik sifon etkisi ile gaz genişmeli nozula çekilir, damlacık olarak püskürtülür, katılaşır ve yan odada toplanır.

# Toz Üretimi

- Gaz atomizasyonu

Yüksek sıcaklıkta eriyen metaller için, tozların oksitlenmesini önlenmek amacıyla, asal gaz doldurulmuş kapalı bir oda kullanılır. Şekil 3.15'te dikey asa | gaz atomizasyonu ünitesi şematik olarak gösterilmiştir. Ergiyik indüksiyon ocağı ile sıvılaştırma eğrisinin çok üzerinde bir sıcaklığa (aşırı ısıtma) ısıtılarak soğuk nozula gönderilir.

Gaz atomizasyonu tamamen asal gaz ortamında gerçekleştirilebilir ve böylece yüksek saflıkta alaşım tozu üretilebilir. Parçacık şekli küreseldir ve genellikle geniş boyut dağılımlıdır. Fakat çoğunlukla 10 µm üzeri boyutlarla sınırlıdır



Şekil 3.15. Dikey gaz atomizasyonu ünitesi. Ana bölümleri; vakumlu endüksiyon ocağı, gaz genişlemeli nozul, gaz dolaşım ve besleme sistemi, atomizasyon odası ve toz toplama odasıdır. Nozul bölgesinin büyütülmüş görünümü, gaz ve sıvı metalin birleştiği bir tabaka çubuk elipsoit şeklinde genişler. Bu genişleme bölgesinde, gaz ve sıvı metalin birleştiği bir küre oluşur. Küre, tozlar olarak toplanır. Şekil, gaz dolaşım ve besleme sistemi, atomizasyon odası ve toz toplama odası gibi ana bölümleri göstermektedir. Nozul bölgesinin büyütülmüş görünümü, gaz ve sıvı metalin birleştiği bir tabaka çubuk elipsoit şeklinde genişler. Bu genişleme bölgesinde, gaz ve sıvı metalin birleştiği bir küre oluşur. Küre, tozlar olarak toplanır.



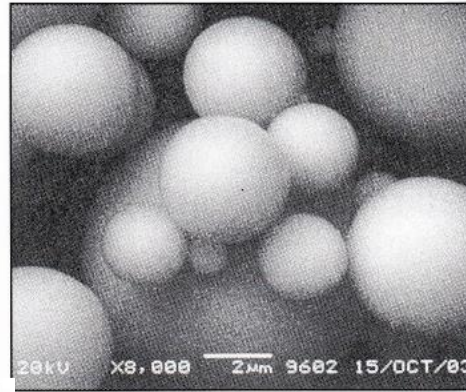
# Toz Üretimi

## • Gaz atomizasyonu

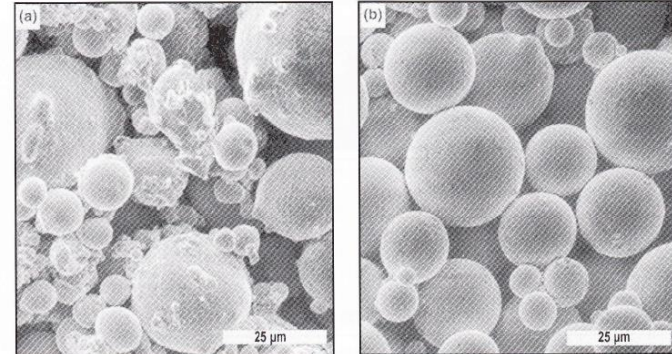
**ÇİZELGE 3.2. Nikel Süper Alaşım Tozu Üretimi için Örnek Atomizasyon Parametreleri**

parametre	koşullar
alaşım ergime sıcaklığı	1400 °C
sıvı metal sıcaklığı	1550 °C
atomizasyon gazı	argon
gaz basıncı	2 MPa
gaz akış debisi	8 m <sup>3</sup> /dak
nozul çıkışında gaz hızı	100 m/s
gaz-sıvı metal çarpışma açısı	40°
sıvı metal debisi	20 kg/dak
ortalama parçacık boyutu	120 µm

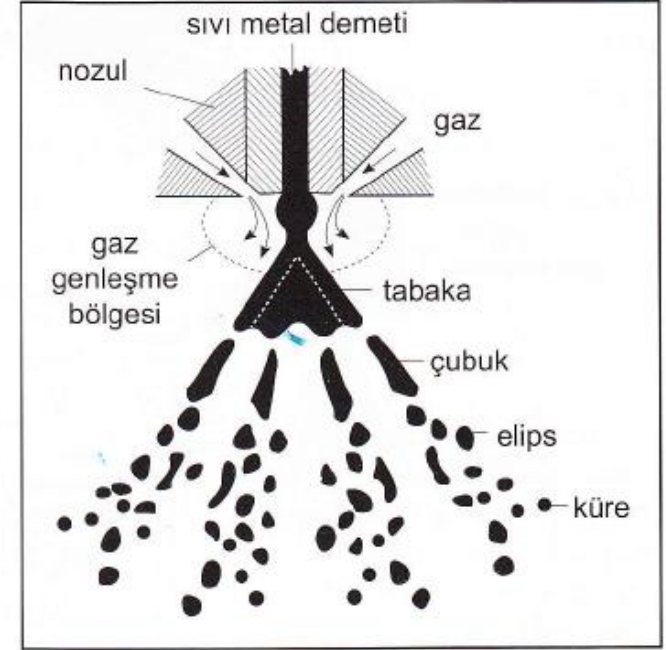
Gaz atomizasyonunda sıvı metale ne kadar çok enerji aktarılabilirse üretilen parçacıklar da o kadar küçük olur.



**Şekil 3.21.** Gaz atomizasyon ile elde edilmiş amorf Al-Fe-Y alaşım tozları. Parçacıkların yüzeylerinde kristalleşme işaretleri yoktur. Bunlar aslında katılaştırılmış sıvılardır (Fotoğraf: Y. Liu).

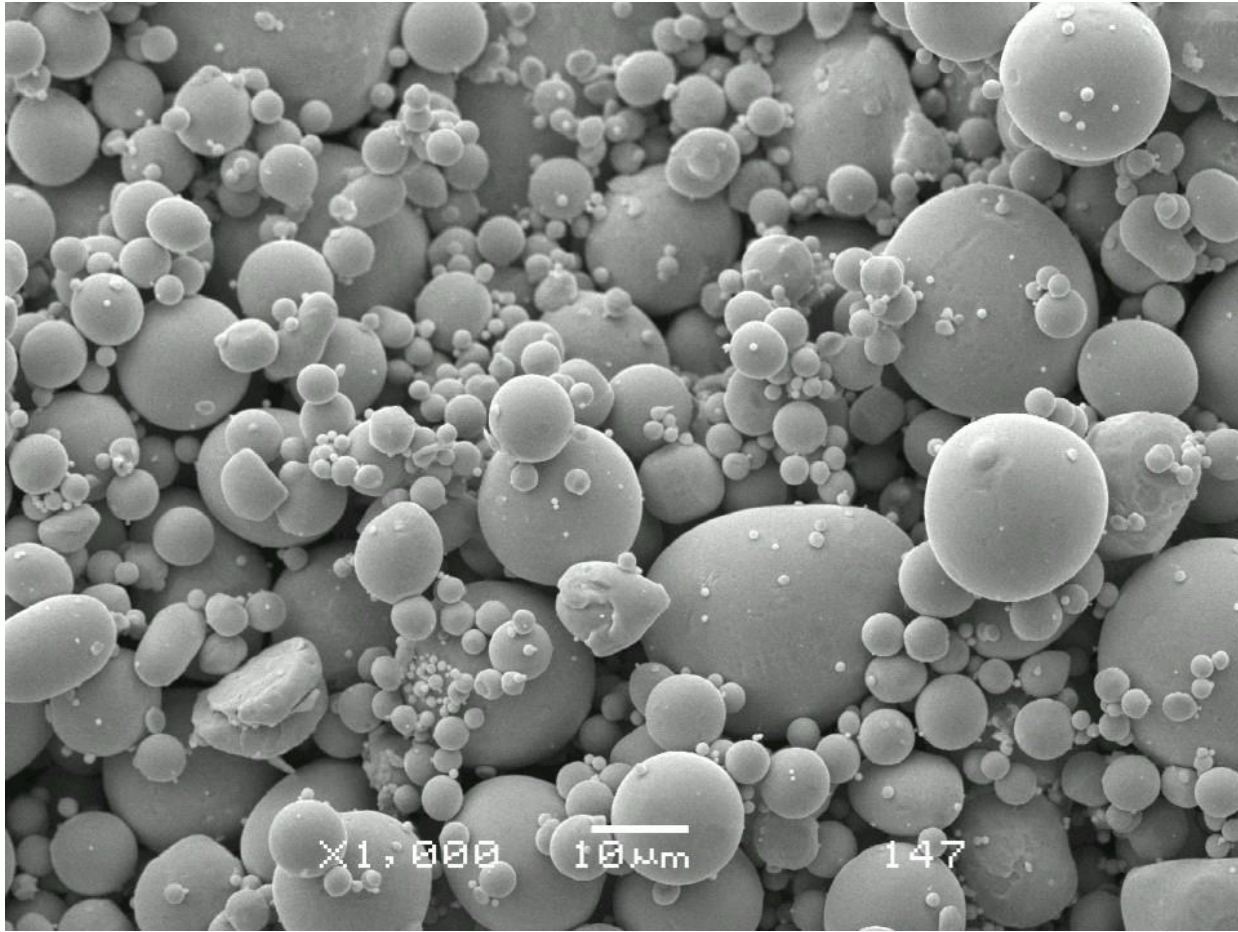


**Şekil 3.19.** Asal gazla atomize ile elde edilen yaklaşık 25 µm boyutundaki tozların taramalı elektron mikroskop görüntüsü. İki resimdeki parçacıklar yaklaşık aynı ortalama boyuta sahiptir. Gaz dolaşımındaki türbülansın kontrolü ve parçacıkların atomizasyon bölgesine tekrar girmesinden dolayı iki resimdeki tozlarda topraklanma ve uydulaşma açısından büyük fark vardır: a) çarpışma, topraklanma ve uydulaşma görülen tozlar ve b) uydulaşma görülmeyen tozlar.



**Şekil 3.16.** Gaz atomizasyon ile metal tozu üretimi hızlı genişleyen gaz ile sıvı demetinin parçalanma işlemini kapsar. Gaz genişleme bölgesinde meydana gelen negatif basınçtan dolayı sıvı demeti önce içi boş bir tabaka halini alır, sonrasında çubuk, elips ve küre şeklini alır.

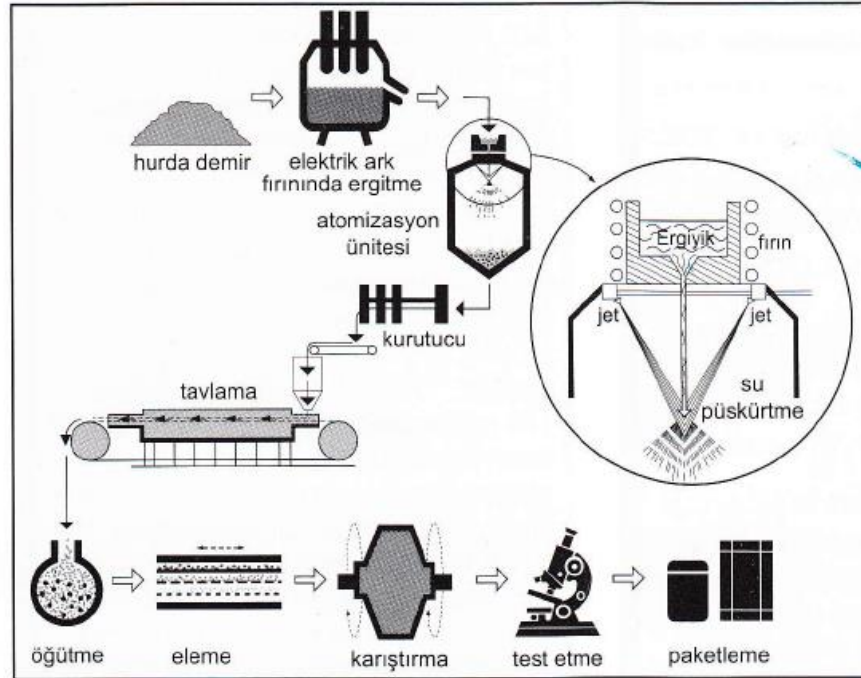
# Toz Üretimi



# Toz Üretimi

## Sıvı ve su atomizasyonu

Gaz yerine bir sıvının ergiyik demetini parçalamada kullanılması yaygındır. Sıvılar, yağ ve su içerir. 1600 °C'den düşük sıcaklıklarda ergiyen az reaktif malzemeler için sulun kullanımı çok yaygındır. Şekil 3.22'de çelik veya demir tozu üretiminde kullanılan su atomizasyonu işlemi örnek olarak gösterilmiştir. Yüksek basınçlı su jetleri ergiyik demetine yönlendirilerek onun parçalanmasını ve hızlı katılaşmasını sağlar. Su genellikle bir kaç jetten yönlendirilir. Bu yöntem gaz atomizasyonuna benzer, ancak parçacıklar daha hızlı soğur ve atomizasyon sıvısı çok daha yüksek verimle hızı küçük tozlara aktarır.

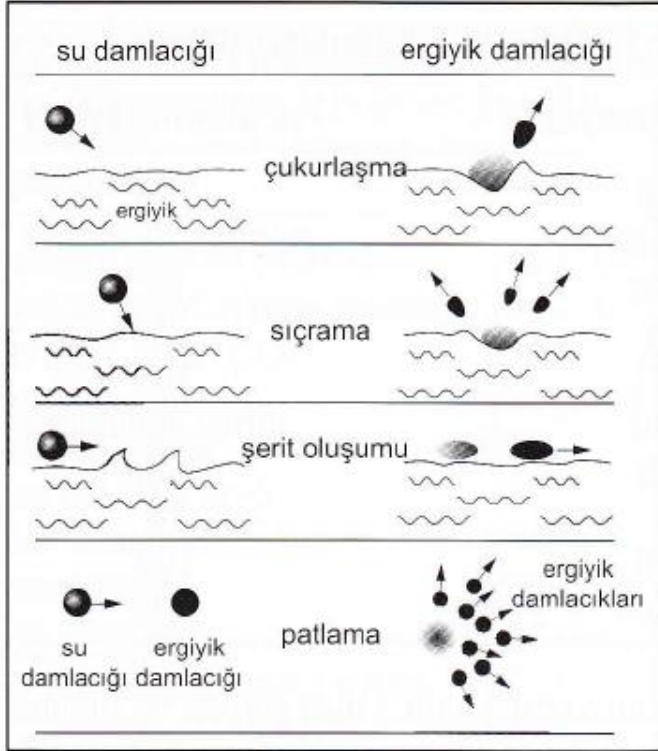


**Şekil 3.22.** Su atomizasyonu işlemi. Ergiyik demeti bir çok su jeti ile parçalanır. Su jetleri ve ergiyik demeti arasındaki açı atomizasyonun verimini belirler.

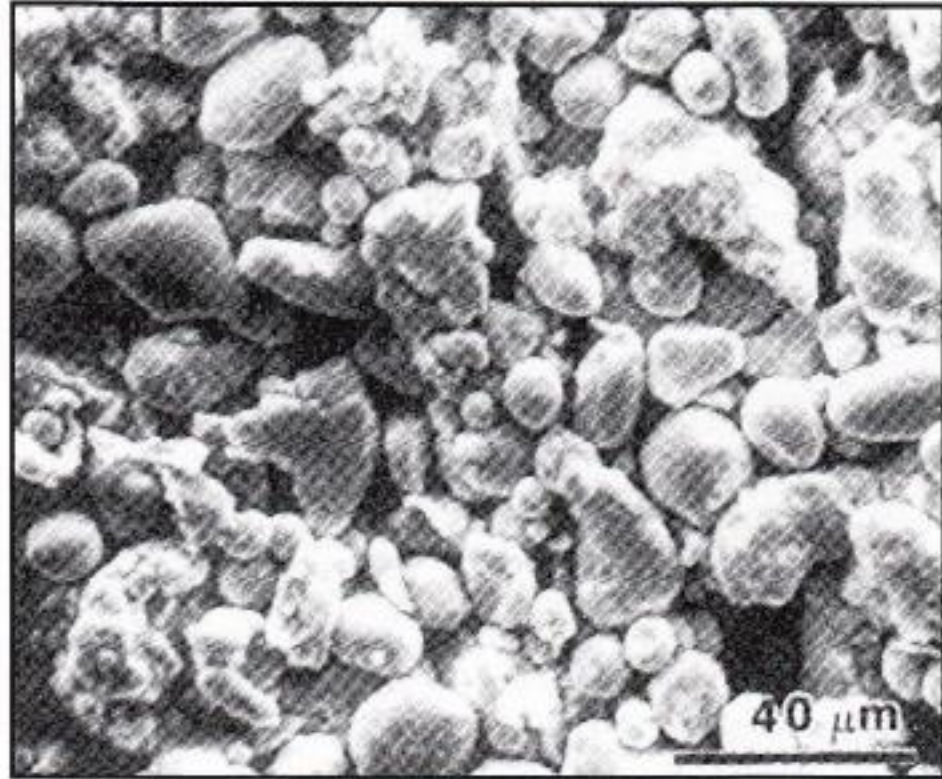


# Toz Üretimi

## Sıvı ve su atomizasyonu



**Şekil 3.23.** Su atomizasyonunda olası dört parçacık oluşum mekanizmasının şematik gösterimi; çukurlaşma, sıçrama, şerit oluşumu ve patlama. En büyük Weber sayısına sahip sonraki işlemler ile en küçük tozlar elde edilir.



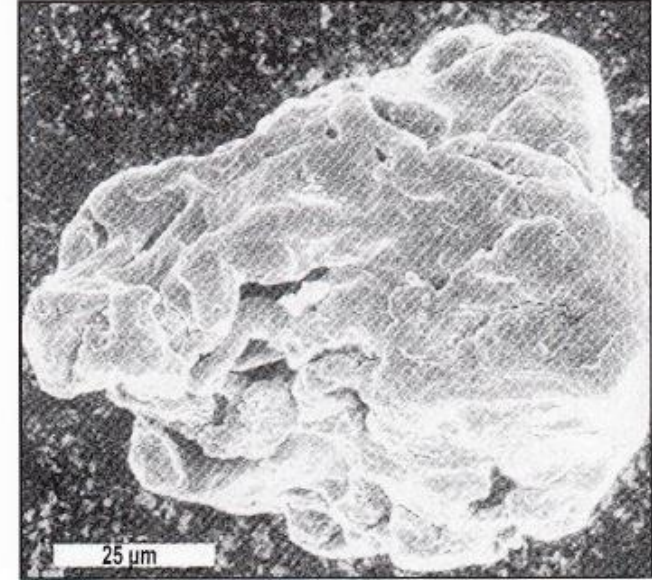
**Şekil 3.24.** Suyla atomize ederek bilerek yuvarlak şekilli üretilmiş -325 elek paslanmaz çelik tozlarının taramalı elektron mikroskop görüntüsü.



# Toz Üretimi

## Sıvı ve su atomizasyonu

Su atomizasyonu işleminde ana kontrol değişkeni basınçtır. Daha yüksek su basıncı daha yüksek su hızı ve daha küçük parçacık boyutu meydana getirir. Bir atomizasyon işleminde, bir çelik 1,7 MPa su basıncı ile atomize edilmiş ve 117  $\mu\text{m}$  ortalama toz boyutu elde edilmiştir. Fakat basıncın sekiz kat artması (13,8 MPa) ortalama boyutu ancak üç kattan daha az (42  $\mu\text{m}$ ) küçültmüştür. Su atomizasyonunda 150 MPa'a kadar basınçlar kullanılmış ve elde edilen parçacıkların boyutu 5  $\mu\text{m}$  boyut aralığındadır.

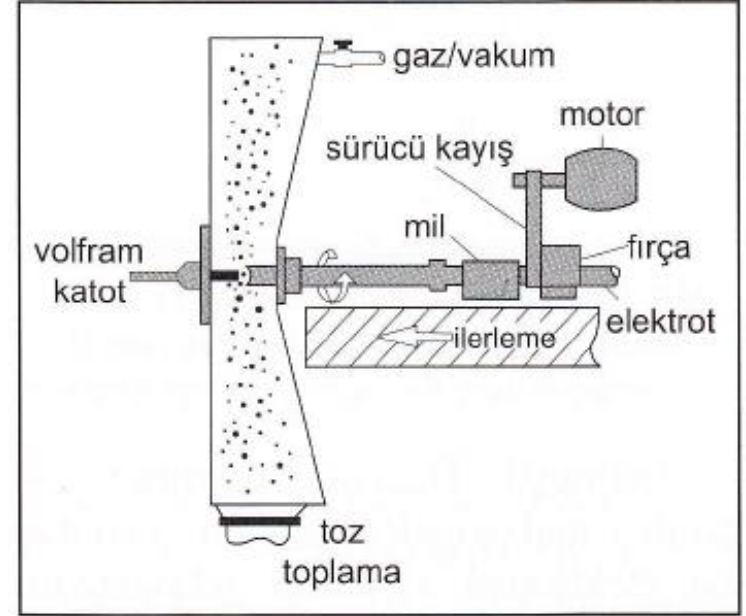


*Şekil 3.25. 120  $\mu\text{m}$  su atomize demir tozunun hidrojenle indirgeme ve öğütme sonrası yüksek büyütme görüntüsü (Fotoğraf: James Dunlap).*

# Toz Üretimi

- Savurma atomizasyon

Savurmalı atomizasyon, ergiyiğin döndürülmesi sonucu oluşan mekanik kuvvet etkisi ile damlacıkların katılaşması ile parçacıkların oluşturulması esasına dayanır. Pota ile temasın güçlük yarattığı yüksek sıcaklık malzemeleri veya reaktif malzemeler için çok kullanışlı bir yöntemdir. Ana fikir etrafında çok sayıda farklı uygulamaları mevcuttur: merkezkaç kuvveti ergimiş malzemeyi damlacıklar halinde fırlatır ve parçacıklar soğuyarak katılaşır.



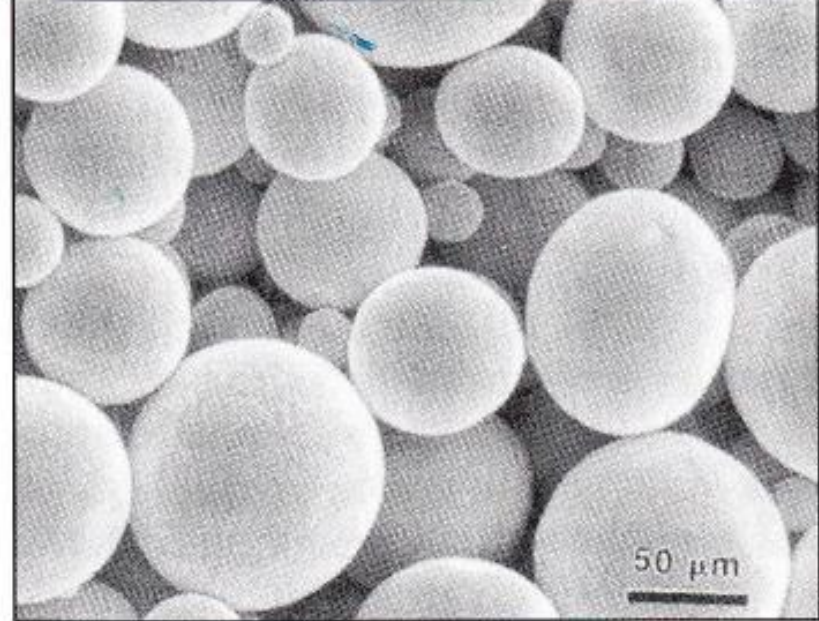
**Şekil 3.26.** Döner elektrot ile savurmalı atomizasyonun şematik gösterimi. Hızla dönen bir mil tungsten elektrot ile oluşturulan ark veya plazma üfleci ile ergitilir. Tozlar anot milden eriyen malzemenin savrulması ile oluşturulur ve katılaşma asal gaz veya vakum ortamında yapılır.

# Toz Üretimi

- Savurma atomizasyon

Düzenek, üretilmesi istenilen malzemedan yapılmış tükenen bir elektrottan meydana gelmektedir. Elektrotun ucu plazma arkı veya tungsten elektrot ile ergitilir. Tükenen elektrot, dıştan sürücü bir motor ile 50.000 dev/dak' ya kadar hızlarda döndürülür. Uç kısmında ergime oluştuğça, ergiyik damlacıklar halinde fırlatılır ve toplama odası içindeki koruyucu ortamda katılaşır.

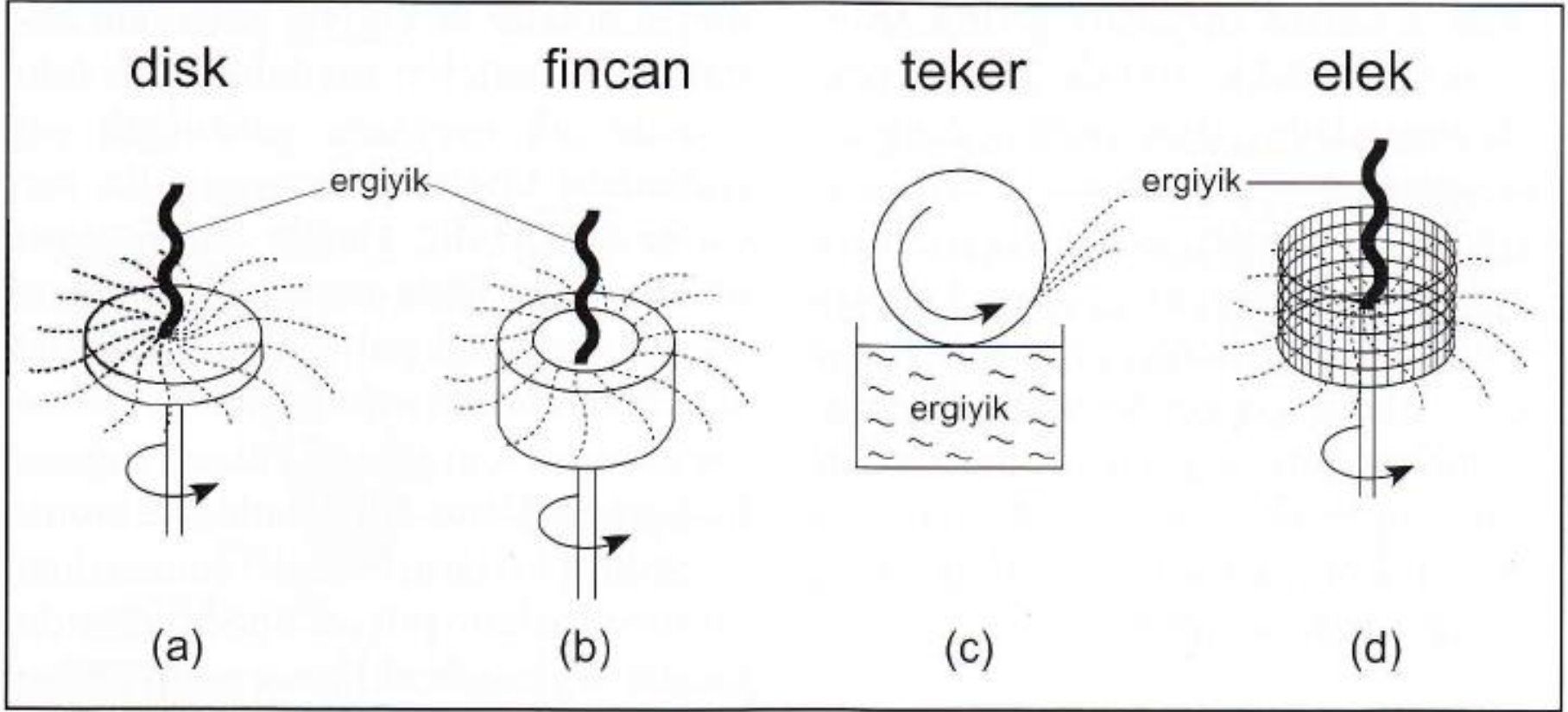
Gaz atomizasyonunda olduğu gibi savurmalı atomizasyon da tozları korumak amacıyla işlem çoğunlukla koruyucu ortam altında gerçekleştirilir.



*Şekil 3.27. Savurmalı atomizasyon ile üretilmiş tipik küresel tozların taramalı elektron mikroskop görüntüsü.*

# Toz Üretimi

- Savurma atomizasyon



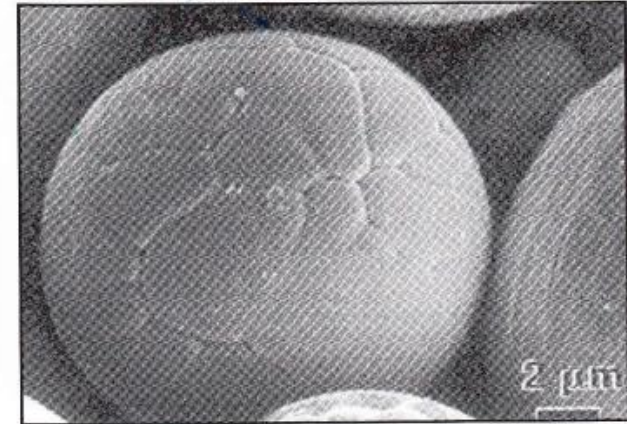
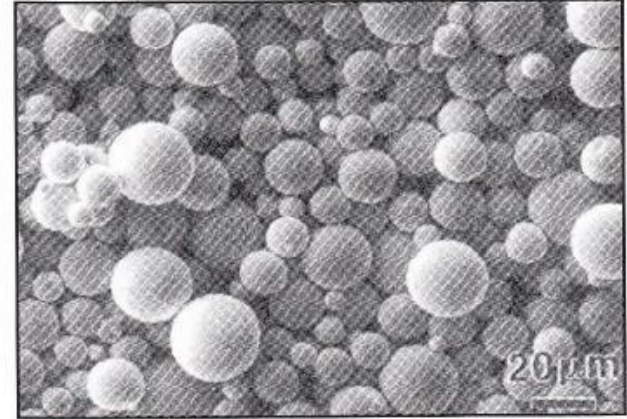
**Şekil 3.30.** Savurmali atomizasyon örnekleri: a) döner disk, b) döner fincan, c) döner teker (ergiyik fırlatma tekniği olarak da bilinir) ve d) döner elek.



# Toz Üretimi

- Plazma ve Diğer atomizasyon yöntemleri

Plazma, başka bir atomizasyon tekniği sağlar. Tel veya iri tozlar plazma üfleline beslenerek burada ergime ve ani ivmelendirmeye tabi tutulur. Sonuç olarak, ergimiş damlacıklar üflelin dışına püskürtülerek parçacık halinde katılır. Alaşım üretmek amacıyla, kullanılan tozlar karıştırılır, topaklandırılarak kümecikler oluşturulur ve bunlar plazma içerisinde eritilerek alaşım üretilir. Plazma arkının yüksek hızı ve yüksek sıcaklığı, aşırı ısıtma sağlar. Eğer tozun uçuş yolu uzunsa küresel şekil oluşur. 30 ile 80  $\mu$ arasında besleme tozları kullanılarak küresel toz oluşturulması optimize edilir.

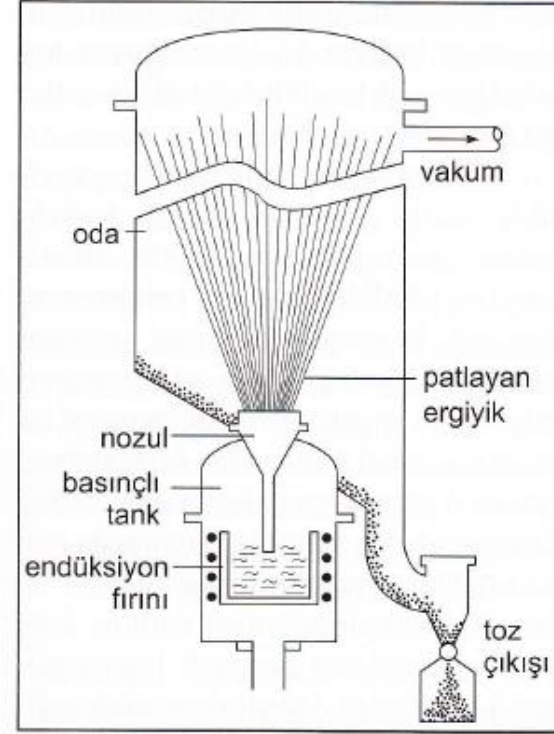


*Şekil 3.31. Volfram ve hafnium karbür tozlarının topaklarından plazma atomizasyonu ile üretilmiş alaşım tozlarının taramalı elektron mikroskop resimleri (Fotoğraf: sn Farooq).*

# Toz Üretimi

- Plazma ve Diğer atomizasyon yöntemleri

Şekil 3.32'de şematik olarak gösterilen ergiyik patlama yönteminde hidrojene doymuş sıvı metal ve vakum altında, hızla hidrojenden ayrışma, doymuş sıvı metalden hızlıca hidrojenden ayrılarak püskürtme damlacıkları oluşturmak için kullanılır. Hidrojen ile ergiyik üzerine 1 ile 3 MPa basınç uygulanır. Bir sifon borusu doymuş sıvı metali büyük vakum odasında taşır. Basınç, hız ve hidrojen ayrışması ergiyiğin vakum odasına patlamasına neden olur. Bu teknik süper alaşım tozlarının üretilmesinde kullanılır. Titanyum hidrür ve diğer metallerin kullanıldığı türler de görülmüştür. Ergiyik patlatma işleminde soğuma hızı, yavaştır, çünkü vakum odasında sadece ışımaya ile soğuma gerçekleşir, gaz atomizasyonda olduğu gibi taşınım soğuması gerçekleşmez.



*Şekil 3.32. Küresel toz üretimi için ergiyik patlama tekniği. Ergimiş metale hidrojen ile basınç uygulanır ve sifon borusu ile düşük basınçlı odaya atılır. Hızlı basınç değişimi ve hidrojen ayrışması sonucu sıvı metal patlayarak damlacıklar oluşur. Bu damlacıklar uçuş sırasında katılaşıp tozları meydana getirir.*

# Toz Üretimi

- Atomizasyon Sınırlamaları

Atomizasyon çarpışma hızı genellikle sestene yavaştır. Bunun sonucu olarak çarpışma hızı bütün atomizasyon tekniklerinde ısı çekilmesini, parçacık boyutunu ve enerji verimini sınırlar. Atomizasyonda enerji verimi düşüktür. Atomizasyon akışkanının debisi arttıkça oluşan parçacık boyutunda çok az küçülme gerçekleşir.

Su atomizasyonunda, küçük parçacıklar üretmek amacıyla çok yüksek basınç kullanmak verimsiz olur. Küçük tozlar basıncın arttırılmasıyla elde edilemez. Küçük parçacıkları oluşturabilmek için çok yüksek gaz yoğunluğu ve hızına ihtiyaç duyulur, imkan dahilinde roket nozul teknolojisi kullanılmalıdır.

Su atomizasyonu diğer yöntemlere göre genellikle daha homojen mikroyapı sağlar fakat su. tozların oksijen seviyesini önemli ölçüde artırır. Su atomizasyonu ile üretilmiş yüksek alaşımli tozlarda yüzey oksitleri ve düzensiz parçacık şekli yaygın problemdir.

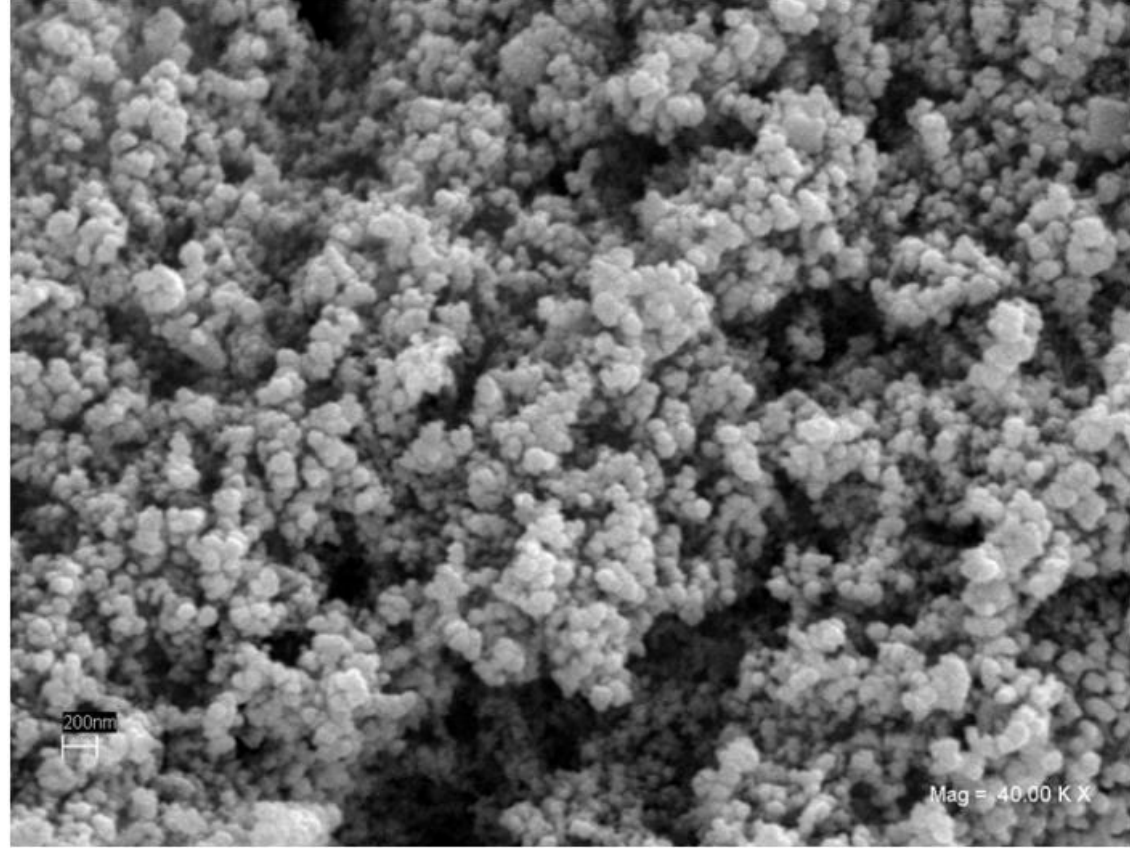
ÇİZELGE 3.5. Atomizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması

işlem	boyut aralığı, $\mu\text{m}$	parçacık şekli	dağılım	maliyet
döner elektrot	200-600	küresel	iki modlu	yüksek
döner disk	50-300	küresel	orta	yüksek
döner pota	200-1000	çubuk	dar	düşük
eriyik savurma	200-1000	pul	orta	düşük
su atomizasyonu	5-800	düzensiz, nodüler	geniş	düşük
gaz atomizasyonu	15-300	küresel	orta	orta
ergiyik patlama	150-500	küresel	orta	orta
plazma atomizasyonu	5-80	küresel	dar	yüksek
kivircim erozyonu	1-20	küresel	orta	yüksek

# Toz Üretimi

- Buharlaştırma Teknikleri

Buhar fazından homojen çekirdeklenme ile tozların oluşturulmasında oldukça ilerleme kaydedilmiştir. Bu tip yaklaşımlar nano-ölçekli parçacıkların oluşturulmasında çok yararlıdır. Günümüzde 10 nm (0,01  $\mu\text{m}$ ) boyuta kadar çeşitli tozlar bu yöntemlerle üretilmektedir.

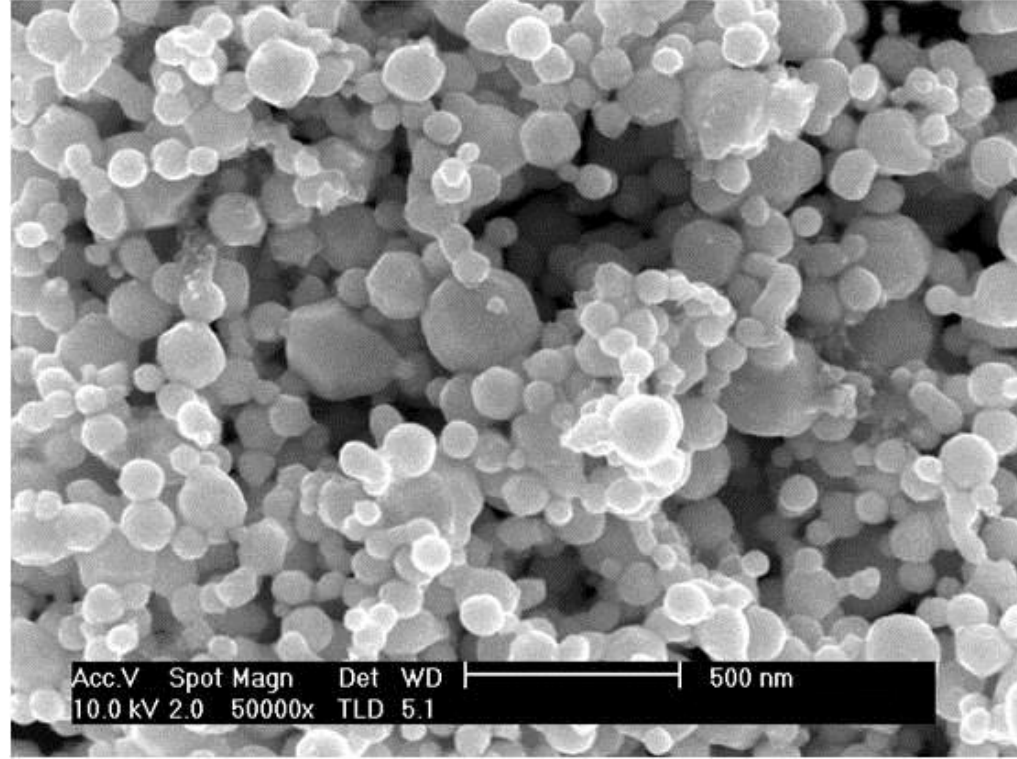




# Toz Üretimi

- Buharlaştırma Teknikleri

Atmosfer basıncının %10'u civarında düşük basınçlı argon içinde malzeme buharlaştırılır. Düşük basınçta, ısı kaynağından uzaklaştıkça sıcaklık hızla düşer. Böylece, buharlaşan malzeme ısı kaynağından uzaklaştıkça soğur ve aşırı soğutulmuş olur. Sonuçta, küçük katı parçacıklar buhardan doğrudan çekirdeklenir. Bu parçacık dumanı soğuk bir altlık üzerinde toplanır.



Buhardan üretilmiş parçacıkların ilgi çekici tarafı yüksek saflık ve küçük boyutu bir arada sunmasıdır.

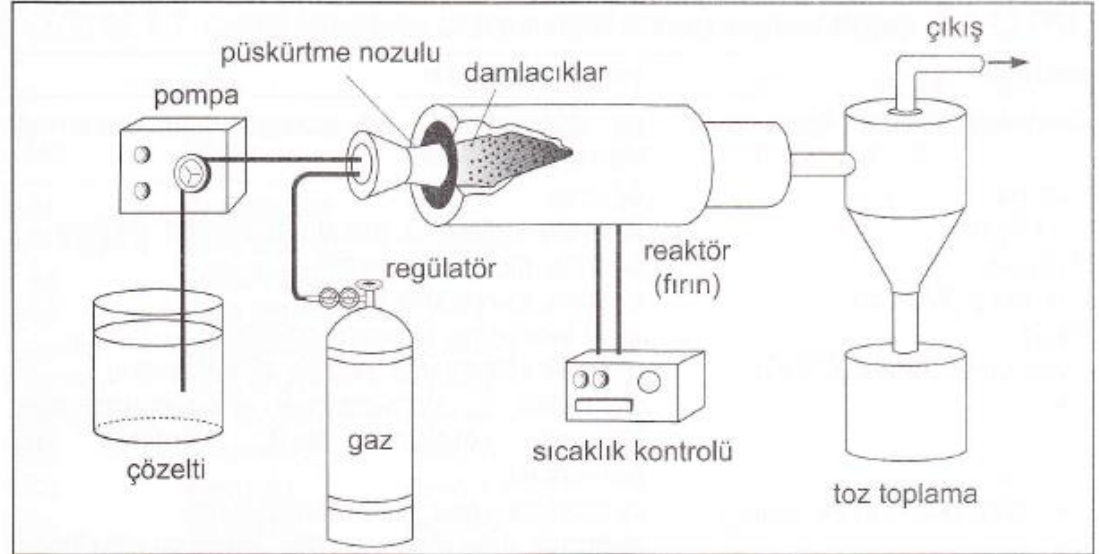
bakır, gümüş, demir, altın, platin, kobalt ve çinko gibi bir çok metalin oluşturulmasında uygulanmaktadır. Buhar veya parçacıklar atmosferle istenilerek tepkimeye sokularak nitrürler, oksitler veya diğer bileşikler oluşturulabilir. Maalesef, küçük parçacıkların taşıma, depolama ve muamelesi oldukça zordur. Bileşimi korumak ve parçacıkların yanmasından kaçınabilmek için asal gazlı eldivenli kabin içinde işleme tabi tutulmasına ihtiyaç duyulur.

# Toz Üretimi

- Mikron-altı ve Nano-ölçekli tozlar için teknikler

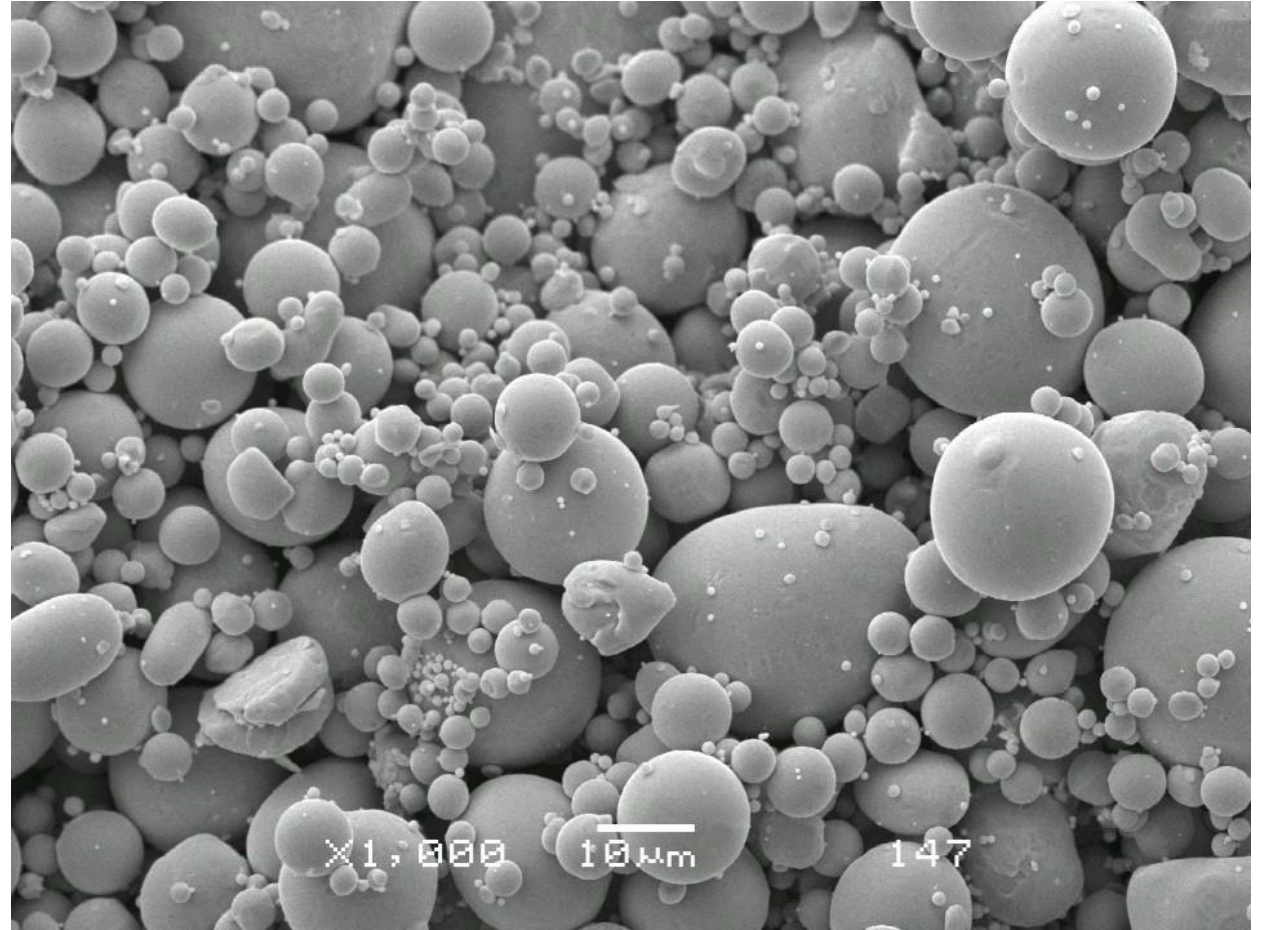
Yukarıda bahsedildiği üzere, nano-ölçekli toz oluşturulmasının bir yolu da buhar fazından yoğunlaşmadır. Buhar türleri altlık ısıtılarak, elektron ışın, lazer, plazma, alev veya çözelti, toz, sıvı, veya buhar gibi girdi malzemeleri etkileyen endüksiyon alanları ile üretilir. Malzeme kaynama noktasına ısıtılır ve sonra 10 nm - 1 µm boyut aralığında parçacıkları topak halinde çekirdeklendirmek üzere yoğunlaştırılır.

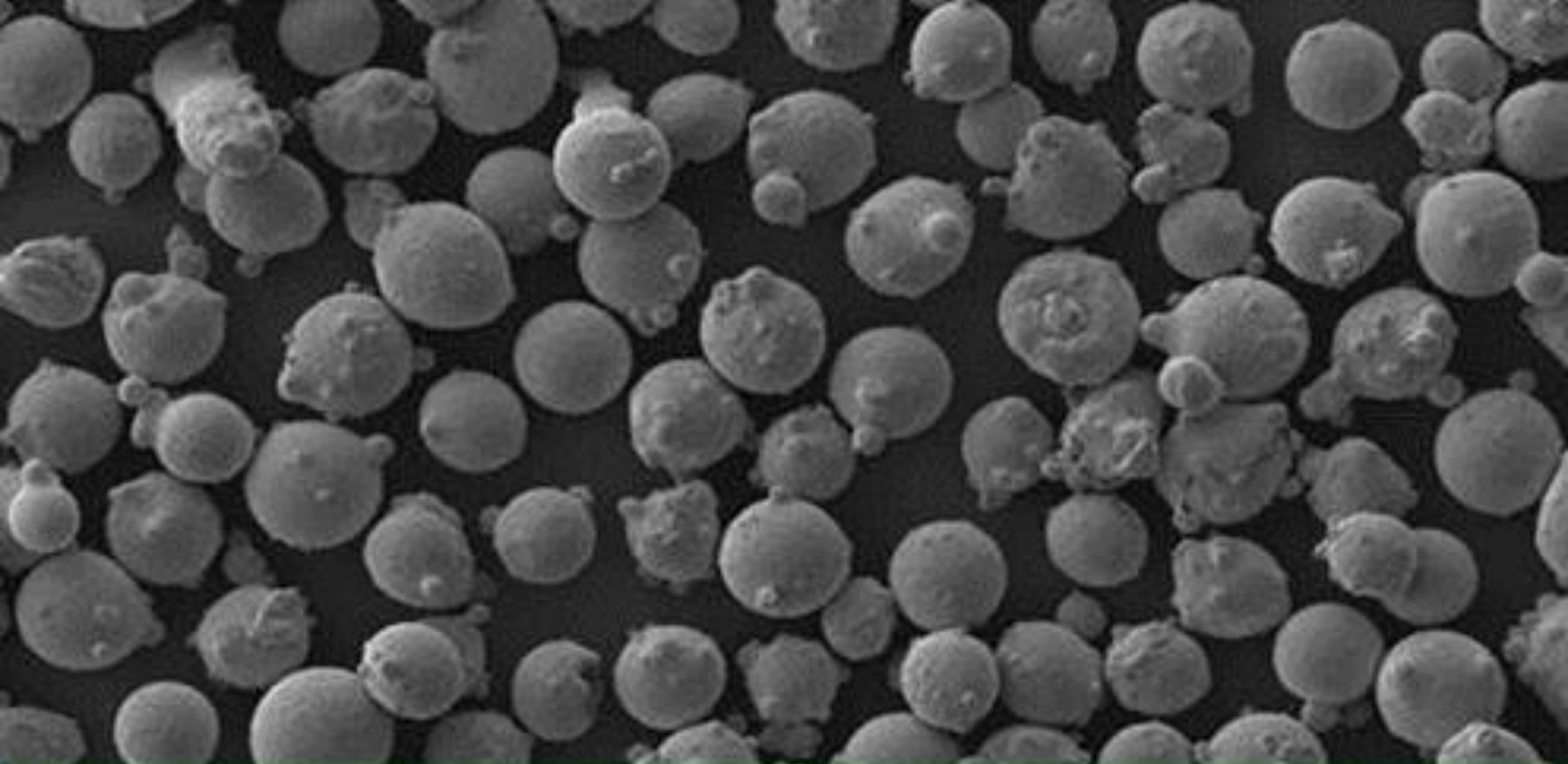
Malzemenin çözeltisi hırlanır ve bu çözelti gaz içinde duman oluşturma nozuluna pompalanır. Duman fırını geçerken çözücü buharlaşarak küçük parçacıkların çekirdeklenmesine neden olur. Bu yöntem çok sayıda oksit için kullanılmaktadır, fakat metallerde kullanılmaz.



Şekil 3.36. Isıtılan bir reaktöre çözeltinin pompalanması ile nano-ölçekli tozlar oluşturulur. Çözücü buharlaştırılarak ince tozlar çekirdeklenir.

# Toz Üretimi





# Mikroyapı Kontrolü

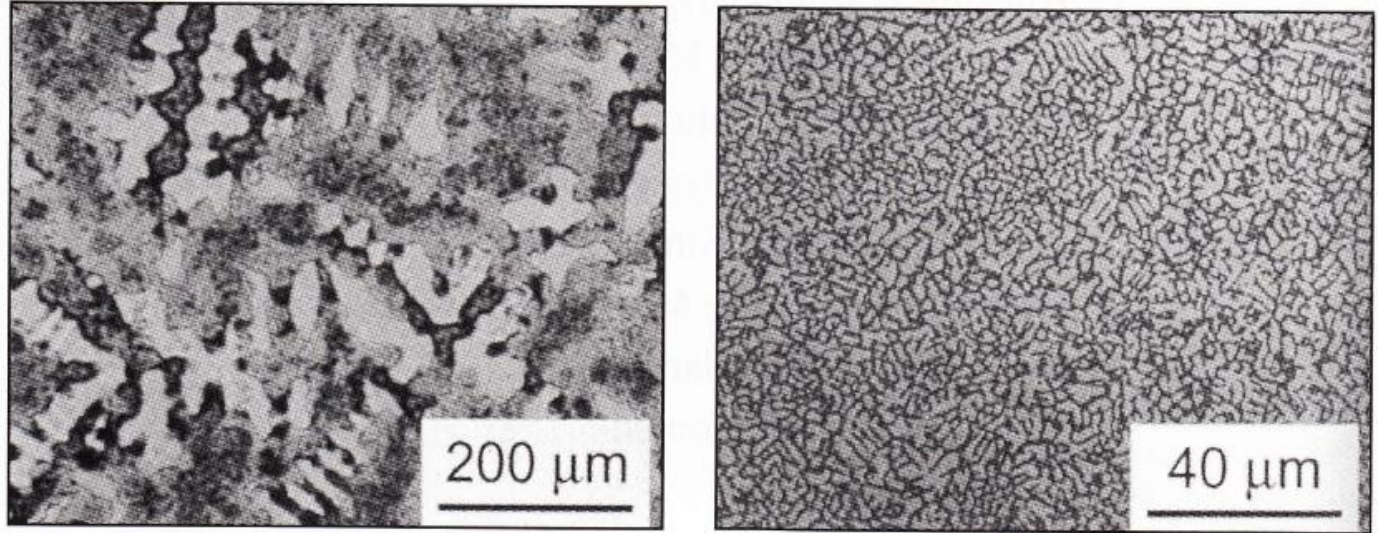


# Mikroyapı Kontrolü

Tozlar küçük boyutlara sahiptir. Küçük nesnelere büyük hacimli nesnelere oranla daha hızlı ısınır ve soğur. Bu nedenle parçacıkları milisaniye düzeyinde oldukça hızlı bir şekilde katılaştırmak mümkündür. Bu tür hızlı katılaştırma, elektrik temas malzemelerinden, golf sopası gibi uygulamalara kadar özgün özellikleri için üretilmiş üstün malzemelerin imaline imkan tanır.

Hızlı katılaştırma teknolojileri, HKT kısaltması ile gösterilir. Hızlı katılaştırma ile üretilmiş tozlar, dengeye yakın yavaş soğutma koşulları altında soğutulmuş malzemelere göre farklı yapılara sahiptir. Aşırı hızlı soğutma durumunda düzenli bir kristal yapısı olmayan metalik camlar oluşturabilir. Oluşum seçenekleri aşırı doymuş alaşım durumundaki denge dışı bileşimler üretiminden yeni kristal yapılara ve amorf metallere kadar uzanır.

# Mikroyapı Kontrolü



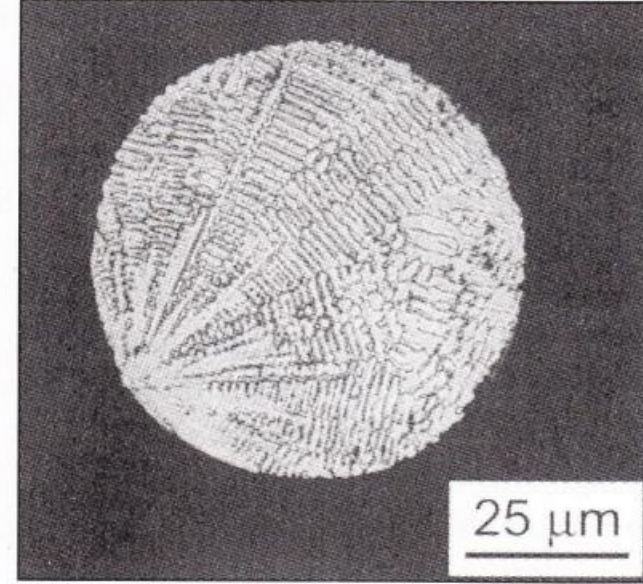
*Şekil 4.1. Geleneksel döküm ve hızlı katılaşmış toza ait mikroyapıların karşılaştırılması. HKT ile elde edilen mikroyapı farklılığı gösterilmiştir (S. Farooq'un izni ile).*

hızlı katılaştırma ile elde edilen metalurjide sık karşılaşılan eğreltiotu yaprağı görünümünde klasik dendritik segregasyon yapısı görülmektedir. Şekilde iki mikroyapı arasındaki büyüklük farkı dikkate alınmalıdır. Bu malzeme  $Pd_{40}Cu_{30}Ag_{30}$  bileşiminde olup yüksek güvenilirlikli kaygan elektriksel temas malzemesidir. (Bu malzeme için alt indis olarak verilen rakamlar bileşimi ifade eder ve toplamı 100'e eşittir. Ancak  $CH_4$  veya  $H_2O$  gibi bileşenleri göstermez.) Bu durumda mikroyapı homojenliğindeki artış, HKT alaşımlarından dayanıklı elektriksel temas oluşturulması için gerekli üretim kademe sayısını oldukça düşürür.

# Mikroyapı Kontrolü

## Tozların Mikroyapısı

Alışılmış döküm teknolojisi yavaş soğumayı gerektirir. Büyük bir döküm parçasının oda sıcaklığına soğutulması bir günü almaktadır. Bunun tersine küçük atomize tozlar yüksek yüzey alanına sahiptir ve böylece 1000 C/s ve üzeri değerlerdeki soğutma hızlarına ulaşmak mümkündür. Yüksek iletkenlikteki gazın içinden türbülanslı akışa maruz bırakılan küçük tozlar için soğuma Hızı  $10^6$  C/s seviyesine ulaşabilir. Soğuma hızında meydana gelen bu değişimle birlikte dökümde gözlenen kimyasal segregasyon derecesi azalır.



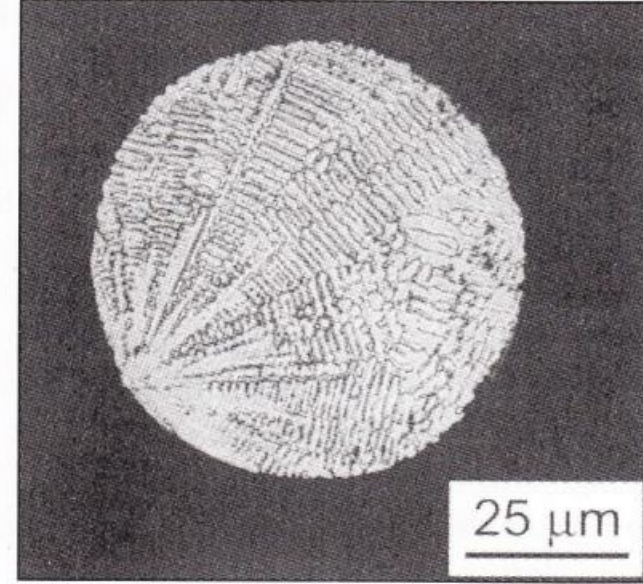
*Şekil 4.2. Yüzey çekirdeklenme bölgesinden başlayarak radyal bir dendritik yapı gösteren gaz atomize parçacığın kesitine ait optik mikroskop görüntüsü. Söz konusu çekirdeklenme muhtemelen ergiyik damlacığının daha önceden katılaştığı küçük bir parçacık ile teması sonucu başlamıştır.*



# Mikroyapı Kontrolü

## Tozların Mikroyapısı

Şekil 4.2'de yer alan parçacık kesitinde gösterildiği gibi dendritik mikroyapının oluşumudur. Bu durumda, ergiyik damlacığın katılmış küçük parçacığa çarptığı noktadan çekirdeklenme yayılarak dendritlerin büyümesi ile katışmayı sağlar. Bu oluşum heterojen çekirdeklenme için bir örnektir.

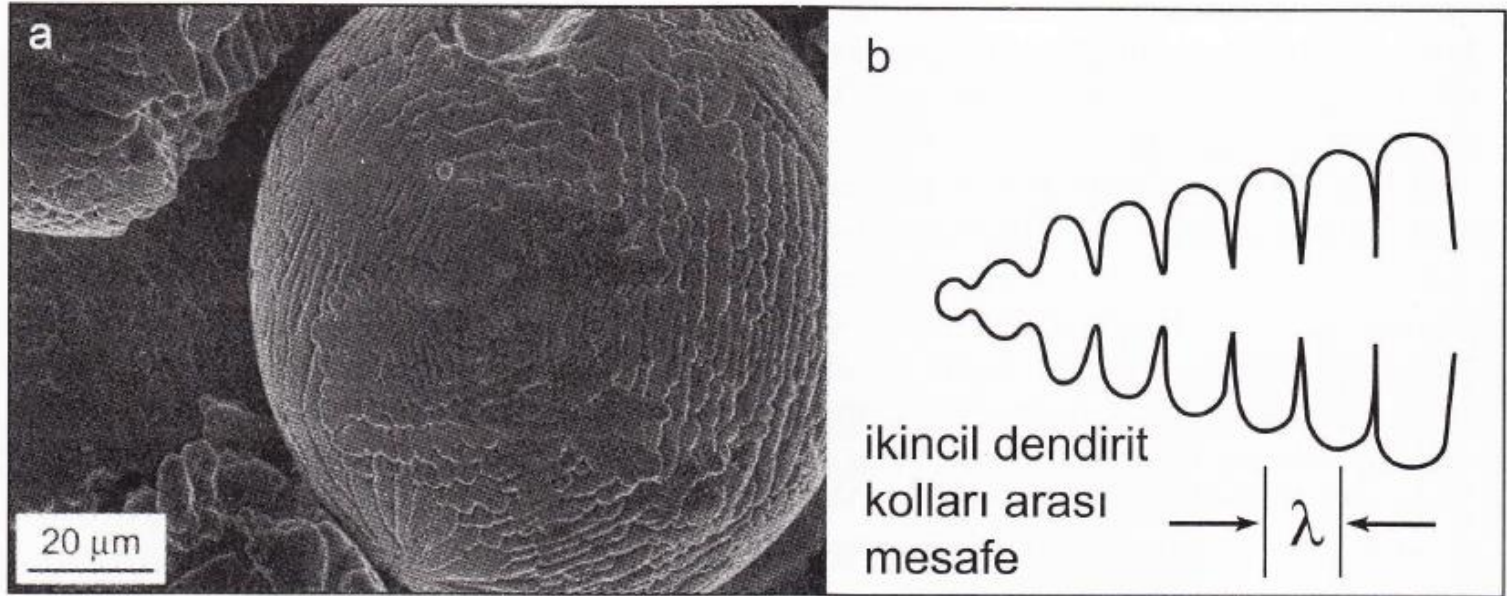


*Şekil 4.2. Yüzey çekirdeklenme bölgesinden başlayarak radyal bir dendritik yapı gösteren gaz atomize parçacığın kesitine ait optik mikroskop görüntüsü. Söz konusu çekirdeklenme muhtemelen ergiyik damlacığının daha önceden katılmış küçük bir parçacık ile teması sonucu başlamıştır.*



# Mikroyapı Kontrolü

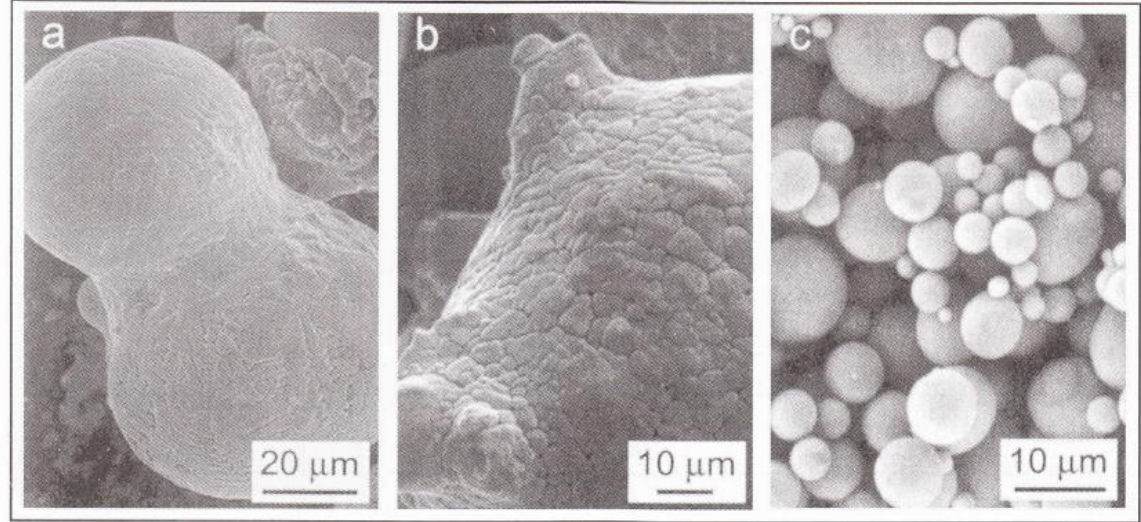
Dendritik yapı ile segregasyon arasında bir ilişki vardır; dendritlerin ergime sıcaklığı, dendritler arası bölgelerin ergime sıcaklığından daha yüksektir. Bu durumlarda mikroyapının ölçeği soğuma hızının ölçümünü sağlar. Yaygın bir ölçüm, Şekil 4.3'te gösterilen ikincil dendrit kolları arası mesafedir. Mikroyapı, soğuma hızının ölçümüne imkan vermesinin yanı sıra atomize tozdaki segregasyonun kabaca ölçümünü de



**Şekil 4.3.** İkincil dendrit kolları arası mesafesinin ( $\lambda$ ) mikroyapısal olarak tanımlanması. (a) santrifüj atomizasyonu ile üretilmiş parçacığa ait tipik dendritik yüzey görüntüsü, (b) soğutma hızının tahmini için ikincil dendrit kolları arası mesafenin ölçülmesi.

# Mikroyapı Kontrolü

Şekil 4.6 yavaş, orta ve hızlı soğutma ile katılaştırılmış tozların yüzey yapısı görünümünü karşılaştırmaktadır. Yavaş soğutma ile dendritik yapı oluşur, daha hızlı soğutma homojen tane şekli (eşeksenli) oluşturur ve çok hızlı soğutma tane yapısı veya bileşim segregasyonu üzerine bilgi vermez.

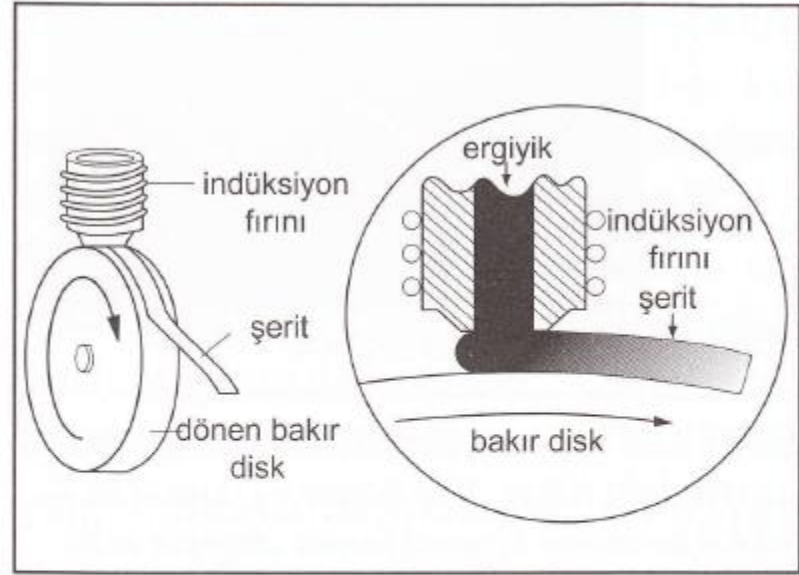


*Şekil 4.6. Farklı üretim yöntemi ile elde edilen tozların karşılaştırılması: a) Santrafuj atomizasyonu ve dendritik yapı b) asal gaz atomizasyonu ve eşeksenli mikroyapı c) yüksek hızda gaz atomizasyonu ve yapısız mikroyapı. Hızlı soğutma parçacıklarda segregasyonun azalmasına sebep olmuştur.*

# Mikroyapı Kontrolü

Malzeme geliştirme çalışmalarında Şekil 4.8'de gösterildiği gibi ergiyik savurma uygulamalarında elde edilen yüksek soğutma hızları oldukça yararlı olmuştur. Bu teknikte bir ergiyik hız\ a dönen (20.000-50.000 dev/dak) bakır disk üzerine akıtılır.

Ergiyik disk üzerinde soğur, ancak santrifüj kuvvetleri ile ince, soğumuş ve 25-100 pm kalınlığa sahip amorf şeritler halinde hızla savrulur.

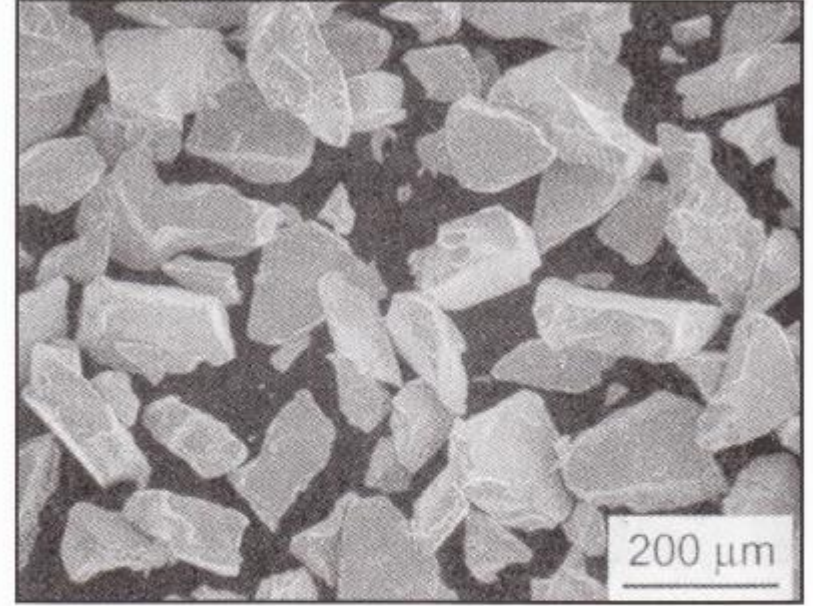


*Şekil 4.8. Ergiyik savurma işleminin şematik gösterimi. Az miktarda sıvı ergiyik hızla dönen bakır disk üzerine beslenir. Hızla soğutulmuş camsı şeritler daha sonra santrifüj kuvvetleri ile diskten savrulur.*



# Mikroyapı Kontrolü

Daha sonrasında elde edilen bu şeritler Şekil 4.9'da gösterildiği gibi daha küçük parçacıkları oluşturmak üzere öğütülür.



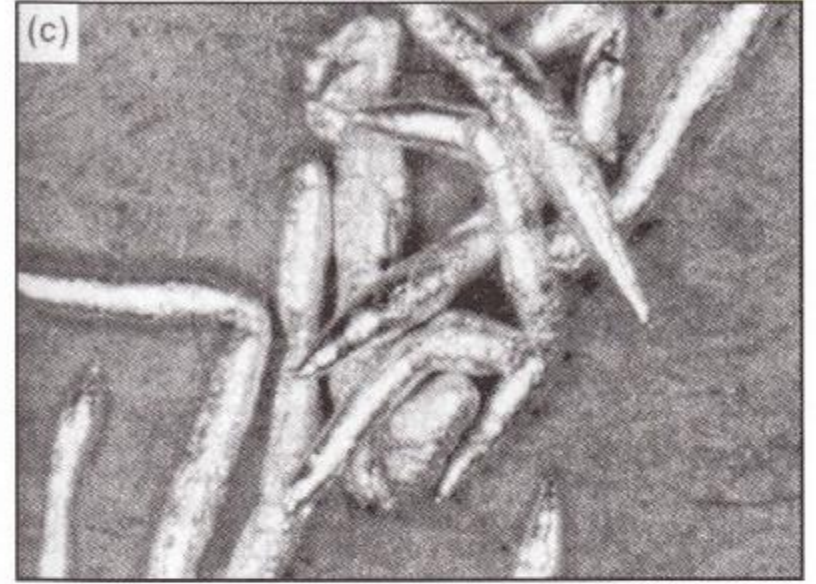
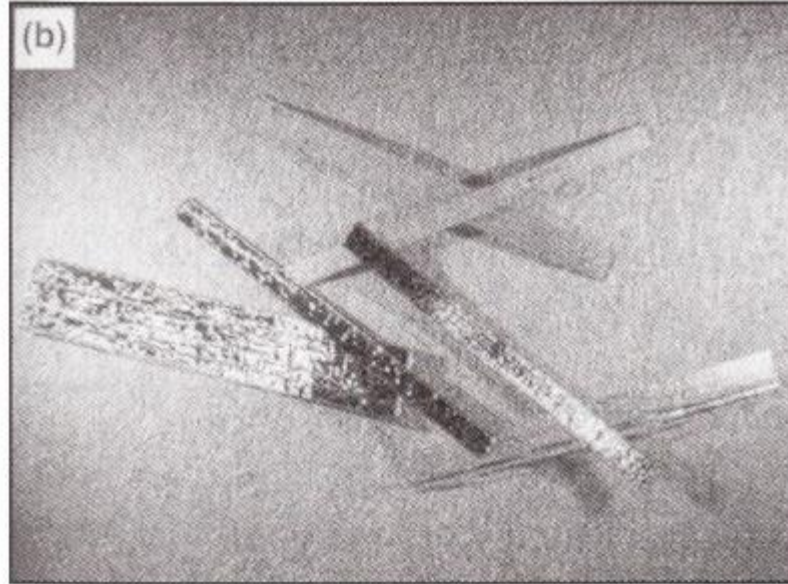
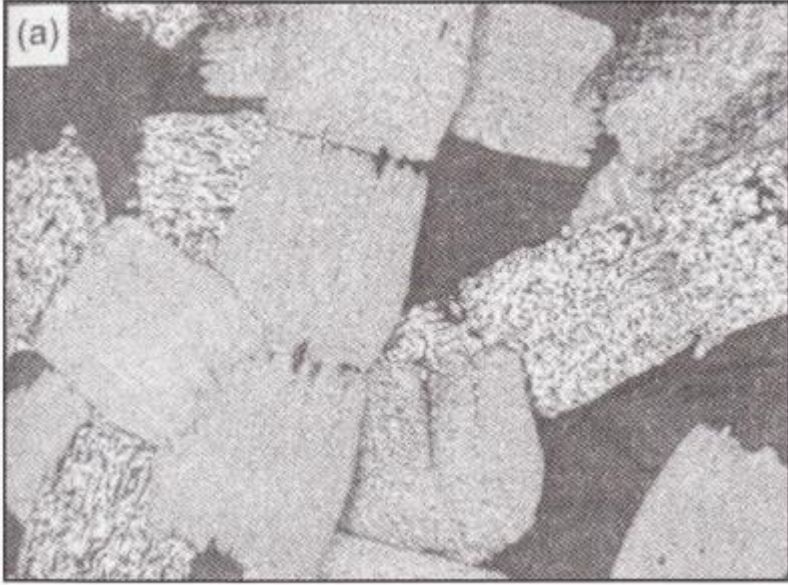
*Şekil 4.9. Ergiyik savurma yöntemiyle üretilen ve daha sonra öğütülen açılı yapıdaki amorf Fe<sub>14</sub>Nd<sub>2</sub>B tozlarının SEM görüntüsü (fotoğraflar Ron Iacocca'nın izni ile).*



# Mikroyapı Kontrolü

Eğer diskin yüzü dokulu ise Şekil 4.10'da gösterildiği gibi kesik parçacıkların, pulsu yapıların veya ince elyaf yapıların oluşumu mümkündür. Amorf toz üretimi için atomizasyon ile doğrudan oluşum, ergiyik savurmaya tercih edilir. Hızlı soğutma, yüksek hızlı helyum jetleri ve ilave olarak ergiyik parçacıklarının hızla soğutulması ile yapılır.

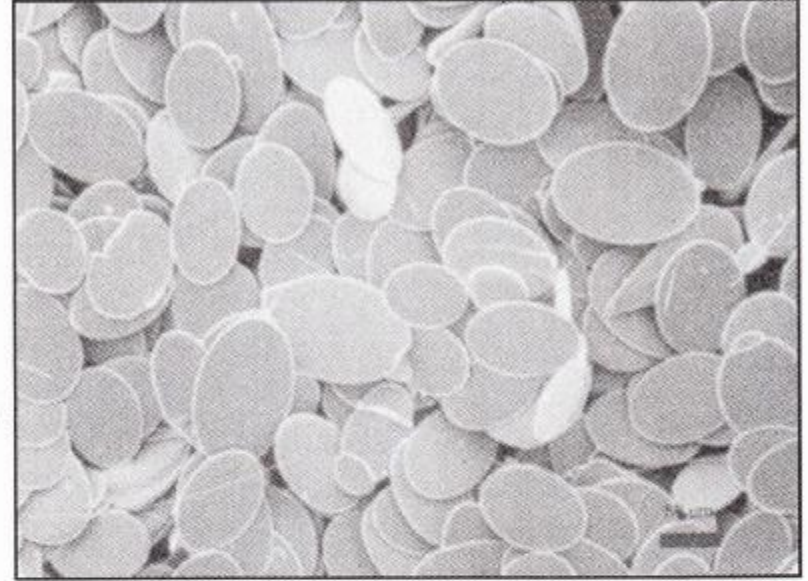
# Mikroyapı Kontrolü



**Şekil 4.10.** Savurma disk atomizasyon teknolojisi ile elde edilebilen pulsu, şerit ve çubuk gibi olası üç toz şeklinin optik mikroskop görüntüleri. Tüm bu yapılar dönen bakır diskin yüzeyindeki dokuya bağlı olarak oluşur (Louis Campbell' in izni ile).

# Mikroyapı Kontrolü

Şekil 4.11'de dönen disk üzerine gaz atomize damlacıkların püskürtülmesi ile üretilmiş olan 75 mikron çaplı plakacık şekilli amorf parçacıklar yer almaktadır. Atomize edilmiş olan damlacıklar dönen katı altlığa çarpmaları halinde aşırı soğur ve böylece söz konusu darbe aşırı soğumuş damlacıkların amorf yapılı plakacıklar şeklinde oluşmasına neden olur.



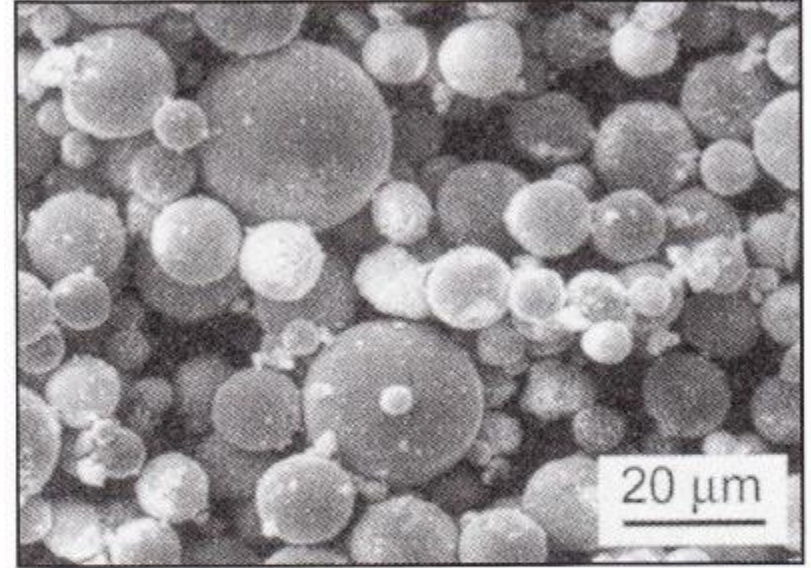
*Şekil 4.11. Ergiyik damlacıkların gaz atomizasyonu ile üretilen 75  $\mu\text{m}$  çaplı plaka şeklindeki amorf tozların görünümü. Ergiyik damlacıkları hızla dönen disk üzerine çarpar; disk damlacıkları kaydırır ve plaka şeklini alacak biçimde soğur (M. Oğuchi'nin izni ile).*



# Mikroyapı Kontrolü

Kullanılan diğer bir yöntem ise yüksek sıcaklık plazma tabancası ile eritmek ve eriyik damlacıklarını hızlandırarak soğuk bir altlığa doğru püskürtmektir. Püskürtme, küçük eriyik damlacıklara katılma öncesi çarparak daha küçük parçacıklara ayrılmasına neden olur ve Şekil 4.12'de gösterildiği gibi küçük, küresel şekilli HKT tozların oluşumunu sağlar.

Söz konusu şekilde, plazma mikro atomizasyon ile üretilen tungsten alaşımı parçacıklar görülmektedir.



*Şekil 4.12. Plazma mikroatomizasyon ile üretilen tungsten alaşım kompozit tozunun tarama elektron mikroskop görüntüsü (S. Farooq'un izni ile).*

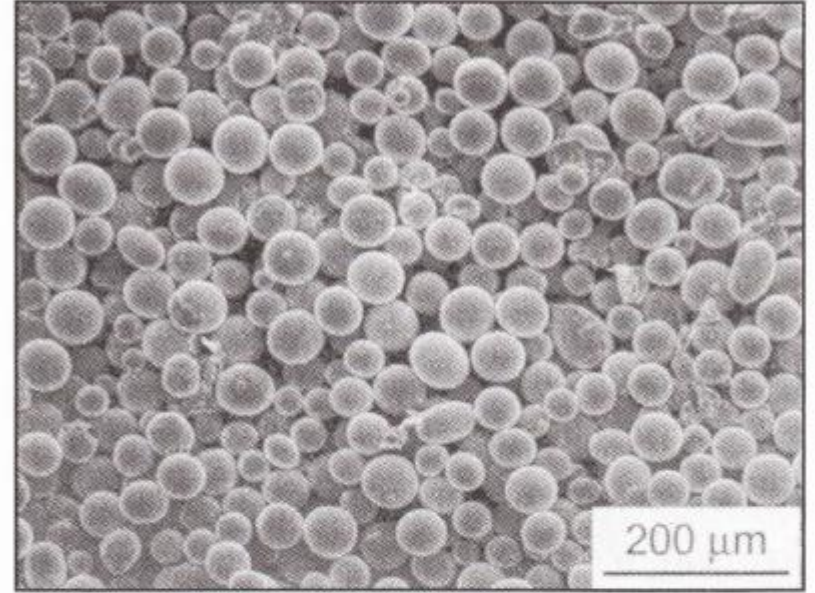


# Mikroyapı Kontrolü

## Atomizasyon sınırlamaları

10-100 mikron arasındaki parçacık boyutları için soğuma hızı yaklaşık olarak 104-105°C/s arasındadır, ancak bazı durumlarda bu değer 106 C/s olabilmektedir. Altlık kullanılarak yapılan çok hızlı soğutmalarda 106 J/m<sup>2</sup>.s.C gibi bir ısı çıkış hızları sağlanır.

Su atomizasyonu hızlı soğutmaya imkan verir ve homojen yapılar oluşur. Ancak, hızlı soğutma düzensiz parçacıkların oluşumuna neden olur ve su ile soğutmada, çoğu zaman tozlarda oksijen kirliliği görülür. Bu nedenle küresele yakın HKT tozu üretmek için gaz ve su atomizasyon bileşimi kullanılır.

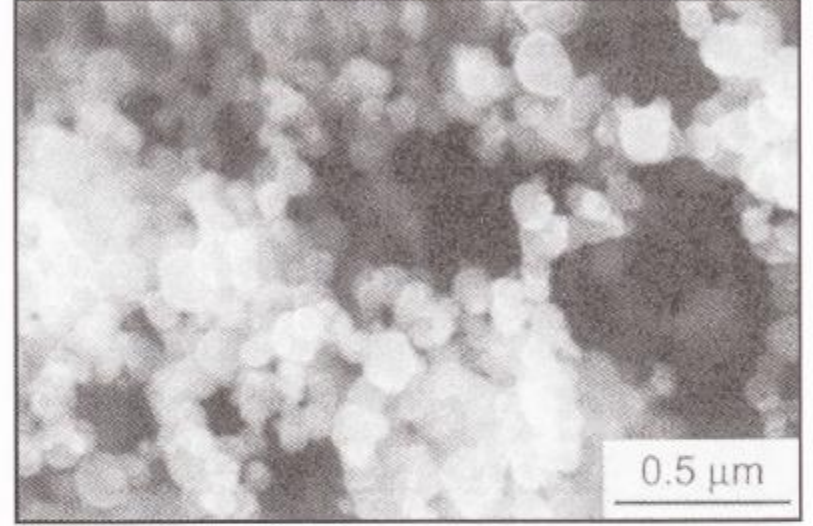


*Şekil 4.24. Damlacık oluşturmak için önce gaz atomizasyonu ve ardından soğutmayı hızlandırması için su atomizasyonu uygulanmış HKT tozların tarama elektron mikroskop görüntüsü. Küresel şekil ergiyiğinin aşırı ısıtılması ve gaz atomizasyon şartlarından kaynaklanmaktadır, ancak HKT yapısı hızlı soğutmadan kaynaklanmaktadır.*

# Mikroyapı Kontrolü

## Nano boyutlu yapılar

Buharın doğrudan katıya yoğuştuğu noktada soğutulması ve HKT ile ilgili çarpıcı bir örnektir. Benzer şekilde malzeme buharlaştırılır ve katı çökeltileri ısı kaynağından uzakta oldukça küçük kristaller halinde elde edilir. Isıtmanın bir vakum ortamında yapılması durumunda buhar, kaynaktan uzaklaşır ve genellikle istenilen toplama noktalarına soğuk yüzey üzerinde soğuyarak yoğuşur. Bir alternatif olarak toz yoğun bir şekilde öğütülür ve atomik ölçekte karışım sağlanarak toz tane boyutu açısından aşırı inceltir.

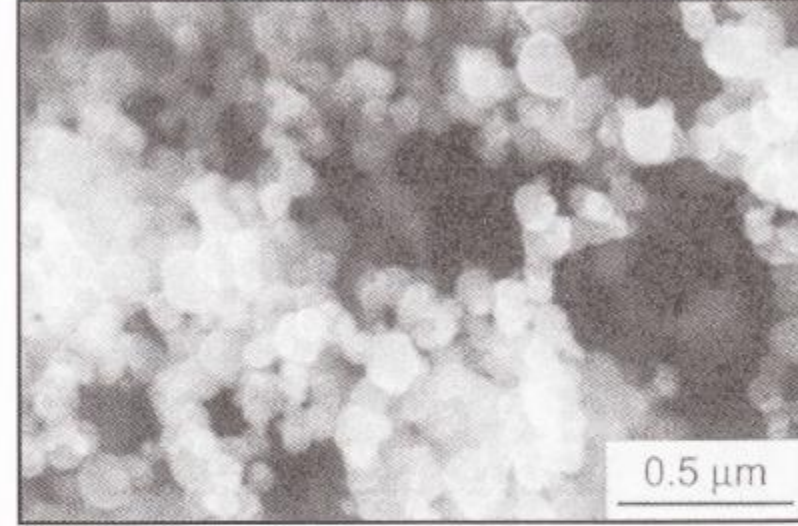


*Şekil 4.27. Buhar yoğunlaştırması ile üretilen nano boyutlu demir tozları. Bu tozlar yaklaşık  $10 \text{ m}^2/\text{g}$  gibi yüksek yüzey alanına sahip olup ortalama tane boyutu  $80 \text{ nm}$ 'dir. Ancak topraklanma ile medyan parçacık boyutu  $11 \mu\text{m}$  seviyesinde ölçülmüştür.*

# Mikroyapı Kontrolü

## Nano boyutlu yapılar

Homojen olarak buhar fazından çekirdeklenen parçacıklar 20-100 nm boyut aralığında oluşturulabilir. Şekil 4.27 nano boyutlu demir tozlarına ait yüksek büyütme bir tarama elektron mikroskop görüntüsünü vermektedir. Görüntüde yüksek derecedeki toplanma dikkat çekmektedir. Nano boyutlu tozlar birim hacim başına yüksek Ara yüzey alanına sahiptir. Tane sınırları ve yüzeyler, diğer kristal yapıli bölgelere göre yüksek enerjili olduğundan bu malzemeler yeni performans ve özellik fırsatları sergileyebilir. Yüksek Ara yüzey enerjisinden dolayı bu tozlar değişik şekillendirme davranışı gösterirler.



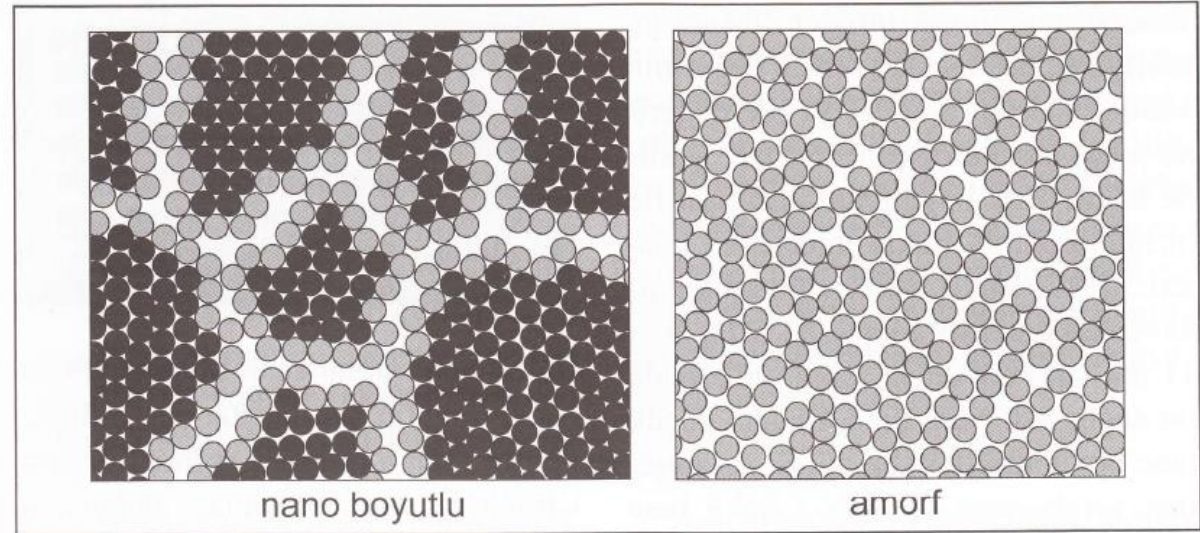
*Şekil 4.27. Buhar yoğunlaştırması ile üretilen nano boyutlu demir tozları. Bu tozlar yaklaşık  $10 \text{ m}^2/\text{g}$  gibi yüksek yüzey alanına sahip olup ortalama tane boyutu  $80 \text{ nm}$ 'dir. Ancak toplanma ile medyan parçacık boyutu  $11 \mu\text{m}$  seviyesinde ölçülmüştür.*



# Mikroyapı Kontrolü


Tane sınırı, bozunmuş atomik bağlar nedeniyle yüksek enerjili hatalı bölgelerdir. Genellikle bozunum genişliği ( $\delta$ ) beş atom boyutundadır. Bundan dolayı tane veya parçacık boyutu azaldıkça enerjili arayüzey bölgelerinde yeralan atom yüzdesi artar

atomları temsil eden şematik küreler görülmektedir. Amorf yapılarda atomik diziliş tamamen gelişsizdir. Ancak nanokristalli bir katıda tane sınırlarında bozunmuş katmanlar ile çevrelenmiş kristal adaları yer alır.



*Şekil 4.28. Amorf ve nano boyutlu mikroyapıların şematik gösterimi. Amorf malzemelerin kristal yapıları yoktur. Buna karşılık nano boyutlu malzemeler, tane sınırlarında bozunmuş bağlar ile çevrelenmiş kristal paketlerinden oluşur. Kristal boyutu azaldıkça tane sınırı bağlarındaki bozunum ile ilişkili atomların yüzdesi artar.*





# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Tozların Kullanımı

- Üretilen tozun rahat bir şekilde taşınması, depolanması, yoğunlaştırılması ve sinterlenmesi için belirli özelliklere kavuşturulması gerekir. Bunun için, yoğunlaştırma öncesi bir dizi işlem yapılır.
- Elek veya hava sınıflandırıcısı kullanılarak yapılan sınıflandırma işleminde, tozlar belirli boyut oranlarına ayrıştırılır. Bu sınıflandırma işlemi, yüksek kalitede ürün elde etmek için kullanılır. Safsızlıklar küçük parçacık boyutlarında yoğunlaşma eğilimi gösterir. Sonuç olarak, küçük parçacıkların ayrıştırılması tozun saflığını artırır.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Tozların Kullanımı

- Karıştırma ve harmanlama sıkıştırma öncesi sıklıkla uygulanan aşamalardır. Her ikisi de tozları homojen kütle haline getirir. Harmanlama, farklı boyutlardaki aynı bileşime sahip tozların karıştırılma işlemi, karıştırma ise farklı bileşime sahip tozlara uygulanan işlemdir. Tozlar, özellikle küçük ve büyük parçacıkların ayrışmasına neden olan taşıma sonrası parçacık boyut dağılımının kontrolü için harmanlanır.
- Tozlar yeni bileşimler oluşturmak için karıştırılır. Karıştırılmış tozlar, sinterleme esnasında homojen bir alaşım elde etmek, kompozitlerde seramik takviye veya sinterlenmiş çeliklerde talaş kaldırmayı kolaylaştırmak için mangan sülfürün (MnS) ikinci faz olarak eklenmesinde temel oluşturur.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Tozların Kullanımı

Toz enjeksiyon kalıplamada olduğu gibi, şekil verme operasyonlarında, tozlar bir bağlayıcı yardımı ile şekillendirilebilir. Bağlayıcının toz ile homojen bir şekilde karıştırılması gerekir. Benzer şekilde, presleme sonrası kalıptan parça çıkartmak için gerekli gerilmelerin azaltılarak kalıp ömrünün artırılması için tozlar organik yağlayıcılar ile karıştırılır. Oksitler, karbürler ve intermetalikler gibi sert tozlarda ham dayanımı (kalıplama veya presleme sonrası dayanım) artırmak için bağlayıcı ilave edilir. Yağlayıcılar ve bağlayıcılar, sinterleme sıcaklığına kadar yapılan ısıtma esnasında yakılarak, uzaklaştırılır.



# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Tozların Kullanımı

- Birbirlerine bağlanmış tozların sıkıştırma öncesi aşındırarak öğütölmeleri gerekli olabilir. Çok ince ve ayrıştırılmış tozlar isteniyorsa, aşındırarak öğütme ile topak dağıtılması faydalı olacaktır.
- Yukarıda verilen sıkıştırma öncesi toz işlemlerine yönelik örnekler, daha sonraki işlemlere yardımcı olmak üzere tasarlanmıştır. Bu işlemlerden bazıları toz üretimi ile beraber gerçekleşir. Ancak, harmanlama gibi işlemlerin, şekil verme operasyonunda homojen malzeme kullanımı gerektirdiğinden, preslemeden önce yapılması gerekmektedir.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Güvenlik ve Sağlık

Bazı tozlar kullanıcılar açısından zararlı etkilere sahiptirler. Parçacık boyutu, büyük oranda nefes yoluyla alınan parçacığın vücutta biriktiği bölgeyi belirler. On mikron üzeri parçacıklar akciğerlere ulaşmadan genizdeki mukoza tarafından yakalanır. Ancak, on mikrondan daha küçük parçacıklar akciğerlere ulaşarak vücut içinde çözünebilir. Bu tür bir çözünmenin olası sonuçları parçacık bileşimine bağlıdır.

En fazla dikkat edilmesi gereken malzemeler toksik olanlarıdır. Toz haldeki kurşun gibi malzemelerle temastan mümkün oranda kaçınılmalıdır. Toksik olmasa dahi bir parçacığın akciğerde bulunması tahrişlere neden olacağından dağılmış tozların nefes yoluyla alınmaması için gerekli özen gösterilmelidir.



# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Güvenlik ve Sağlık

Nano ölçekteki tozlar, büyüyen insan hücreleri içine alınmaları ve hızla çözünmeleri nedeni ile akciğerlerin görevini yerine getirmemesine sebep olacağından, dikkat edilmesi gereken öncelikli sağlık konularından biridir.

Küçük tozlarla çalışmanın diğer bir tehlikesi ise oksijen ve azotun bulunduğu ortamda ısı kararsızlık oluşturmalarıdır. Küçük parçacıklar, oda sıcaklığında cam kap içerisinde korunsalar bile, bir sene içinde 3000 ile 4000 ppm miktarında oksijen alarak oksitlenirler. Herhangi bir koruma olmadan, küçük tozlar havada yanabilir ve 2 MPa (20 atmosfer) veya daha yüksek yanma basınçlarına yol açan potansiyel patlayıcı özelliği gösterebilir.



# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Güvenlik ve Sağlık

Bundan daha da önemlisi ne kadar hızlı patlayabildikleri ve 100 MPa/s basınçlara kadar çıkabilen değerler vermeleridir. Alüminyum, zirkonyum, tantalyum, toryum, titanyum ve magnezyum havada 20 ile 40 g/m<sup>3</sup> miktarlarda bulunması durumunda ateş alır. Ateşleme bir kıvılcım ile veya sıcak bir yüzeyle başlayabilir. Havalandırma üniteleri içinde zamana bağlı olarak biriken tozlar ani patlamalara neden olabilirler. Bu nedenle sürekli tozsuz ortam sağlanmalıdır.



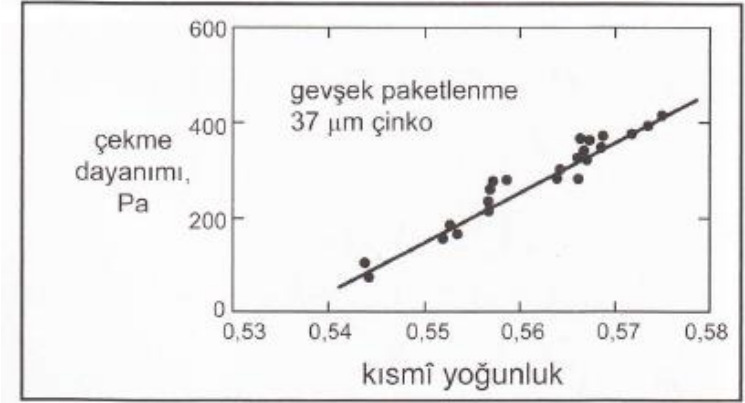


# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Topaklanma ve Topak Dağılımı

Küçük parçacıklar topaklanma nedeniyle zorluk çıkartır. Topaklanma, yoğunlaşmış sıvı veya ısının neden olduğu sinterleme bağlarından kaynaklanır. Neticede, paketleme, akma, karıştırma, sıkıştırma ve sinterleme işlemlerini olumsuz yönde etkiler. Topaklanmanın diğer bir nedeni de öğütme ve karıştırma esnasında parçacıkların soğuk kaynaklanmasıdır.

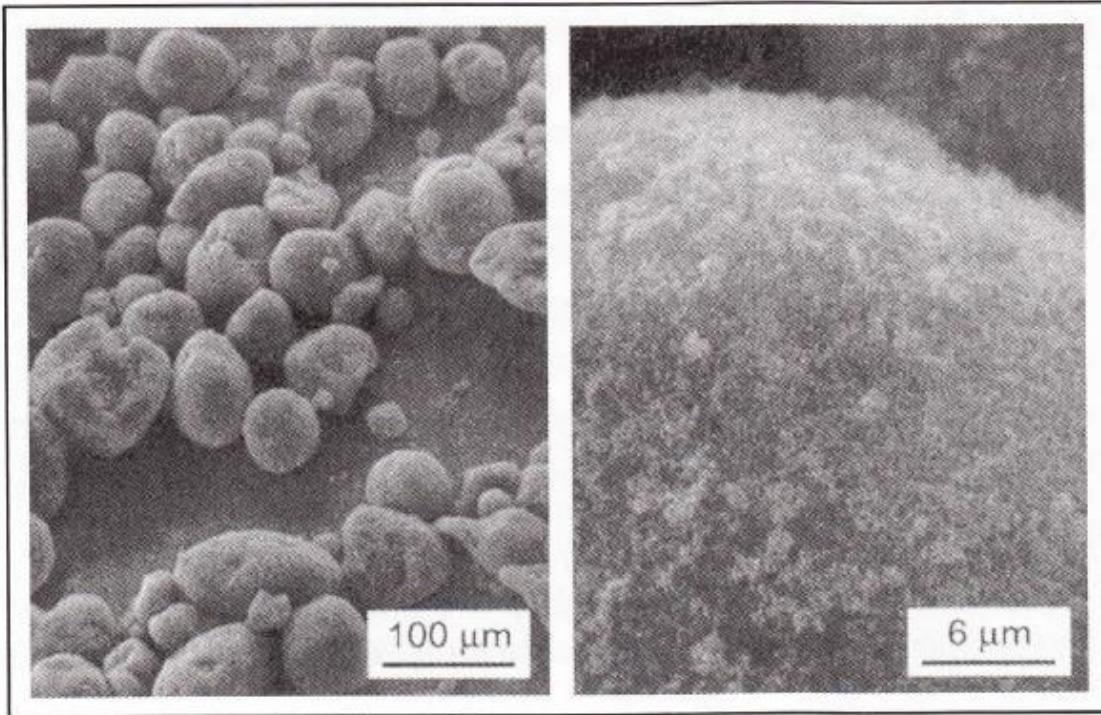
Topaklanma yüksek yüzey alanı ve zayıf kuvvetler etkisiyle oluşur. Örnek, van der Waals kuvveti kısa mesafede, özellikle 50 nm ve daha küçük parçacıkları bir birine bağlamada etkilidir. Bu zayıf kuvvetler toza bağlayıcı dayanımı sağlar ve bu dayanım çinko tozu için Şekil 5.1 de gösterildiği gibi, toz paketleme yoğunluğu arttıkça artar. Normal olarak bu zayıf bir kuvvettir ve parçacıklar iri ise toz kolay akar.



*Şekil 5.1. Gevşek paketlenmiş çinko parçacıklarının çekme dayanımlarının kısmî yoğunlukla ilişkisi. Dayanım, preslenmemiş tozlardaki yoğunluk aralığında doğrusal olarak artmaktadır. (R. Farley ve F. Valentin'in verileri).*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Bununla birlikte çok küçük parçacıklarda, kendiliğinden topaklanma yaygındır. Bu durum iki farklı büyütme oranlarıyla Şekil 5.2'de görülebilir. Küçük büyütmede yuvarlak olarak görülen tozlar, büyük büyütmede binlerce parçacık içeren iri toz küreleri olarak görülmektedir.



*Şekil 5.2. Küçük oksit tozunun doğal topaklanma davranışı. Düşük büyütme yuvarlak şekilli topaklanmaları, yüksek büyütme ise parçacıkları göstermektedir.*

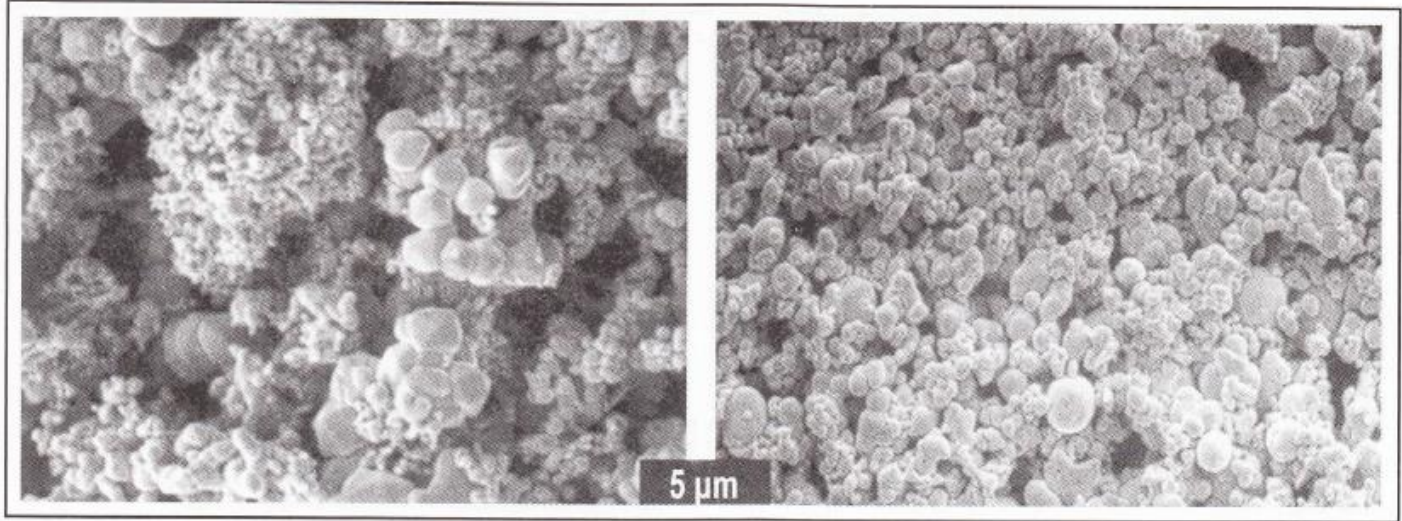




# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Topak dağılması kurutma, öğütme ve yüzey işlemleriyle sağlanır. Bir tozun topak dağılması için sıkça kullanılan yöntem bilyeler veya çubuklarla kuru atmosferde yapılan hafif öğütmedir. İstenilen durum parçacıkların kırılması değil, topaklanmış yapının darbe ile ayrılmasıdır.

Şekil 5.4'te molibden tozu için öğütme ile topak dağılmasına bir örnek verilmiştir. Küçük parçacıklardan oluşan zayıf topaklanmalar için uygulanan bir yöntemde, ince kutupsal molekül kaplamaları ile itme kuvvetlerinin yaratılmasıdır. Yaygın olarak kullanılan deterjanlar, seyreltilmiş bulaşık makinesi sabunları dahil stearik asit, sodyum oleat, gliserin veya oleik asit gibi yüzey aktif maddeler çoğunlukla etkilidir.



*Şekil 5.4. Hafif öğütme işlemi ile topak dağılmasına bir örnek. Bu iki taramalı elektron mikroskop görüntüsü öğütme öncesi ve sonrası 2 µm molibden-bakır tozu için parçacık topaklanması arasındaki farkı bariz bir şekilde göstermektedir (Fotoğraf Joyce Hyde'nin izni ile).*

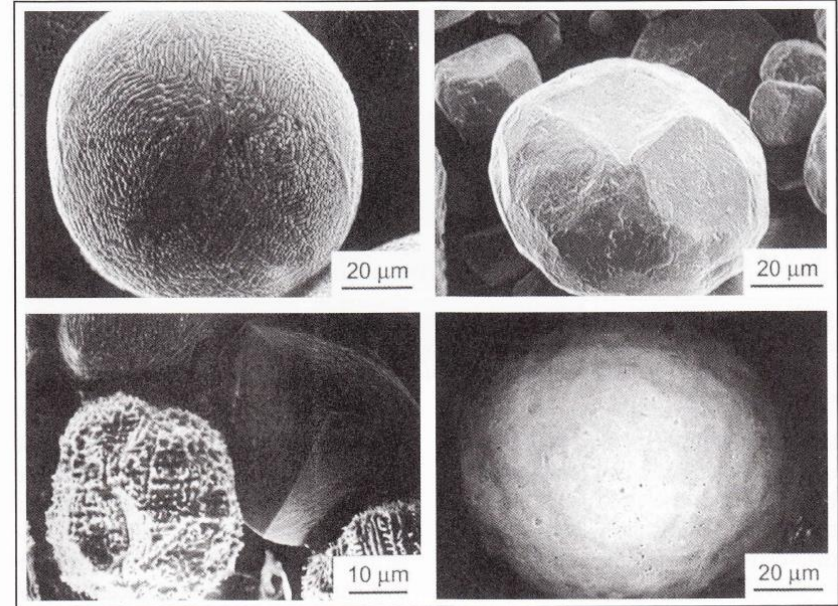


# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Parçacık Değişiklikleri

Islatıcı sıvıların olmadığı durumlarda, paketleme ve akmanın belirlenmesindeki esas unsur parçacık şeklidir. Parçacıklar arası sürtünme, parçacık yüzeyindeki pürüzlülük veya düzensizliklerden kaynaklanır. Yüzey alanı ve pürüzlülük ne kadar büyük ise veya parçacık şekli ne kadar düzensiz ise, paketleme yoğunluğu o derece düşük, yığılma açısı ise o kadar yüksek ve toz akışı da o derece yavaş olur. Yüksek paketleme yoğunlukları topak

dağılmasının olduğu, sert yüzeylere sahip, düzgün (küresel) parçacıklar ile ilişkilidir. Örnek, bir metal tozun yüzeyinin oksitlenmesi çoğunlukla parçacıklar arası sürtünmenin azaltılmasında etkilidir.



Şekil 5.5. Santrifüj atomize alaşım tozlarında görüldüğü üzere; tozlar kimyasal, öğütme veya ultrasonik işlemlerle iyileştirilebilir (fotoğraflar J.Smugeresky ve J.Rawers'in izniyle).

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Parçacık Değişiklikleri

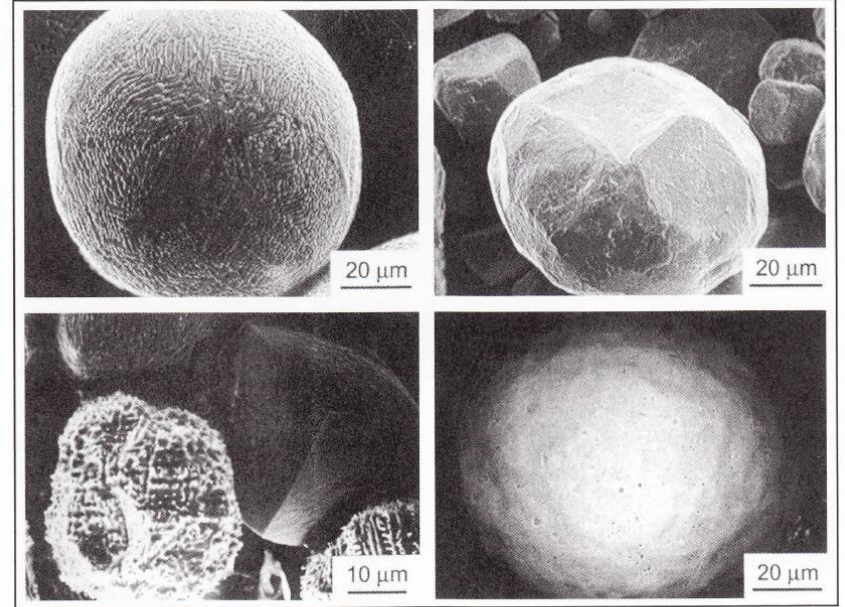
Safsızlıklar toz yüzeyinde yoğunlaşma eğilimi gösterir. Bu kirlenmelerin son ürüne taşınmasını engellemek için bazen sıkıştırma öncesi yüzeylerin temizlenmesi gerekebilir. Oksitler tavlama işleminin bir parçası olarak, hidrojen, parçalanmış amonyak veya karbon monoksit içeren indirgeyici atmosfer ortamında ısıtılarak indirgenir. Tavlama işlemlerinin büyük bölümü metalin mutlak ergime sıcaklığının yarısının altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir.

Elde olmayan nedenlerden dolayı oluşan kalıntıların uzaklaştırılmaları için toz; hava ile, elektrostatik ayırma veya manyetik ayırma ile temizlenir. Hava ile sınıflandırma, yüksek oranda safsızlık içeren küçük parçacıkların uzaklaştırılmasında faydalı olur. Bu toz temizleme işlemleri, özellikle gaz atomizasyonu ile üretilen tozlardan oluşturulan süper alaşım parçalarının yorulma ömrünü artırır. Ayrıca bazı durumlarda, gaz atomizasyonu ile üretilen tozlardaki atomizasyon gazları, vakum ortamında yapılan gaz giderme işlemleri ile atılır.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Parçacık Değişiklikleri

toz yüzeyi kimyasal çözünme, ultrasonik erozyon veya öğütme ile ayarlanabilir. Kimyasal çözünme yaygın olarak uygulanmamaktadır. Ultrasonik erozyonun yumuşak tozların yüzeylerindeki ince tabakaların uzaklaştırılmasında etkili olduğu kanıtlanmıştır. Parçacık yüzeyinde oyuk oluşturma safsızlıkları yaklaşık 10 mikron değerindeki derinliklere kadar erozyon ile uzaklaştırabilir. Öğütme işleminde parçacık yüzeyine darbeler uygulanarak safsızlıklar giderilir. Bu tür toz yüzey temizleme yöntemleri aynı zamanda yüzeyin topografyasını, parçacık şeklini, paketleme ve akış davranışlarını da değiştirir.



Şekil 5.5. Santrifüj atomize alaşım tozlarında görüldüğü üzere; tozlar kimyasal, öğütme veya ultrasonik işlemlerle iyileştirilebilir (fotoğraflar J.Smugeresky ve J.Ravers' in izniyle).

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Paketleme Yapıları

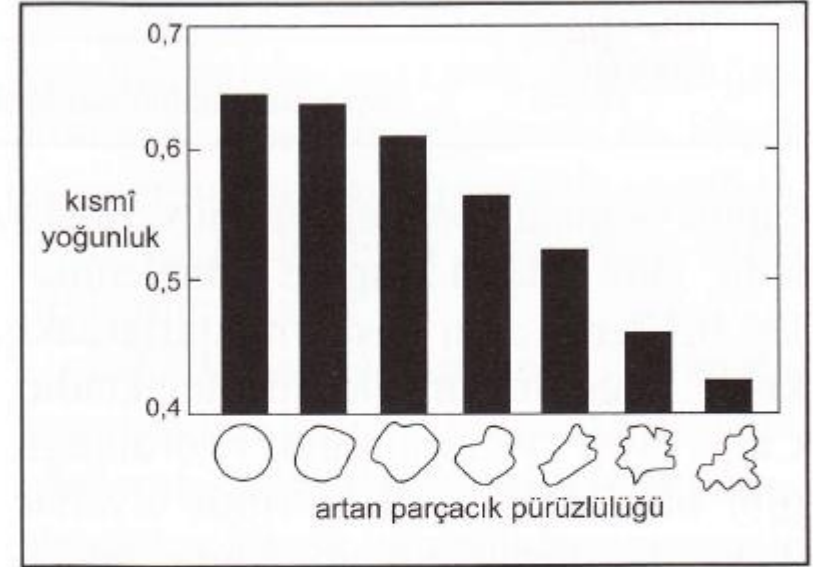
Parçacık paketlenmesi, kalıbın doldurulması, bağlayıcı miktarı ve sinterlemedeki çekmeyi etkilemesi açısından önemlidir. Rasgele paketleme yapıları tozların tipik özelliklerindedir. Tek boyutlu küreler bir kaba döküldüğünde kısmi yoğunluk 0,60'dan doldurma esnasında titreşim verildiğinde ise 0,64'a kadar değişim gösterebilir. Bu her parçacık için 6-7 temas noktasına karşılık gelir. Bir tozun paketleme yoğunluğu, tozun özelliklerine, yani toz boyutu, şekli ve adsorbe edilmiş neme bağlıdır.

Düşük paketleme yoğunlukları, genellikle parçacıklar arası sürtünme nedeniyle parçacıkların birbirini üzerinden kolayca kayamadığını gösterir.



# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

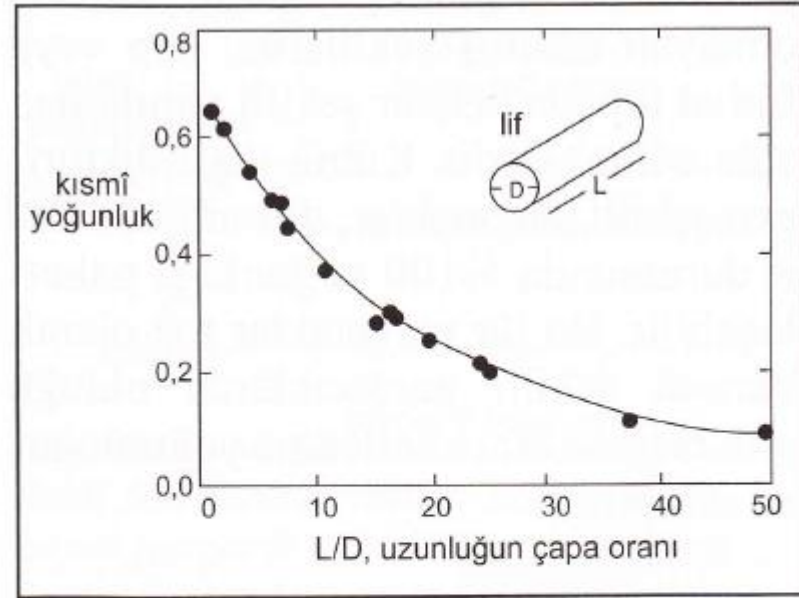
Yüzey alanı ne kadar büyük veya toz şeklinin düzensizliği ne kadar fazla ise paketlenme yoğunluğu da o kadar düşük olur. Şekil 5.6'da çeşitli düzensiz şekilli parçacıklar için gevşek rastgele kısmi paketlenme yoğunlukları gösterilmektedir.



**Şekil 5.6.** Tek boyutlu tozların kısmî yoğunluklarının parçacık profili ile tanımlanan pürüzlülüğe göre değişimi. Paketlenme yoğunluğu parçacık pürüzlülüğü ve düzensizliğine bağlıdır (veriler, G. Brown).

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Liflerin paketlenmesi, paketlenme yoğunluğunun toz şeklinin topak yapıdan uzaklaşması ile azaldığını gösteren iyi bir örnektir. Şekil 5.7 kısmi paketlenme yoğunluğunun, lif uzunluğunun lif çapına oranına göre değişimini vermektedir. Düz liflerin rasgele paketlenmeleri 0,1 'lere yaran düşük miktarlardaki kısmi yoğunluklara neden olmaktadır. Cam elyaf yalıtımlarında görüldüğü gibi bükülmüş veya kıvrımlı elyaflar daha da düşük yoğunluklara neden olabilir.

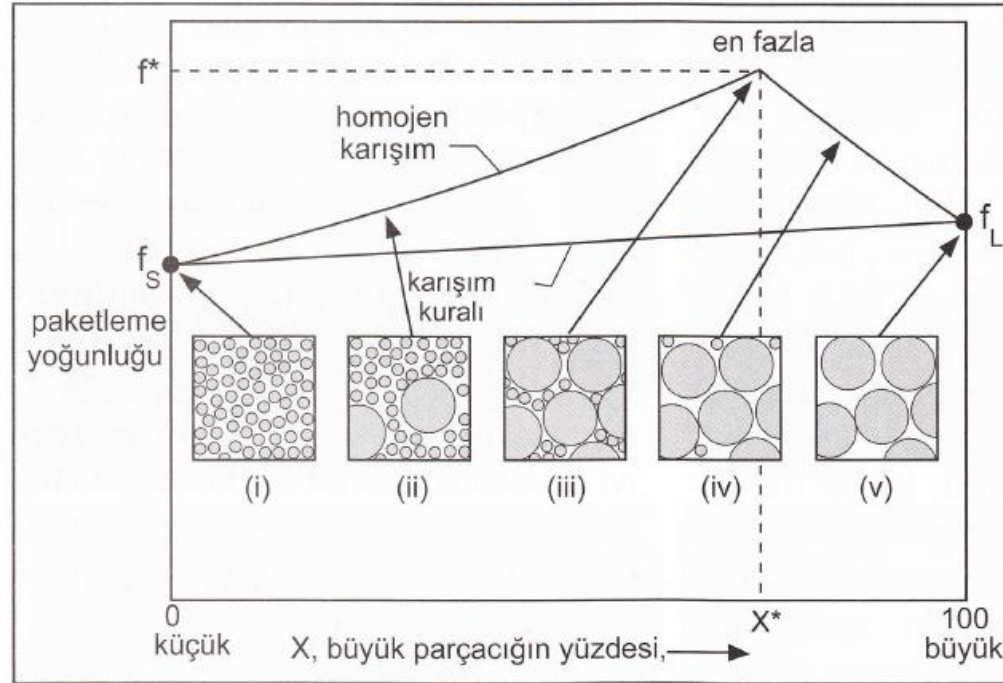


*Şekil 5.7. Düz liflerde, paketlenme yoğunluğunun lif uzunluğu/çap oranına (L/D) bağlı olarak değişimi. En yüksek paketlenme yoğunluğu eş eksenli parçacıklarda görülmektedir (veriler, J. Milewski).*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Geliştirilmiş Paketleme Teknikleri

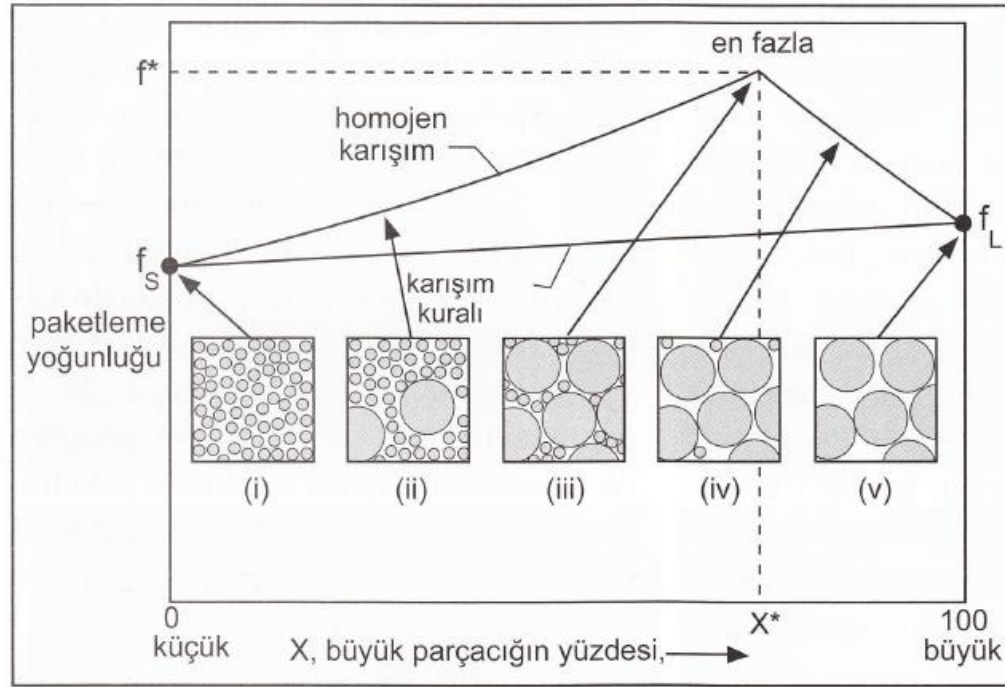
Daha yüksek paketleme yoğunluğu için parçacık tane boyut dağılımının ayarlanması mümkündür. İkili (bimodal) tane boyutu dağılımına sahip tozların oluşturduğu harman, tek boyut dağılımına sahip parçacıklardan daha yüksek yoğunluklara paketlenirler. Geliştirilmiş paketlemenin en önemli parametresi parçacık boyut oranıdır. Küçük parçacıklar seçilerek, büyük parçacıklar birbirinden ayrılmaya zorlanmadan, aralarındaki boşluklar doldurulur. Hatta daha küçük parçacık seçilerek kalan boşlukların içerisine yerleştirilmek suretiyle paketleme yoğunluğunda daha da iyileşme sağlanabilir



*Şekil 5.8. İkili büyük ve küçük küresel parçacık karışımları için kısmi paketleme yoğunluğunun bileşimine göre değişimi. Şekil, büyük parçacıkların sıkı paketlenmesini, küçük parçacıkların arayer boşluklarının doldurmasını ve kritik noktaya kadar yoğunluğun nasıl arttığını göstermektedir.*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Bu temel davranış, Şekil 5.8'de çizilerek gösterilmiştir. Kısmi yoğunluk büyük ve küçük kürelerden oluşan bileşimin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. En fazla paketlenmenin sağlandığı bileşimde büyük parçacıkların hacmi küçük parçacıkların hacminden daha fazladır. Paketleme yoğunluğundaki göreceli iyileşme, büyük ve küçük parçacıkların oranına bağlıdır.



*Şekil 5.8. İkili büyük ve küçük küresel parçacık karışımları için kısmi paketleme yoğunluğunun bileşimine göre değişimi. Şekil, büyük parçacıkların sıkı paketlenmesini, küçük parçacıkların arayer boşluklarının doldurmasını ve kritik noktaya kadar yoğunluğun nasıl arttığını göstermektedir.*



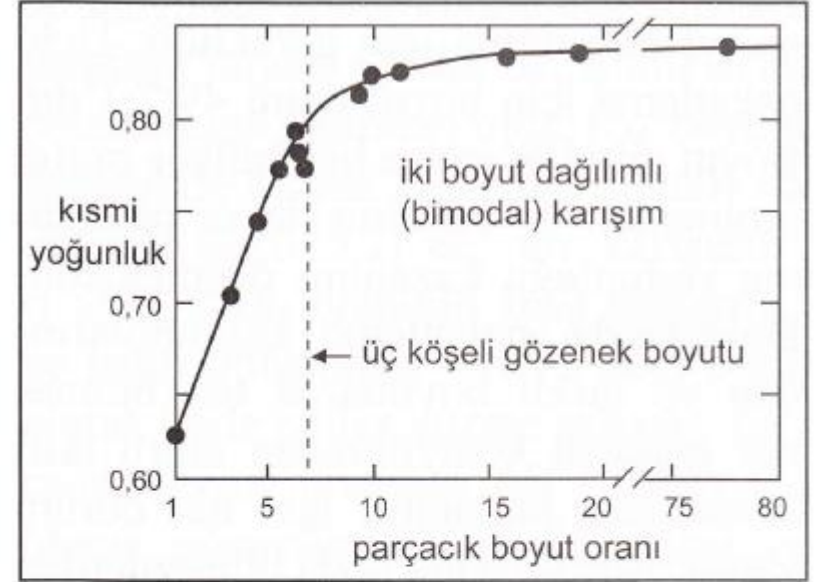




# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Şekil 5.9 paketleme yoğunluğunun parçacık boyutu oranı (büyük parçacık boyutunun küçük parçacık boyutuna bölünmesi) ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Parçacık boyut oranı 7:1 yakınlarındaki davranış değişikliğine dikkat edilmelidir. Bu durum bir küçük parçacığın büyük parçacıklar arasındaki üç köşeli boşluğu doldurması nedeniyle olmaktadır.

Paketleme yoğunluğu karışımın homojenliğine göre artacaktır. İşleme şartlarına bağlı olarak, rasgele karışmış sistemler, büyük parçacıklar arasındaki boşluklara oranla, küçük parçacıkların homojen yerleştirilmesine nazaran daha az boşluk içerir. Bu nedenle ideal paketlemeden daha düşük bir değer gözlemlenir.



**Şekil 5.9.** Tane boyutu oranının, %70 büyük parçacık ve %30 küçük parçacık içeren bir toz karışımında, paketleme yoğunluğu üzerindeki etkisi. Paketleme, parçacık boyut oranı 7:1'e yaklaştıkça artmaktadır ve bu oran büyük parçacıklar arasındaki boşlukların boyutuna karşılık gelmektedir (veriler, R. McGeary'nin).

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Kürelerin paketleme davranışına benzer olarak, yoğunluk artışı da, farklı parçacık boyutlarındaki diğer şekillerin harmanlanması ile ilgilidir. Bununla birlikte küresel ve küresel olmayan parçacıklar arasındaki temel fark genellikle ilk paketleme yoğunluğunun küresel şekiller için daha fazla olmasıdır. Bütün bileşimler için, yüzey pürüzlülüğünün, şekil düzensizliklerinin veya parçacık boyut oranının fazla olması, doğal paketleme yoğunluklarının da düşük olması demektir. Dolayısıyla, göreceli yoğunluk kazanımı küresel ve küresel olmayan parçacıklar için benzer görünse de, küresel şekilli parçacıkların başlangıç yoğunluğu kayda değer bir paketleme avantajı sağlamaktadır.

İki farklı tane boyut dağılımlı karışımlar için geliştirilen fikirler çoklu sistemler için de yaygınlaştırılabilir. En azından 7:1 parçacık boyut oranı en iyi paketleme için gereklidir. Üçlü paketleme için boyut oranı 49:7:1'dir.

Benzer şekilde, geniş tane boyutu dağılımı, küçük parçacıkların daha büyük tanelerin arasındaki boşlukları doldurması nedeniyle yüksek paketleme yoğunlukları verir



# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Süzme Kavramları

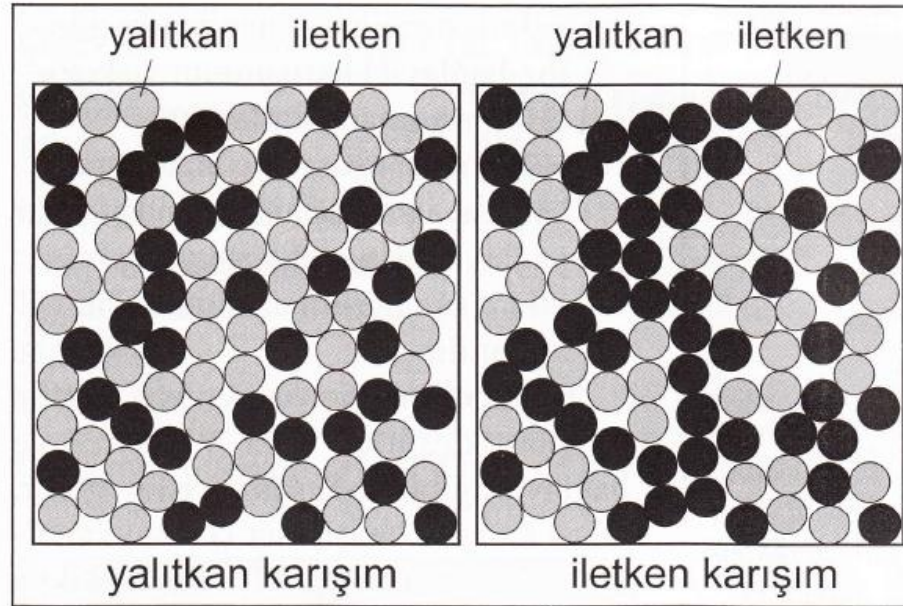
Süzme, yalıtkan ve iletken parçacıkların bulunduğu bir karışımdan elektriğin iletilmesi gibi, bir toz yatağı içinden sürekli bir geçişin oluşumu ile ilgilidir. İletken parçacıkların miktarı fazla ise, karışım içerisinde elektrik akım geçişi mümkün olur. Diğer taraftan, iletken olmayan parçacıklardan oluşan bir karışıma birkaç iletken parçacığın eklenmesi, karışımı iletken hale getirmez. Bunun nedeni, sürekli bir ağ veya süzme ağının oluşumu için gerekli olan iletkenlerin yeteri miktarda olmamasıdır.

Bununla birlikte, iletken parçacıkların oranı sabit bir şekilde artırıldığında, belirli bir miktarda, karışım iletken olur. Bu durum kritik olay olarak adlandırılır. Çünkü, miktardaki küçük değişimler, bir araya gelmiş tozların iletkenliğinde büyük değişikliklere sebep olur.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Süzme Kavramları

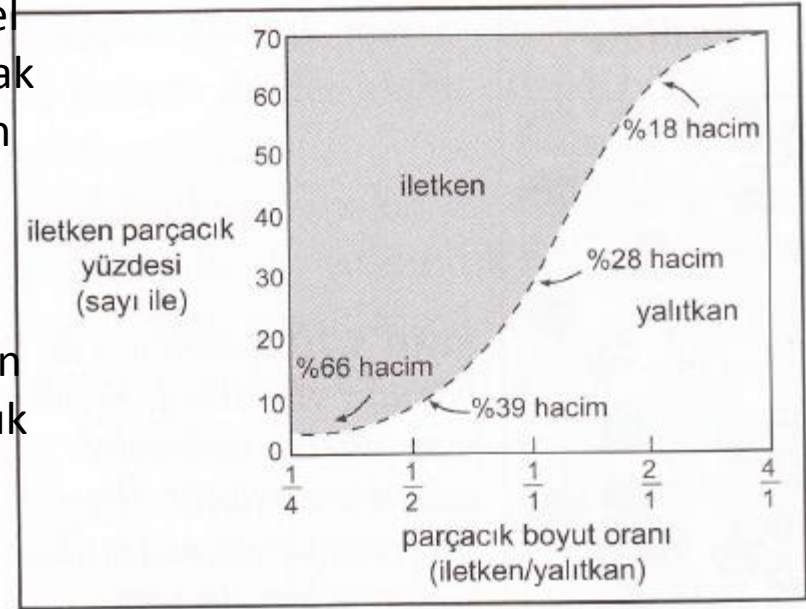
Şekil 5.10'da bu davranış değişimi iki boyutta açıklanmıştır. Eğer iki toz da aynı boyutta ise, davranış değişikliği gevşek paketlemelerde %25 ila %28 hacim oranında iletken toz ilavesi ile, yoğun şekilde sıkıştırılmış tozlarda ise %18 hacim oranında iletken toz ilavesi ile meydana gelir. Bu süzmenin başlangıç noktası olarak adlandırılır. Bu terim, karıştırılmış tozların bileşimlerinde meydana gelen küçük değişimlerin yarattığı büyük özellik değişikliklerini anlamamıza yardımcı olur. Toz boyutu değiştikçe süzme sınırının miktarı da değişir



*Şekil 5.10. Süzmenin iki boyutlu gösterimi. Siyah parçacıklar iletkenleri temsil etmektedir. İletkenlerin yeteri miktarda ve birbirleri ile temas halinde olması durumunda tüm karışım iletken olur.*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Şekil 5.11'de, toz karışımları için, kütle oranının özel malzemeye bağlı olmasından dolayı sayı oranı olarak ifade edilen süzme miktarı, parçacık boyut oranının bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Örnek, nikel ve alüminyum tozlarının karışımından tepkimeli sentezleme yöntemi ile Ni<sub>3</sub>Al eldesinde, yoğun intermetalik, alüminyum tozlarının nikel tozlarından çok daha küçük olması durumunda oluşur. Bu düşük alüminyum miktarının ham parça içerisine süzme sağlaması için gerekli bir şarttır. Benzer kurallar elektrik iletkenliği istenen polimer-metal veya seramik-metal kompozelleri için de uygulanır.



**Şekil 5.11.** Gevşek bir yalıtkan ve iletken karışım içerisindeki iletken parçacıkların kritik süzme miktarı. Şekilde, iletken ve yalıtkan parçacık miktarının, yalıtkan ve iletken parçacıkların boyut oranına göre değişimi gösterilmektedir. İletken parçacıkların yaklaşık hacim yüzde değeri birkaç nokta için verilmiştir (veriler, L.Oger).

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Polimer Katkıları

Toz özelliklerini değiştirmek için katkı maddeleri geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Katkı kimyasalları organik veya inorganik olup aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- çözücüler - su gibi, katkı maddesinin dağılması için kullanılan geçici sıvı
- dağıtıcılar - amonyak poliakrilat gibi, parçacıkların ayrışmasında kullanılır
- plastikleştiriciler - gliserin gibi, karışımının viskozitesini düşürmekte kullanılır
- yüzey aktif maddeler - stearik asit gibi, bağlayıcı-toz ıslatmasını artırmada kullanılır
- Kalınlaştırıcılar-guar zamkı gibi, toz-bağlayıcı karışımının viskozitesini artırmada kullanılır
- bağlayıcılar , parafin gibi, tozlara ham dayanım sağlamak için kullanılır .
- yağlayıcılar - çinko stearat gibi, takım aşınmasını azaltmak için kullanılır.



# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Yağlayıcılar

Toz ve şekillendirme kalıbı arasındaki sürtünme temel bir sorundur. Bu sürtünme ne kadar fazla ise kalıp ömrü o kadar kısa, sinterleme sonrası üründeki boyutsal değişim ve kusur oranı da o kadar fazladır. Kalıpla preslemede sıkıştırılmış ham parçanın kalıp içerisinden itilerek çıkartılması kalıp duvarının yağlanmasına bağlıdır. Bu nedenle kalıp aşınmasını en aza indirmek ve kalıptan çıkartmayı kolaylaştırmak için yağlayıcı polimerler kullanılır.

Yağlama, yağlayıcının kalıp duvarına sürülmesi veya doğrudan preslenecek toza katılması şeklinde uygulanır. Teorik olarak kalıp duvarının yağlanması tercih edilir, ancak karmaşık şekilli parçaların seri üretiminde bu durumun sağlanması kolay değildir.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Yağlayıcılar

Bu nedenle yağlayıcılar genellikle presleme öncesi tozun içerisine ilave edilir. Şekillendirme esnasında yağlayıcı, takıma karşı viskoz bir tabaka oluşturarak sürtünmeyi azaltır. Yağ gibi düşük vizkositeli yağlayıcılar, preslemede kullanılan yüksek basınçlarından ötürü, takım ile toz temas noktalarından sızarak uzaklaşmasından dolayı etkili değildir.

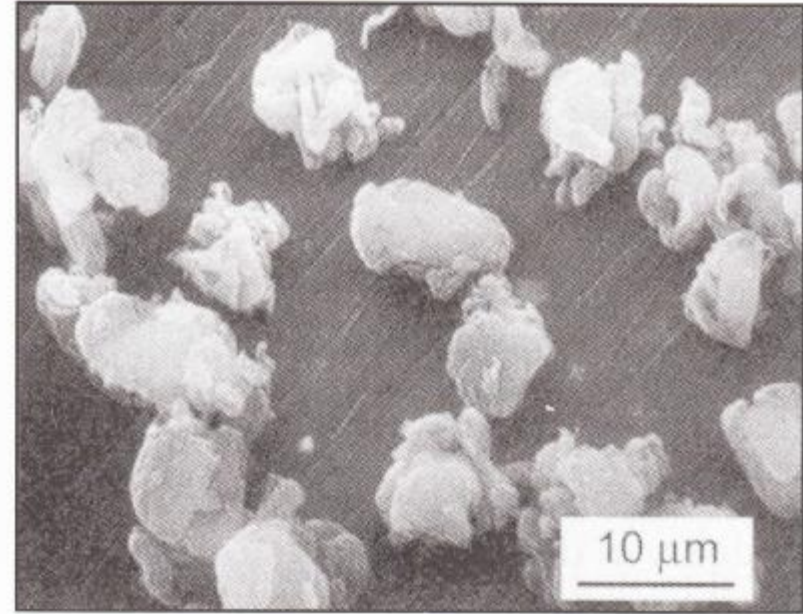
**ÇİZELGE 5.1. Bazı Yaygın Toz Yağlayıcıların Özellikleri**

yaygın adı	oksit	yüzde oksit	yumuşama sıcaklığı °C	ergime sıcaklığı °C	teorik yoğunluğu g/cm <sup>3</sup>
kalsiyum stearat	CaO	9	115 - 120	160	1,03
etilen bis stearamid*	yok	2	129	144	1,05
lityum stearat	Li <sub>2</sub> O	5	195 - 212	220	1,01
stearik asit	yok	2	45	55	0,85
çinko stearat	ZnO	14	100 - 120	120	1,09

CH<sub>3</sub>-(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>-CONH(CH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>HNOC-(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>-CH<sub>3</sub>'ten oluşmaktadır.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Bazı stearatların özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Bu bağlayıcılar, Şekil 5.72'de Gösterildiği üzere, öğütme veya atomize edilmek suretiyle küçük parçacık boyutlarına getirilerek presleme öncesi tozun içerisine karıştırılır.



*Şekil 5.12. Taramalı elektron mikroskop görüntüsü toz sıkıştırmada kullanılan yağlayıcıların tipik şekli ve boyutunu göstermektedir.*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Bağlayıcılar

Bağlayıcılar soğuk izostatik presleme, kalıpta sıkıştırma, enjeksiyon kalıplama, şerit döküm ve slip döküm gibi işlemlerde kullanılır. Bağlayıcılar etkili yapıştırıcılar olup ham kütlenin dayanımını sağlar.

Ucuz olmaları ve ısı ile kolayca uzaklaştırılmaları nedeniyle genelde basit mum benzeri polimerler kullanılır. Başarılı bağlayıcılar kolay dağılma, kararlı viskozite, tozlara yapışma ve şekillendirilmiş parçalara iyi dayanım sağlama gibi şartları sağlar. Ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, slip döküm ve şerit döküm için faydalı seçenekler sunan örnek bağlayıcı formülleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Toz ve bağlayıcı bileşimi besleme stoku olarak

ÇİZELGE 5.2. Toz Metalurjisi Teknolojilerinde Kullanılan Bağlayıcı Örnekleri

### bağlayıcının uygulama alanı

### bileşimi (% ağırlık)

ekstrüzyon	%15 amonyum poliakrilat %15 amonyum stearat %45 metil selüloz %25 gliserin
ekstrüzyon	%56 su %25 metil selüloz %13 gliserin %6 borik asit

enjeksiyon kalıplama	%69 parafin mumu %20 polipropilen %10 Brezilya mumu %1 stearik asit
----------------------	--

enjeksiyon kalıplama	%75 yer fıstığı yağı %25 polietilen
----------------------	--

enjeksiyon kalıplama	%55 parafin mumu %35 polietilen %10 stearik asit
----------------------	--

slip döküm	%4 sodyum lignosülfonat %95 su %1 kalsiyum nitrat
------------	---

slip döküm	%93 su %4 agar %3 gliserin
------------	----------------------------------

şerit döküm	%3 amonyum poliakrilat %75 su %11 poliakrilat emülsiyonu %11 gliserin
-------------	--

şerit döküm	%80 toluen %13 polietilen glikol %7 polivinil alkol
-------------	---

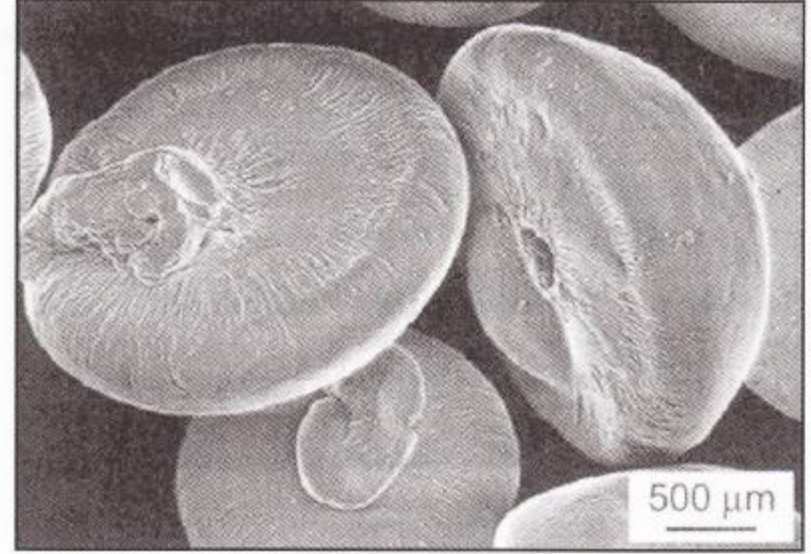


# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Topaklayıcılar

Küçük tozlar, küresel şekil kazandırmak ve böylece kalıp boşluğunu hızlı ve homojen bir şekilde doldurmak amacı ile kasıtlı bir şekilde topaklaştırılır. Bu tür özellikler yüksek hızda yapılan imalat işlemlerinde önemlidir. Bu nedenle, küçük tozlar çoğunlukla püskürterek kurutma veya elektro statik yöntemle topaklaştırılır.

Topaklaşma için çoğunlukla polivinil alkol, polietilen glikol, parafin mumu veya suda çözünebilen mumlar gibi çeşitli polimerler ve mumlar kullanılır. Parafin mumu hariç diğerlerinin tümü bağlayıcıyı çözmek için su kullanır. Su uzaklaştırıldığında toz bağlanarak küresel şekilde topaklaşır.



*Şekil 5.17. Alümina tozunun jelatin bağlayıcı ve elektroforetik teknik kullanılarak topaklanması ve parçacık kümeleri oluşturması (Sundar Atre'nin izniyle).*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Dağıtıcılar

Küçük parçacık boyutu yüksek yüzey alanına sahip olması nedeni ile paketlenmeyi ve akmayı azaltır. İsteyerek yapılan topaklanma, toz işlemlerini kolaylaştıran bir seçenektir. Aksine bazen bir dağıtıcı, parçacıklar arası kuvvetleri dengeleyerek, daha yüksek paketlenme yoğunluğuna ve daha iyi akmaya yardımcı olur.

Yaklaşık tüm dağılım küçük bir tozun sıvı içinde çalkalanması ile yapılır. Sıvı, yüzey gerilmesini azaltmaktadır. Ultrasonik çalkalama dağılım sağlamanın bir yoludur. Dağılım yüzey aktif polimerlerin toz yüzeyine tutunmasını ve böylece parçacıkların birbirini itmesini gerektirir.

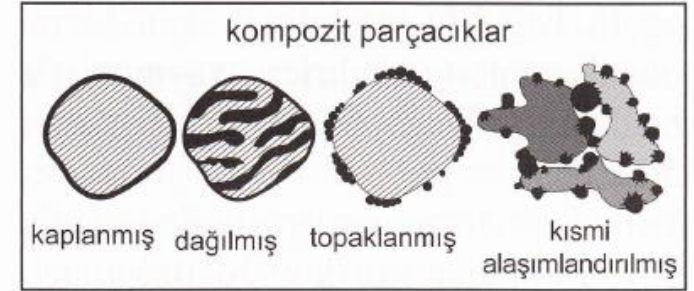
Dağılım sağlamanın en iyi yöntemlerinden birisi de tozların üretimi esnasında yüzeylerinin polimer ile kaplanmalarıdır. Bu, topaklanmaların oluşumunu önleyecek ve böylece depolama sonrası tozların kullanılma aşamasında dağıtılmalarına gerek duyulmayacaktır. Bu işlem temiz toz yüzeyi üzerine kendiliğinden polimerize olan uçucu moleküllerle gerçekleşir.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

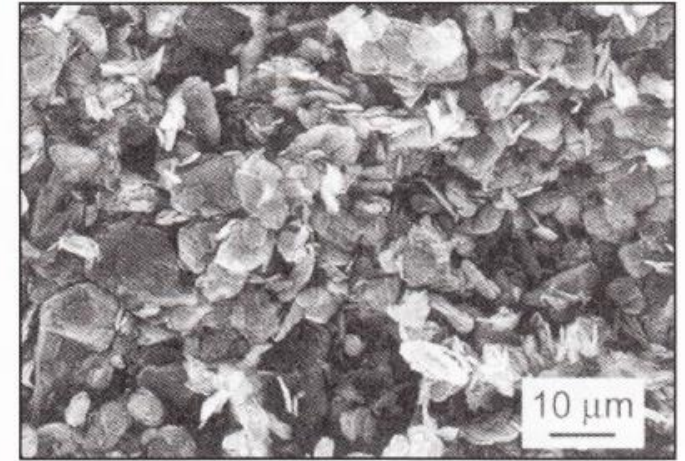
## Kaplanmış ve Bağlanmış Tozlar

Kompozit bir parçacık görüldüğü gibi iki veya daha fazla faz içerir. İkinci faz, kaplama veya yapı içerisinde mevcut olabilir. Kompozit parçacıklar, yüksek performanslı çelik oluşumunda olduğu gibi, birçok durumda kullanışlıdır. Çelik oluşturmak için yumuşak demir ile grafit karışımı hazırlanır.

Grafit boylıtları 4-7 mikron arasında değişen, Şekil 5.19'da gösterildiği gibi pul şeklinde eklenir. Ne yazık ki, düşük yoğunluk ve küçük tane boyutu nedeniyle grafit işlemler esnasında demirden ayrılır. Ürünün nihai özelliklerini olumsuz etkileyecek ayrışmanın engellenmesi için bağlanmış parçacık oluşturulur. Bağlama, parçacıkların çözücü-bağlayıcı kaplaması içinde çalkalanırken püskürtülmesi ile sağlanır.



*Şekil 5.18. Yapılar parçacık ölçeğinde işlem görerek - kaplamalar, dağıtılmış fazlar, yüzey topaklanmaları ve hatta yapışma ile kısmî olarak alaşımlanmış parçacık - kompozitler haline getirilebilir.*

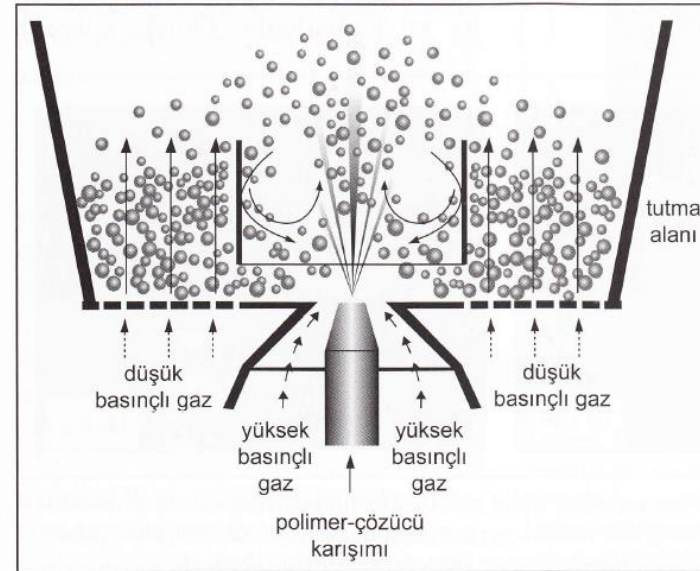


*Şekil 5.19. Tozlar ile karıştırılan pulu grafitler karbon kaynağı olarak veya sinterleme esnasında oksitlerin indirgenmesine yardımcı olmak amacıyla kullanılır.*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Çözücü buharlaşarak bağlı kaplamayı parçacık üzerinde bırakır. Buna alternatif olarak parilen (polipara-ksilen) gibi doğal bir şekilde yapışarak oluşan koruyucu bir kaplama kullanılabilir.

Tozların bağlanmasının bir diğer nedeni de serbest düşme esnasında birbirinden ayrılan küçük ve büyük parçacıkların tozlanmasının önlenmesidir. Daha büyük tozlar planlanan yolu izler. Ancak, küçük parçacıklar ayrışır, konveksiyon akımlarına yakalanır ve bir toz bulutu oluşturur.

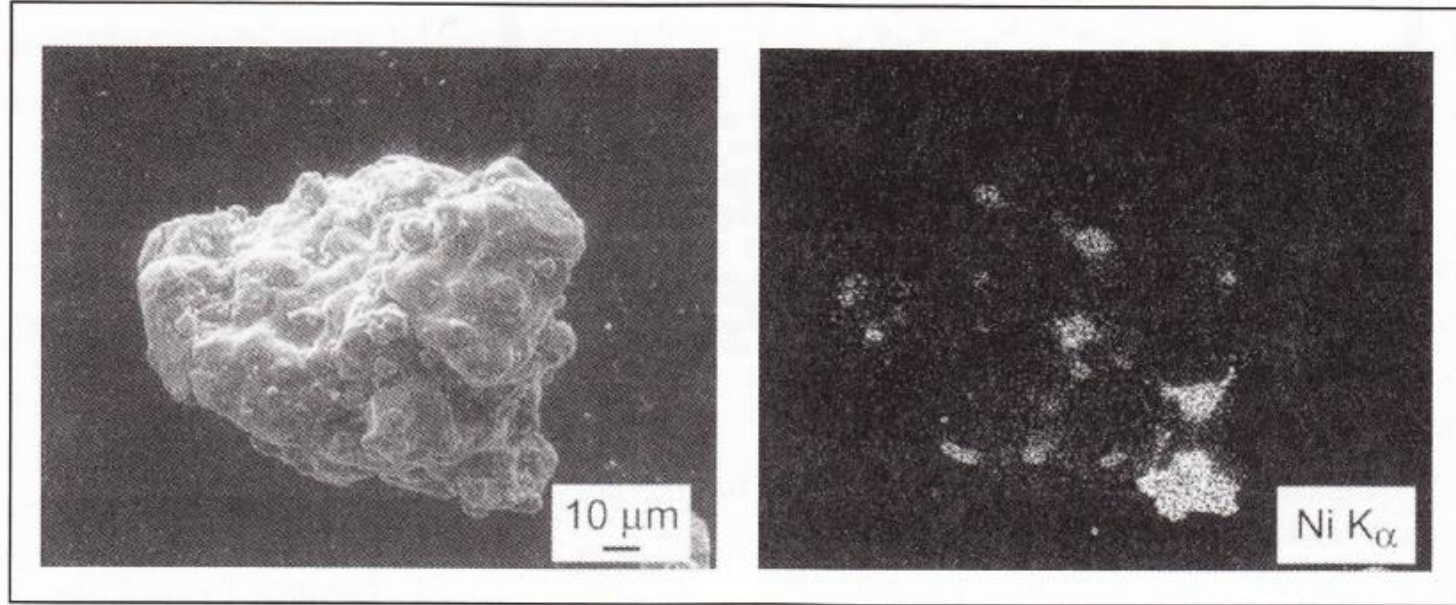


*Şekil 5.20. Tozlar üzerindeki kaplamalar; çözücü-polimer çözeltisinin püskürtülmesi ve haznede karıştırma ile yapılabilir. Burada gösterilen işlemde, çözelti akışkan yatak içinde hareket eden tozların üzerine püskürtülür. Çözücü buharlaşarak parçacıklar üzerinde polimer bir kaplama oluşturur.*



# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Bağlanma genellikle polimer kullanılarak gerçekleşir, ancak parçacıklar güçlü bağ oluşturabilmek için kısmi olarak sinterlenebilirler. Yayınım ile bağlanmış parçacıklara örnek Şekil 5.22'de yizeyi nikel ile alaşımlanmış bir demir tozu için gösterilmektedir. Sol taraftaki resim kompozit parçacığın taramalı elektron mikroskop görüntüsünü, sağ taraftaki resim ise nikel tarafından yayılan X-ışınlarını ve nikelin kompozit yüzeyinde bulunduğu yerleri göstermektedir.



*Şekil 5.22. Demir tozu üzerine yapışmış nikel parçacıklarını gösteren taramalı elektron mikroskop görüntüsü. Sağ taraftaki resim aynı parçaciğe aittir. Ancak, görüntü sadece nikel'e ait X-ışın haritası olarak filtrelenmiştir (fotoğraflar, Brian James).*

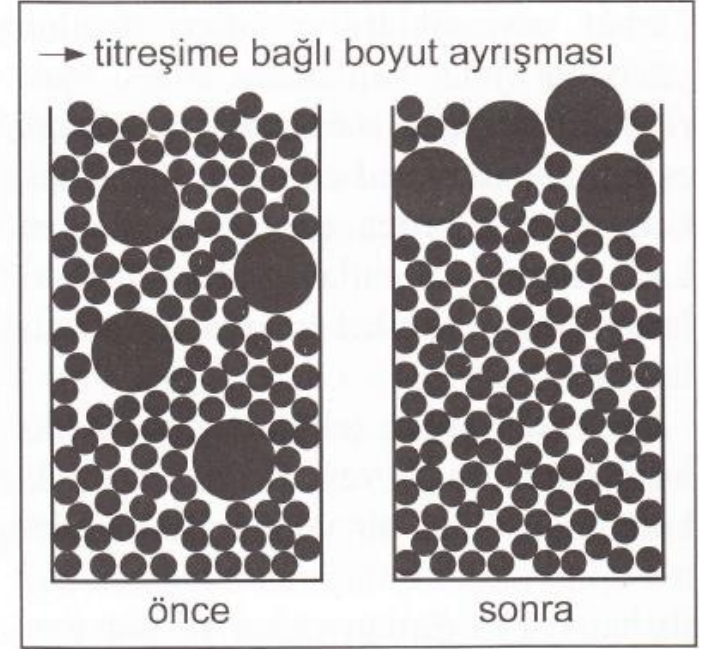
# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Karıştırma ve Harmanlama

Karıştırma ve harmanlama işlemleri; özel parçacık boyut dağılımı hazırlanması, sinterleme esnasında yeni alaşımların oluşturulması amacıyla tozların birleştirilmesi, sıkıştırma için yağlayıcıların eklenmesi ve şekillendirme için toz-bağlayıcı karışımının hazırlanması için gereklidir.

Tozların harmanlanmasının ana sebebi genel olarak taşıma esnasında titreşimler ile oluşan ayrışmanın engellenmesidir.

Parçacık boyutunda olan bu tür ayrışma, sıkıştırma ve sinterlemede düzensizlikler yaratır, Ayrışmanın üç nedeni olmasına rağmen (parçacık boyutu, yoğunluk ve şekildeki farklılıklar), boyut farkından ileri gelen ayrışma en baskın olanıdır



*Şekil 5.24. Titreşim sırasında küçük parçacıkların boşluklara girmesi ve büyük parçacıkların yukarıya taşınması nedeniyle boyut ayrışması gerçekleşir. Titreşimden kaynaklanan boyut ayrışması yaygın bir sorundur.*

Boyut ayrışmasının bir sonucu, yoğunluk değişimi nedeniyle ile, genel görünür yoğunluğun noktadan noktaya azalmasıdır.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Düzensiz parçacık şekli boyuta bağlı ayrışmayı engelleyecektir. Aynı şekilde parçacık boyutunun yaklaşık olarak 100 mikron'nin altında olduğu tozlarda, parçacıklar arası sürtünmenin daha fazla olması nedeni ile boyuta bağlı ayrışma daha az olur. Taşımaya bağlı boyut ayrışmasının giderilmesinde harmanlama işlemi kullanılır. Karıştırma işlemleri parçaların üretiminde yaygın bir sorun kaynağıdır. Harmanlama veya karıştırmadaki değişkenler, malzeme, parçacık boyutları, karıştırıcı tipi, karıştırıcı boyutu, karıştırıcı içerisindeki tozun göreceli hacmi, karıştırma hızı, kesme ve karıştırma zamanıdır.

Bazı basit kurallar sorunları azaltır

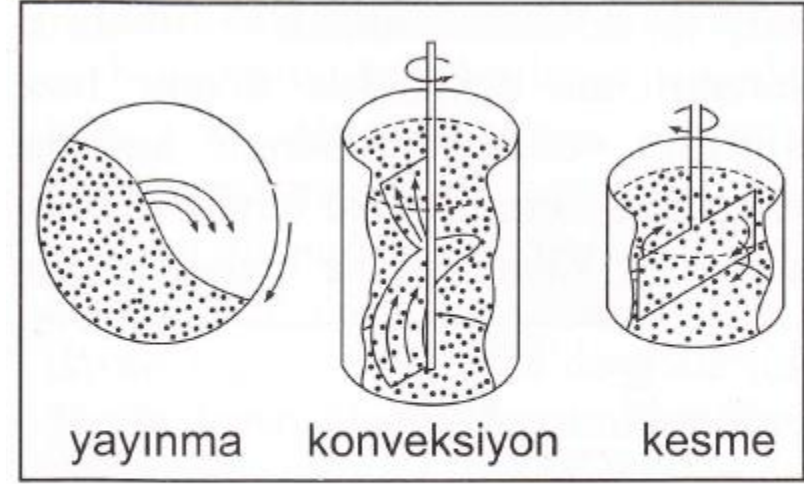
- 1) taşıma sonrası kuru tozların yeniden harmanlanması
- 2) kuru tozun titreştirilmemesi
- 3) boyut ayrışması varsa kuru tozun serbest düşüşle beslenmemesi
- 4) toz-bağlayıcı karışımı için gereksiz kesmenin giderilmesi.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Kuru Toz Karıştırma

Yayınma ile karışım dönen silindir içerisinde, konveksiyon ile karışım vidalı karıştırıcıda ve kesme ile karışım ise bıçaklı karıştırıcıda yapılmaktadır. Yayınma ile karışım her parçacığın toz kütle içerisinde hareketi ile oluşur. Toz yatak düzlemi dış kenarda kırılarak yüzeyden akışın gerçekleşmesini sağlar. Sürekli dönen silindir taze tozları ve kesme düzlemlerini ortaya çıkarır ve bu durum parçacıkların bir biri içerisinde karışmalarını teşvik eder.

Konveksiyonla karışım toz gruplarının bir yerden diğer bir yere taşınımı ile karıştırılmalarını içerir. Vida küçük toz grubunu alt yüzeyden keserek harman içerisinde üstlerde bir yere taşır.



*Şekil 5.25. Üç farklı toz karıştırma yöntemi olan yayınma, konveksiyon ve kesmenin şematik gösterimi. Toz karıştırma işlemlerinde bunların üçü de kullanılır.*

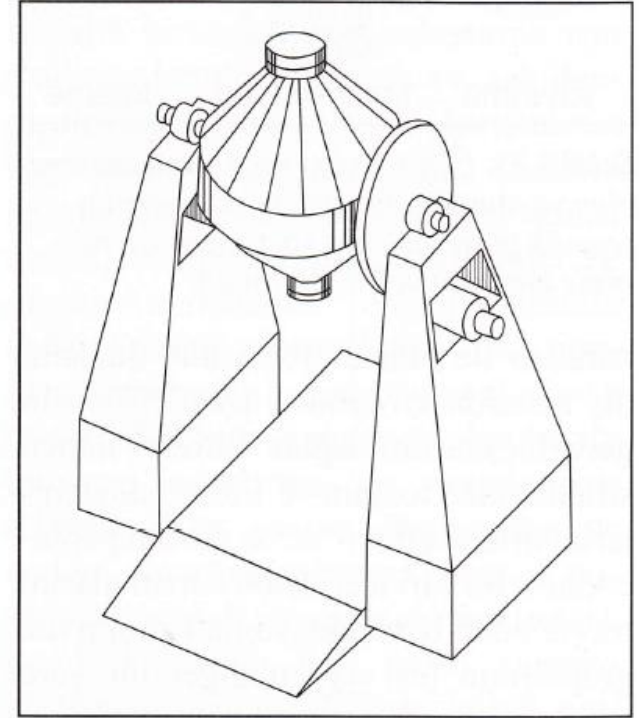
Kesme ile karıştırma sürekli ayrışma ve tozların kayma düzlemleri üzerinde akmaları ile oluşur.



# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

İkili konik karıştırıcı genellikle fiyat, verimlilik ve kısa karıştırma süreleri açısından en etkilidir. Karıştırıcının iç tasarımı verimliliği belirler. Paletler ve yüksek hızda dönen bıçaklar sisteme ilave edilerek karıştırma işlemi daha da iyileştirilir. Karıştırıcı içindeki tozun hacmi de verimliliği etkiler. Karıştırıcının içi tozla dolduruldukça tozların göreceli hareketliliği engellenir.

Tozların harmanlanmasında ve karıştırılmasında bazı olumsuz durumlar söz konusudur. Metal parçacıkların iş sertleşmesi ile sertliği arttığından daha zor preslenir, seramik parçacıklar ise daha küçük parçacıklara bölünür. Karıştırma özellikle sert parçacıklarda kirlenmeyi de artırır. Yanlış tasarlanmış karıştırma süreci parçacık ayrışmasına neden olacağından, iki tozun arasındaki boyut, şekil ve yoğunluk farkı arttıkça sorun yaratır.



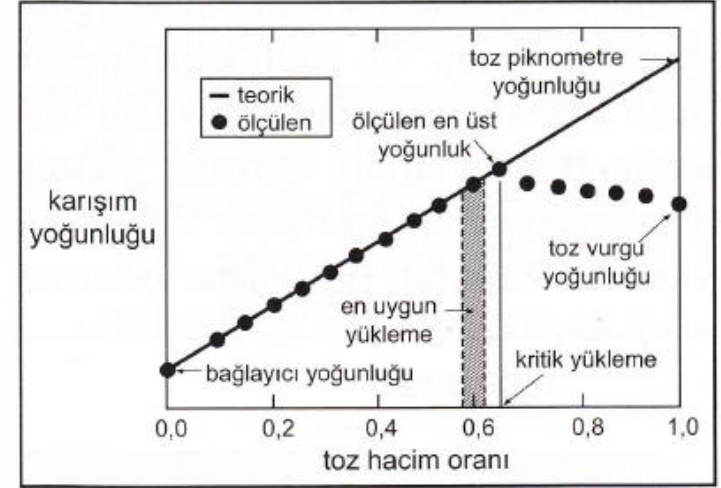
*Şekil 5.26. İkili konik karıştırıcı endüstriyel ölçekte yapılan karıştırma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İki koni merkezi yatay eksen etrafında döner ve genelde karıştırmayı daha etkili yapmak için yüksek hızda dönen bir dizi kanatçık kullanılır.*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Sıvı Bağlayıcılarla Karıştırma

Karıştırma, şekillendirme işlemleri için, toz-bağlayıcı besleme stoğunun hazırlanmasındaki ilk aşamadır. Parçacıklar arasındaki tüm boşlukları doldurmak için yeterli miktarda bağlayıcı ilavesi yapılır. Şekil 5.28'de gösterildiği gibi, toz-bağlayıcı karışımlarının yoğunluğu kritik katı yükleme değerinde en üst noktaya ulaşır. Bu noktanın üzerinde parçacığı yağlayacak kadar bağlayıcı bulunmadığından besleme stoğu akmayacaktır.

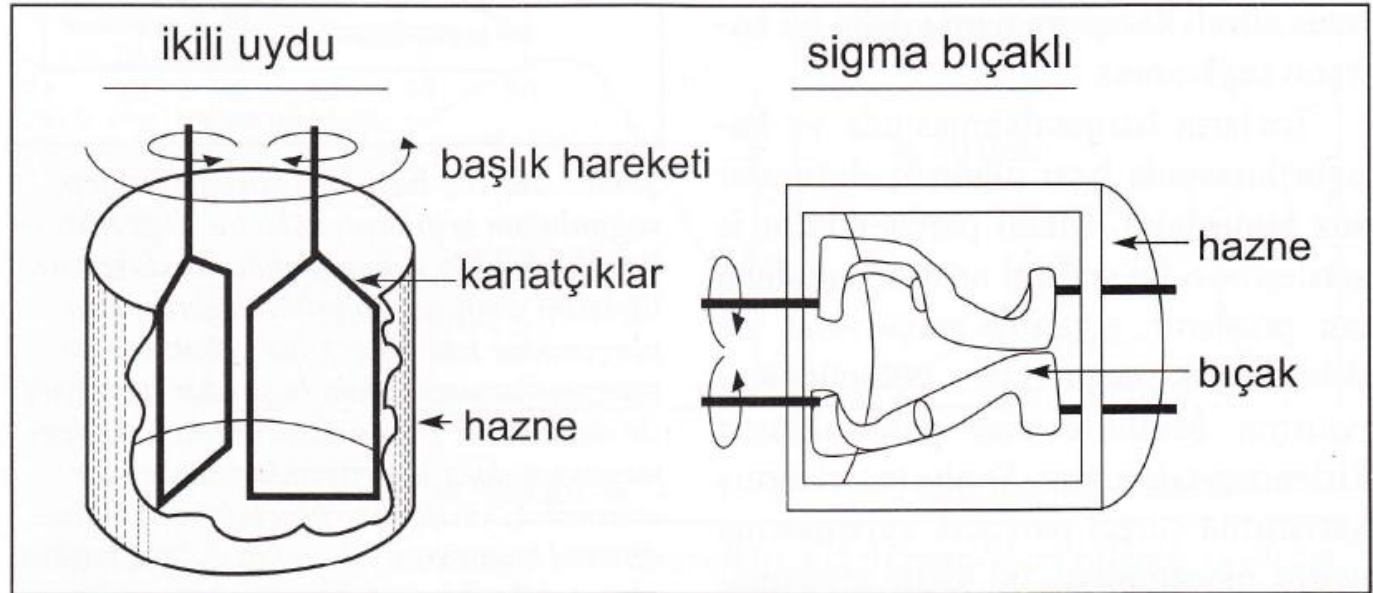
Karışım kalitesi oldukça önemlidir, çünkü karışımdan kaynaklanan kusurlar daha sonraki işlemler ile düzeltilemez. Karışımın her kısmında parçacık ve bağlayıcı miktarları aynı olmalıdır. Numune boyutu küçüldükçe farklılık belirginleşir.



*Şekil 5.28. Toz-bağlayıcı karışımları teppe yoğunluğunun kritik katı yükleme değerine karşılık geldiği yoğunluk bileşim davranış ilişkisini gösterir. Bu kritik değerde, katı parçacıklar sıkı bir şekilde paketlenir ve parçacıklar arasındaki boşluklar bağlayıcı ile doldurulur. Parçacıkların sıkı paketlenmesinden dolayı, karışımda parçacıklar arasındaki sürtünme yüksektir ve şekillendirmesi imkansızdır. Bundan dolayı, kalıba alınacak besleme stokları, yağlayarak parçacık akışını kolay hale getirmek için fazladan bağlayıcı içerecek şekilde hazırlanır.*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

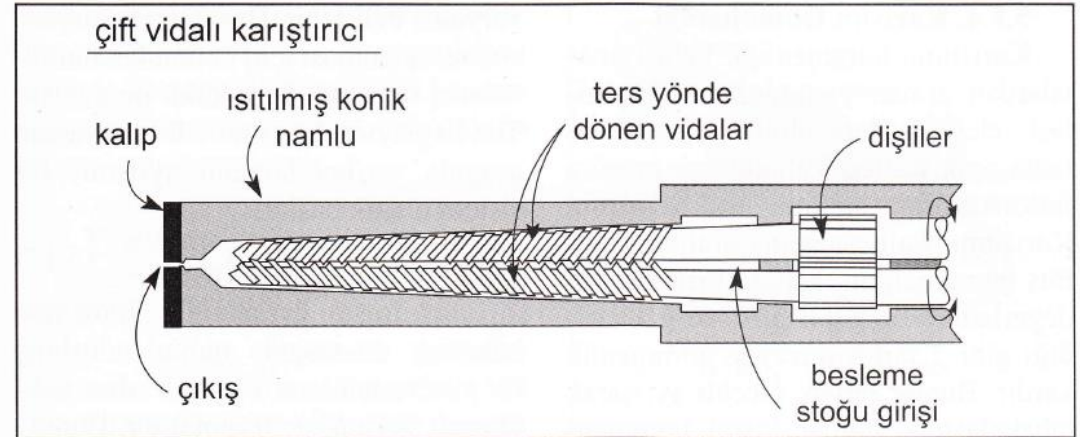
Kuru tozlar için yaygın olarak kullanılan karıştırıcılar toz-bağlayıcı karışımlarının hazırlanmasında uygun değildir. Viskoz sıvı bağlayıcılar parçacıklar arasında moleküler ölçekte dağılım için yüksek kesme kuvvetlerine ihtiyaç gösterir. Ergiyik bağlayıcıların tozlarla karıştırılması için kullanılan bileşik hazırlayıcıları parti tipi veya süreklidirler. Parti karıştırıcı, tozu ve polimeri ısıtırken yüksek darbeli kesme hareketleri uygular. Şekil 5.29'da gösterildiği gibi, parti karıştırıcının bıçakları genellikle pedal veya Z şekilli kanatçıklardan oluşur.



Şekil 5.29. Tozların bağlayıcılarla birleştirilmesi için kullanılan iki farklı parti karıştırıcının taslak resmi: ikili uydu ve sigma bıçaklı karıştırıcılar.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Sürekli karıştırıcı toz ve polimeri ısıtılmış namlu içerisine besler. Burada polimer kesilirken ergime sıcaklığına çıkartılmaktadır. En etkili karıştırıcılar Şekil 5.30'da gösterilen çift vidalı türlerdir. Bunlar birbiri içerisine geçmiş 8 şeklinde namlu içerisinde dönen iki vidadan oluşurlar. Bu vidalar besleme stoğunu, sürekli olarak sıkıştırır, keser, ayrıştırır ve sıvar. Namlular farklı çaplarda üretildiklerinden, sürekli karıştırıcılar 1 kg/saat ile birkaç ton/saat arasında üretim hızlarına sahiptir.



*Şekil 5.30. İkiz vidalı sürekli karıştırıcı, birbiri içerisine geçmiş vidalı sistem üzerine kurulmuş olup bunlar besleme stoğunu sıkıştırarak, keserek, ayrıştırarak ve sıvayarak gittikçe ince bölüme doğru iter. Toz ve bağlayıcı içeriği geniş ağızdan girer ve hareket edip ısırken, azalan kesit sıkıştırmaya, dönen vidalar kesmeye neden olur.*



# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Karışım içerisindeki düzensizlikler iki ana şekilde oluşur: bağlayıcının tozdan veya bağlayıcı içerisindeki farklı boyutlardaki tozların birbirinden ayrışması. Parçacıkların boyuta (veya şekle veya yoğunluğa) göre ayrılması düzensiz paketleme yoğunluklarına ve son üründe şekil bozukluklarına neden olur.

Küçük veya düzensiz şekilli parçacıklar homojen yapı elde etmek için daha uzun karıştırma sürelerine ihtiyaç duyar ve karıştırma açısından özel sorunlar oluşturur. Küçük parçacıklar topaklaşarak homojen karışım için gerekli zamanın uzamasına neden olur. Bazı durumlarda topaklanma hızı dağılımın karışım hızını dengeler ve karışım süresi ne olursa olsun karışım homojen olmaz.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Termoplastik bağlayıcılarda karıştırma, kesmenin baskın olduğu ara bir sıcaklıkta yapılır. Çok yüksek sıcaklıklarda yapılan karıştırma bağlayıcıyı bozar veya düşük bağlayıcı viskozitesi nedeni ile tozun ayrışmasına neden olur. İşlemin tekrarlanabilirliği için bileşim ve sıcaklık son derece iyi kontrol edilmelidir. Karıştırıcıdan çıkan granül bir sonraki şekillendirme aşaması için hazırdır.

Karıştırma esnasında oluşan homojensizlikler sonraki aşamalarda zorluklara neden olur. Karışımın her bir bölümü aynı toz miktarına sahip olmalı ve tozun parçacık boyut dağılımı da her bir bölümde aynı olmalıdır

Karışımın iyi olmadığı bir sistemin viskozitesi daha yüksek olur. Bu nedenle viskozite muhtemelen homojenliğin doğrudan en iyi ölçüsüdür.



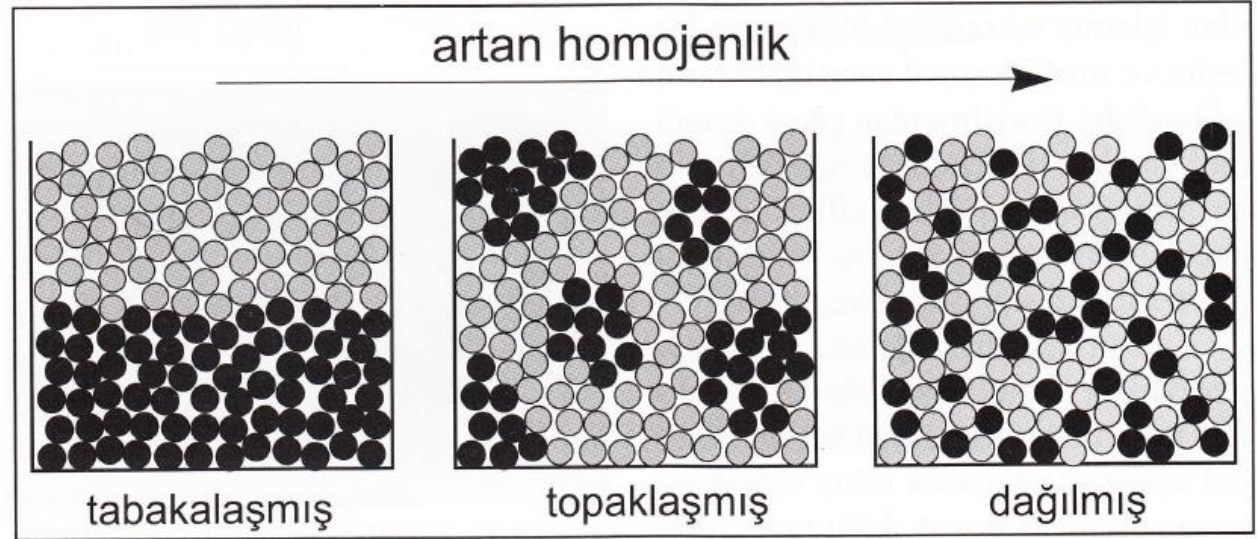
*Şekil 5.31. Kalıplama makinesine yüklenmek üzere hazır toz-bağlayıcı besleme stoğu peletlerinin resmi.*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Karışımın Homojenliği

Karışımın homojenliği, belirli noktalardan alınan yoğunluk, ısı kapasitesi, elektrik iletkenliği, vizkosite ve hatta renk testleri kullanılarak bileşim farklılıklarının ölçümü ile belirlenir. Karışımın kalitesi geniş aralıkta alınmış numunelerin karşılaştırılması ile değerlendirilir.

3 farklı düzeyde homojenlik vardır. Bunlar büyük ölçekli ayrışarak tabakalaşmış yapılar kısmi homojenlik içeren topaklanmış yapılar ve iyi dağılmış ideal homojen yapılardır.



Şekil 5.32. Tabakalaşmış, topaklaşmış ve homojen dağılmış karışımların artan homojenliğinin şematik gösterimi.

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Peletleme ve Taneleme

Seramikler (alümina gibi), intermetalikler (nikel alüminit, NiAl gibi), sıcaklığa dayanıklı metaller (volfram W veya molibden Mo) ve bileşikler (volfram karbür WC veya titanyum diborür TiB<sub>2</sub>) gibi küçük sert parçacıklar, serbest akmazlar ve görünür yoğunlukları düşüktür. Bu tozların preslenmesinin zor olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca, küçük tozlarda görünen parçacıklar arası yüksek sürtünme, işlenmelerini de zorlaştırır.

Bu nedenle akmayı sağlamak için kasıtlı olarak büyük topaklanmalar oluşturulur. Toz bulamaç hale getirilmek için organik ve uçucu maddelerle karıştırılır. Bulamaç püskürtülerek veya merkezkaç atomizasyonu ile ısıtılmış serbest halde düşebileceği bir hazne içine gönderilerek, damlacıkların yüzey gerilmesinin de yardımı ile küresel topaklar oluşturması sağlanır.



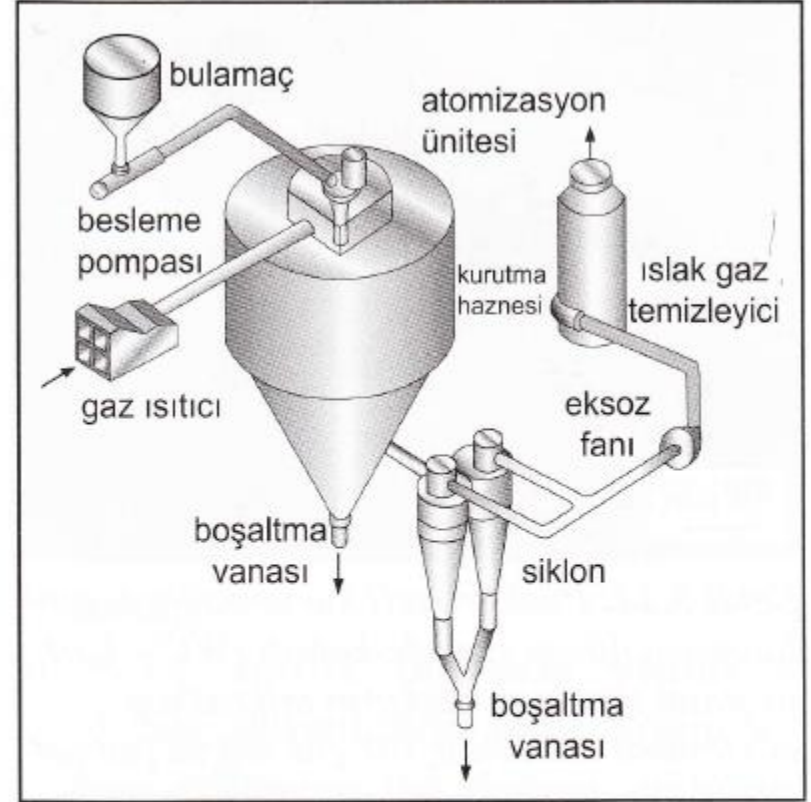
*Şekil 5.33. Püskürtmeli kurutma sisteminin bileşenleri; ısıtılmış gaz, toz-bağlayıcı bulamacının atomize edilmesinde kullanılmaktadır. Bulamaç ısıtma haznesinde kuruma esnasında küresel topaklanmalar oluşturur.*



# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

## Peletleme ve Taneleme

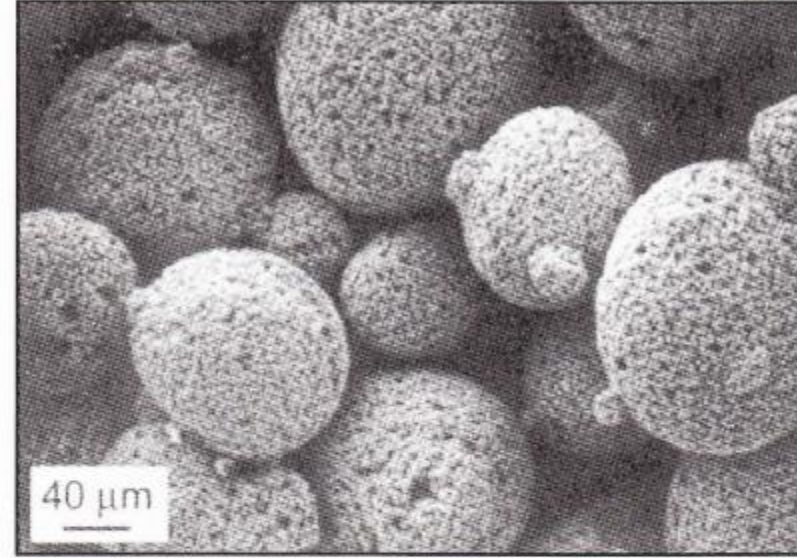
Serbest düşüş esnasındaki ısıtma, uçucu maddelerin buharlaşmasına neden olur. Sistem uygun bir şekilde dengelenecek olursa, bu işlem küresel, sert, yoğun paketlenmiş topaklar verir. İnorganik tozların topaklanmasının yansıra, püskürterek kurutma tekniği gıdaların, deterjanların ve süt ürünlerinin tanelenmesinde yaygın olarak kullanılır.



*Şekil 5.33. Püskürtmeli kurutma sisteminin bileşenleri; ısıtılmış gaz, toz-bağlayıcı bulamacının atomize edilmesinde kullanılmaktadır. Bulamaç ısıtma haznesinde kuruma esnasında küresel topaklanmalar oluşturur.*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Püskürtmeli kurutmadan sonra, tipik topaklanma boyutu 200 mikron'dur. Şekil 5.34 püskürtmeli kurutma yöntemi ile oluşturulmuş topaklanmış volfram karbürün resmini göstermektedir. Püskürtmeli kurutma, küresel şekil ve büyük boyut kolay akma sağladığından, yüksek performanslı cihazların üretiminde kullanılan küçük tozların hazırlanmasında son derece yaygın bir yöntemdir. İşlemin bir dezavantajı, bağlayıcının sinterleme sırasında uzaklaştırılmasıdır.



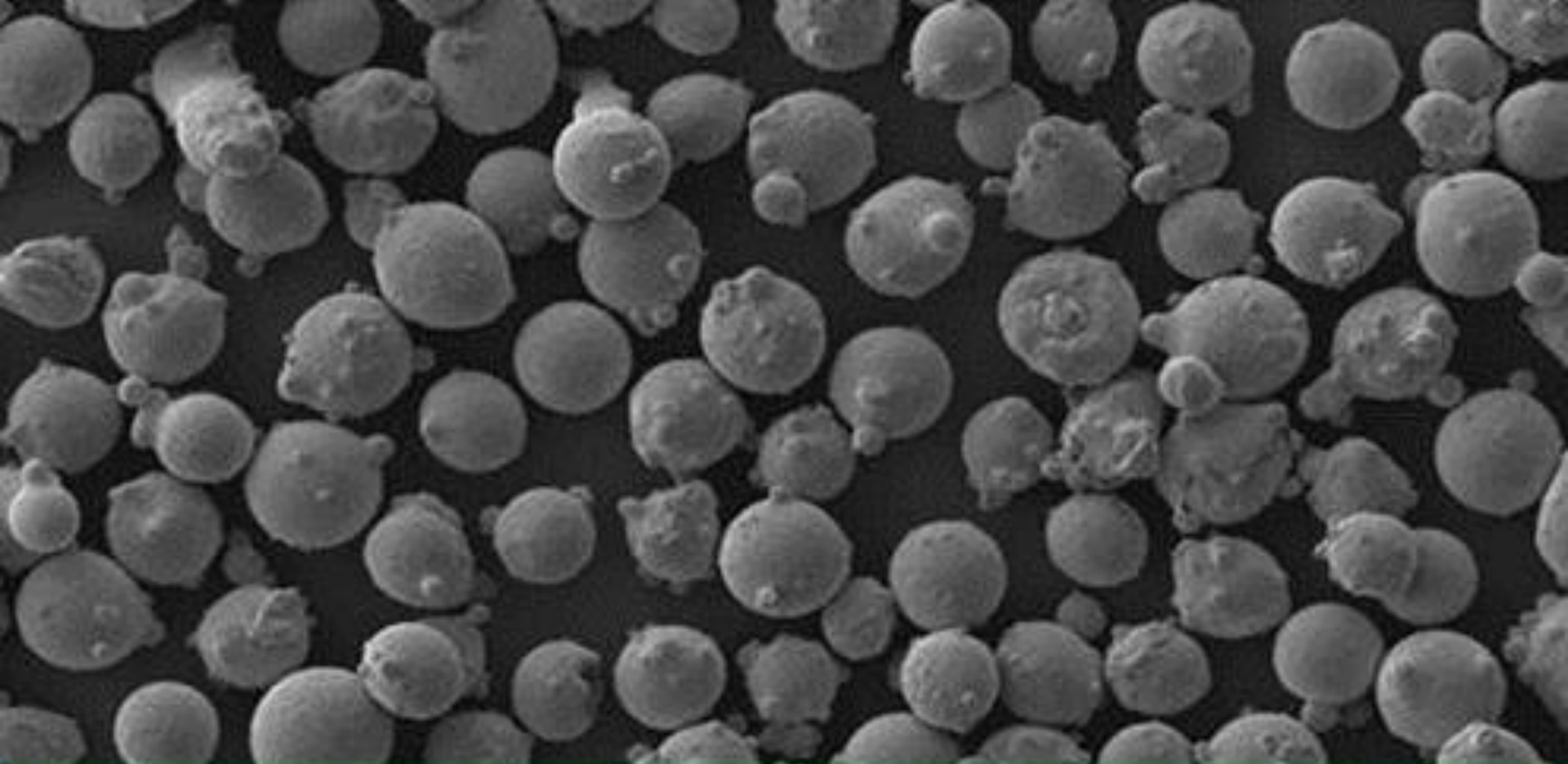
*Şekil 5.34. Püskürtmeli kurutma ile hazırlanmış volfram karbür-kobalt (WC – Co) tozunun taramalı elektron mikroskop görüntüsü. Görüntü, bir çok küçük parçacıktan oluşmuş topakların küresele yakın şeklini göstermektedir ( Mu – Jen Yang`ın izniyle).*

# Şekillendirme Yoğunlaştırma öncesi Toz İşlemleri

Mekanik taneleme püskürtmeli kurutmaya bir alternatiftir. Toz-organik bulamacının püskürtülmesi yerine, sürekli karıştırma ile uçucu çözücü buharlaştırılır. Diğer seçenekler ise peletleyiciler, ekstrüderler ve hatta akışkan yatak tekniklerinin kullanılmasıdır. Bir başka yaklaşım da mekanik akışkanlığı sağlamak için yatay karıştırıcıda çok hızlı dönen bıçaklar kullanmaktır.







# Toz Şekillendirme



# Toz Şekillendirme

Üretim işlemi sırasında tozun yoğunlaştırıldığı üç farklı temel nokta vardır. Serbest üretim teknikleri, imalat aşamalarında hiçbir alet kullanmadığından diğer tekniklerden farklılıklar gösterir. Genellikle basınç esaslı yoğunlaştırma teknikleri büyük taneli (yumuşak) tozlara, sinterleme esaslı yoğunlaştırma teknikleri ise küçük taneli tozlara uygulanır.

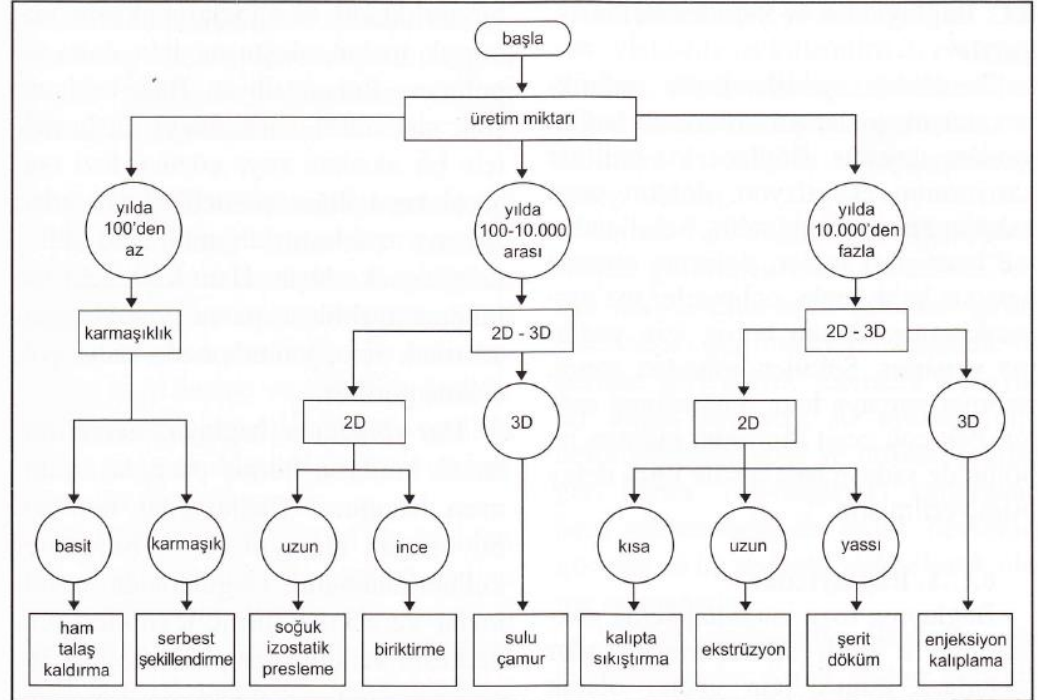


**Şekil 6.1.** Toz işleme teknolojileri üç temel yönteme dayanır. Tozun basınç kullanılarak yoğunlaştırılması (presleme), sıcaklık (sinterleme) veya basınç ve sıcaklığın aynı anda kullanımı. Şekillendirme teknolojileri büyük ölçüde düşük basınçta ham yoğunluk oluşumuna ve yoğunlaştırma için sinterleme esasına dayanır.

# Toz Şekillendirme

## Özellik Esaslı Şekillendirme kararları

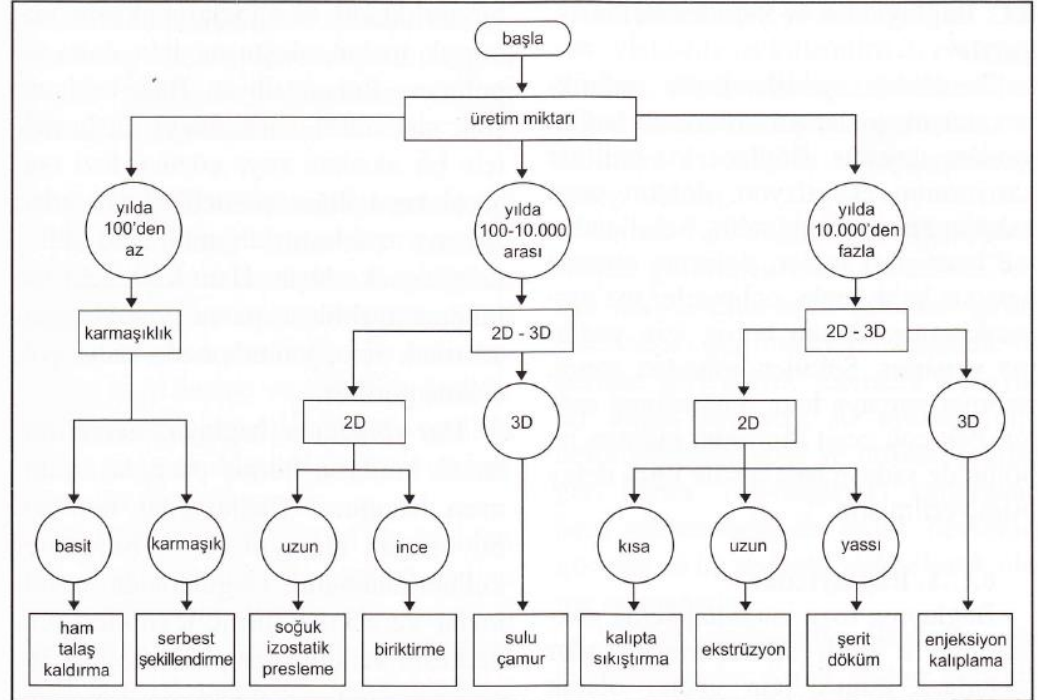
İlk faktör yıllık üretim miktarıdır, Mühendislik ve kalıplama masraflarını karşılamak üzere sert ve işlenmiş takımlar yüksek miktarlarda üretimlere uygulanır. Bu üretim teknikleri, kalıpta sıkıştırma, enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon gibi yılda 100.000'den veya günde 40 milyondan fazla parça üretim yapılabilen teknikleri içerir. Sert kalıp yöntemi yılda 10.000 parçadan az üretim yapılacak durumlarda nadiren kullanılır.



**Şekil 6.2.** Duruma en uygun toz metalurjisi yöntemini seçme kararını gösteren akış diyagramı. Karar verme kriterlerinde üretim miktarı, şekil karmaşıklığı ve temel şekil geometrisi esas alınır. Diyagramın altında güçlülüklerini göstermek amaçlı çeşitli şekillendirme teknolojileri verilmiştir.

# Toz Şekillendirme

Diğer taraftan, yılda 100 parçadan daha az üretim gerçekleştirilecekse yumuşak kalıp yöntemi daha ekonomiktir. Bu yöntemlere örnek olarak sulu çamur, soğuk izostatik presleme ve sıcak yoğunlaştırma yöntemleri verilebilir. Serbest şekillendirme ve ham işleme teknikleri yılda 100 parçanın altındaki üretimler için uygundur.



**Şekil 6.2.** Duruma en uygun toz metalurjisi yöntemini seçme kararını gösteren akış diyagramı. Karar verme kriterlerinde üretim miktarı, şekil karmaşıklığı ve temel şekil geometrisi esas alınır. Diyagramın altında güçlülüklerini göstermek amaçlı çeşitli şekillendirme teknolojileri verilmiştir.

# Toz Şekillendirme

Üretim miktarına bağlı olarak, serbest şekillendirme, sulu çamur veya enjeksiyon kalıplama teknikleri birçok özellik gerektiren karmaşık şekilli üç boyutlu parçaların üretilmesi için oldukça uygundur. Diğer şekillendirme teknikleri üretilecek parçanın boyut oranına bağlıdır.

Sonuçta üretim maliyeti sorunu ortaya çıkar. Diğer üretim yöntemleri toz metalurjisi teknolojisine üstün gelen bazı avantajlara sahip olabilir. Örnek, cam şişelerin şekillendirilmesi, sulu çamur ve enjeksiyon kalıplama yöntemleri ile de mümkün olmasına rağmen, üfleyerek şişirme tekniği hem bu yöntemlerden çok daha başarılı, hem de arada çok büyük maliyet farkı vardır. Genellikle maliyet üretimde dikkate alınması gereken son ve en önemli parametredir. Buna göre, maliyetin yanında malzemenin kendisi de önemli faktördür. Çünkü toz metalurjisi teknikleri yüksek ergime sıcaklıklı malzemelerin üretiminde çok başarılıdır. Bu durumda, toz metalurjisi teknikleri avantajlıdır, çünkü rekabet eden diğer teknikler, yüksek sıcaklık malzemelerini işleyemezler. Roket nozulunun üretildiği renyum (ergime sıcaklığı 3180 °C) bir örnektir.



# Toz Şekillendirme

## Bağlayıcılar ve Şekillendirme Şartları

Genellikle şekillendirme teknikleri, küçük tozlar ve polimerik bağlayıcılara dayanır. Böylece toz-polimer karışımının ekstrüzyon, döküm veya kalıplanması mümkündür. Şekillendirme basınçları tozları deforme etmede yetersiz kaldığında, polimerler toz parçacıklarının akışını temin için yağlama yaparlar. Şekillendirmeden sonra, polimer parçaya ham mukavemet sağlar

Bağlayıcı, tozu istenilen şekle sokmak ve o şekli sinterlemeye kadar muhafaza etmek için geçici olarak yararlanılan bir araçtır, Böylece, parçanın son bileşiminin belirlenmesinde bir etkisi olmamasına rağmen, bağlayıcının şekillendirme işlemi üzerinde etkisi vardır.

# Toz Şekillendirme

Şekillendirme işlemleri, toz-bağlayıcı karışımlarına kalıba doğru akışı sağlamak üzere basınç uygular. Şekil değiştirme hızı, viskozite ile belirlenmekte olup basınç ve zaman birimidir (Pa.s). Viskozite besleme stoğu özelliği olup, gerilme ile şekil değiştirme hızı arasında ilişki oluşturur.

Kritik katı yükleme, viskozitenin akmayacak kadar çok büyük olduğu noktaya karşılık gelir. Bu nokta, toz için genellikle vurgu yoğunluğudur. Yüksek viskozite şekillendirmeyi güçleştirirken, düşük viskozite şekillendirme sırasında toz-bağlayıcı ayrışmasına ve ardından da çatlama veya çarpılmaya sebep olabilir.

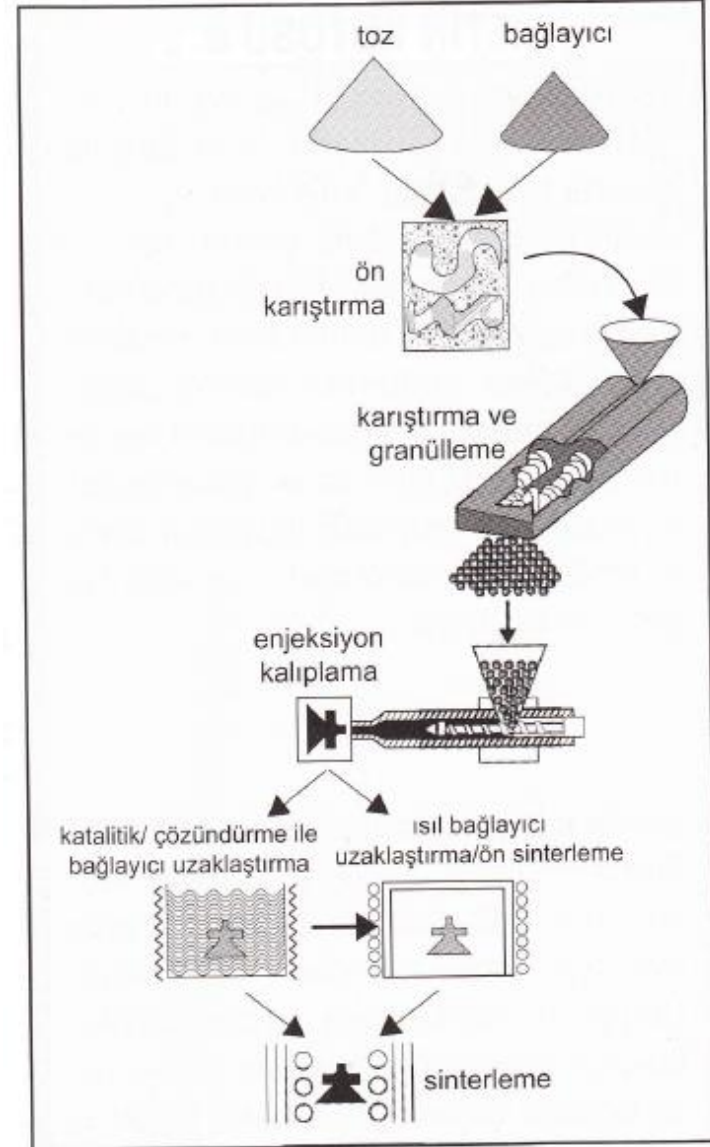
ikinci bir özellik ise esnekliktir. Düşük gerilmeye maruz bırakılan esnek malzemenin şekil hafızası vardır. Üzerindeki gerilme kaldırıldığında, ilk şekline geri döner. Esneklik zıplayan bir topun davranışı ile açıklanabilir; deformasyona uğrar ve orijinal şekline geri döner. Toz-bağlayıcı karışımları hem viskoz hem de esnek özellikler gösterir ve bu nedenle viskoelastik olarak adlandırılır.

# Toz Şekillendirme

## Enjeksiyon Kalıplama

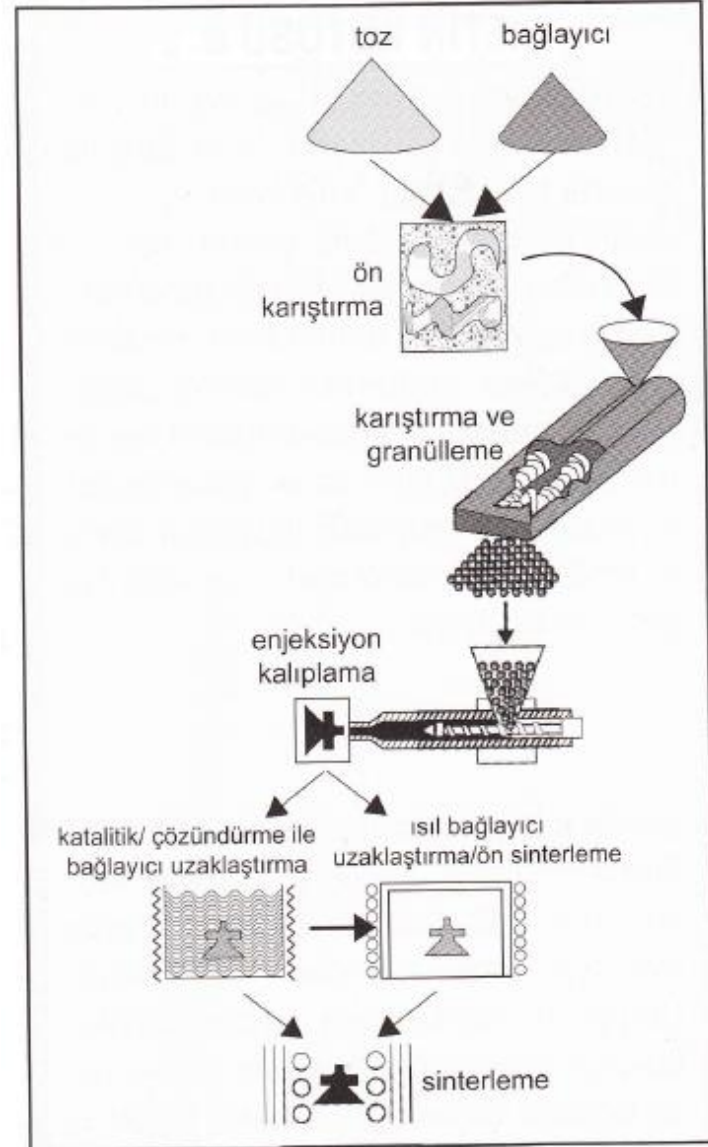
Enjeksiyon kalıplama ile şekillendirilen plastikler ucuz ve yüksek şekillendirme kapasitelerinden dolayı geniş kullanım alanına sahiptir. Toz enjeksiyon kalıplama (TEK) bu başarıyı yüksek parçacıklı termoplastik besleme stokları kullanarak sürdürmektedir.

İşlem seçilen tozlar ve bağlayıcıların karıştırılması ile başlar. Yüksek sinterleme yoğunluğuna ulaşabilmek için genellikle küresel şekle yakın ve ortalama çapı 20 micron altında olan parçacıklar kullanılır. Kullanılan bağlayıcılar termoplastik karışımlardır ve içlerinde mumlar, polimerler, yağlar, yağlayıcılar ve yüzey aktif maddeler vardır.



# Toz Şekillendirme

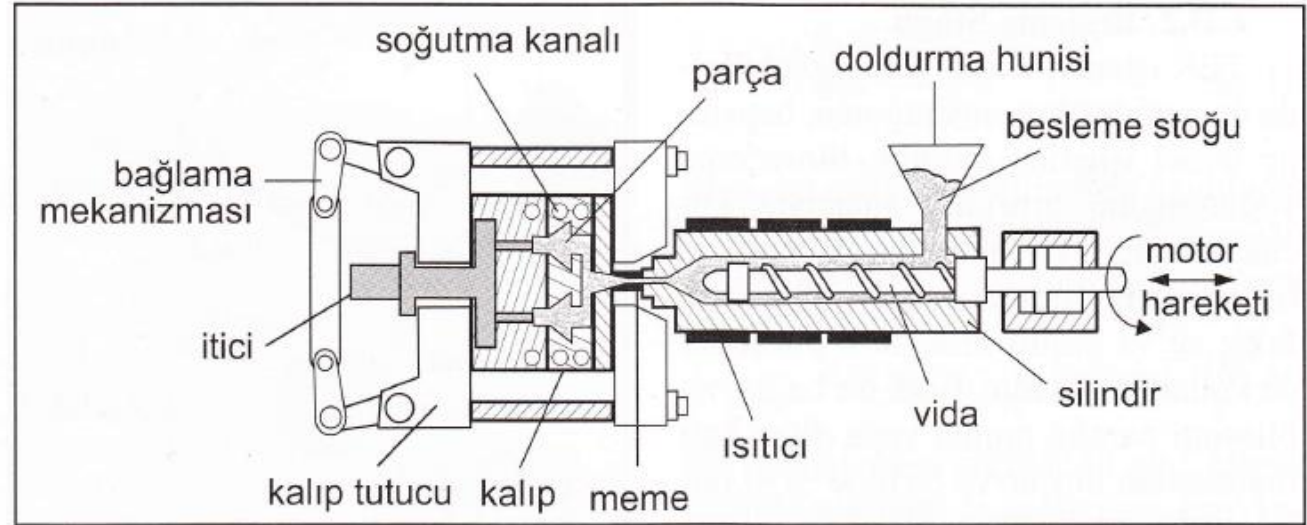
Bağlayıcı viskoz akış özelliklerine yardımcı olarak karışımın karmaşık kalıp geometrisini doldurmasını sağlar. Bağlayıcı kalıpta donduktan sonra parça kalıptan çıkarılır. Ardından bağlayıcı uzaklaştırılır ve toz yapı sinterlenir. Ürün daha sonra yoğunlaştırılabilir, ısıl işlem veya talaş kaldırma yapılabilir, Sinterlenen parça enjeksiyon kalıplanmış plastik ile aynı şekil ve boyut hassasiyetine sahiptir. Ancak, bu metotla elde edilen parçanın performansına polimerlerin ulaşabilmesi mümkün değildir.





# Toz Şekillendirme

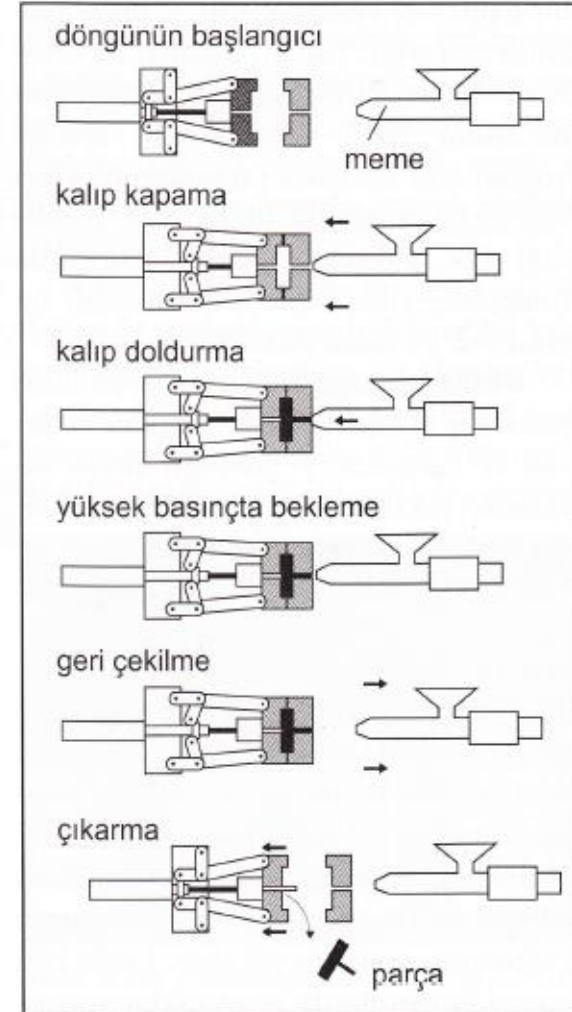
TEK'de parça şekillendirme için kullanılan cihazlar, plastik enjeksiyon kalıplamada kullanılan cihazlarla aynıdır. Tipik bir kalıplama işleminin kesiti Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Çoğu kalıplama makinesi, ısıtılmış ve basınçlı bir silindirdeki besleme stoğunun bir girişten geçerek kalıbı doldurması şeklinde çalışır. Kalıbı doldurmak için gerekli basınç bir piston veya ileri-geri hareketli vida ile sağlanır.



Şekil 6.6. Bir enjeksiyon kalıplama makinesinin kesiti. Şekilde ana bileşenler ve besleme stoğunun ısıtılması ve akış yolu gösterilmektedir.

# Toz Şekillendirme

Besleme stoğu besleme hunisinden soğuk granüller halinde silindire girer. Silindir boyunca ilerlerken bir taraftan da bağlayıcının ergime sıcaklığının üzerinde ısıtılır. Besleme stoğu sıcak, kalıp ise soğuk olduğundan erken donma problemini engellemek için doldurma çok kısa sürede gerçekleştirilmelidir. Doldurma, vidayı piston gibi kullanarak yapılır. Kalıp dolumundan sonra, parçanın çekme boşlukları en aza indirmek için besleme stoğu katılaşınca kadar basınç muhafaza edilir. Yeterli soğumadan sonra sertleşmiş parça çıkarılır ve döngü tekrarlanır.

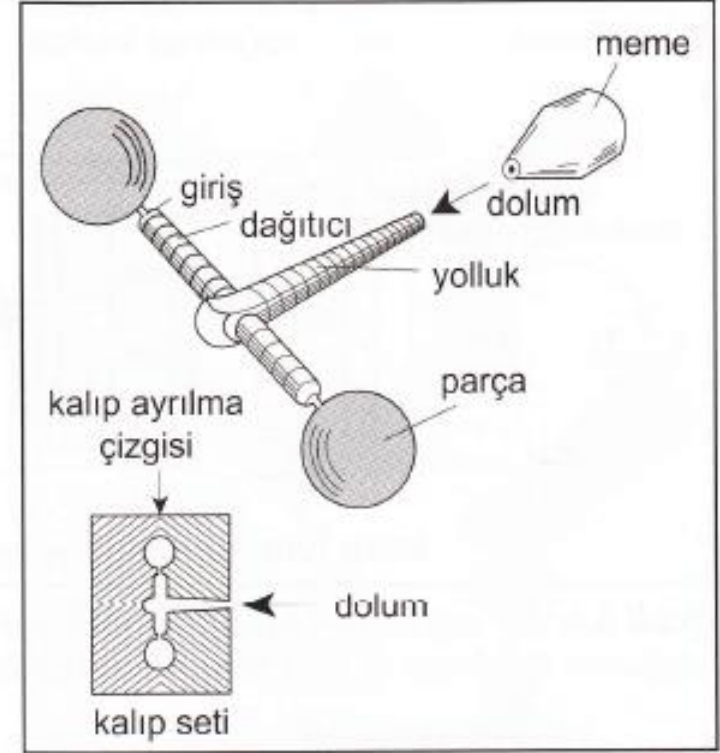


*Şekil 6.7. Bir döngü boyunca makinenin çalışmasını gösteren kalıplama çevrimindeki basamaklar.*

# Toz Şekillendirme

## Besleme stoğu

TEK işlemin pek çok değişik şekillerde denenmiş olmasına rağmen, hepsinde temel işlemler aynıdır. Sinterleme yoğunluğunu artırmak amacıyla küçük parçacıklar kullanılır. Genellikle bağlayıcı bir termoplastik polimerdir, fakat su ve çeşitli inorganik bileşikler de kullanılmaktadır. Tipik bir bağlayıcı bileşimi parafin mumu veya diğer katı mumlardan oluşur ve birlikte %30 polipropilen ve tozun bağlayıcıya yapışmasını sağlamak amacıyla yağlar veya başka ıslatıcı maddeler bulunur. Böyle bir bağlayıcı yaklaşık 150°C civarında tamamen ergir.



**Şekil 6.8.** Kalıp içerisindeki besleme stoğu akış yolunun şematik gösterimi. Besleme stoğu iki gözlü kalıp boşluğuna meme, yolluk, dağıtıcı ve giriş kanalından geçerek dolar.

# Toz Şekillendirme

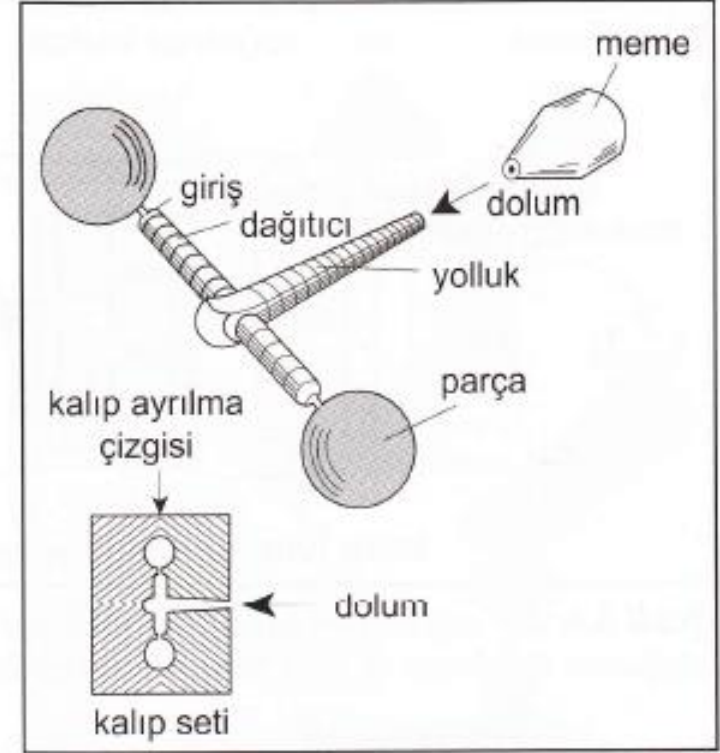
Fazla katı içeren karışımlarda, parçacıklar arasındaki boşlukları dolduracak yeterince bağlayıcı bulunmadığından karışımın yoğunluğu azalır. Viskozite bileşime çok duyarlı olduğundan, besleme stoğundaki herhangi bir homojensizlik, karışımın kalıp boşluğuna düzgün akmasını engeller.



# Toz Şekillendirme

## İşlem Basamakları

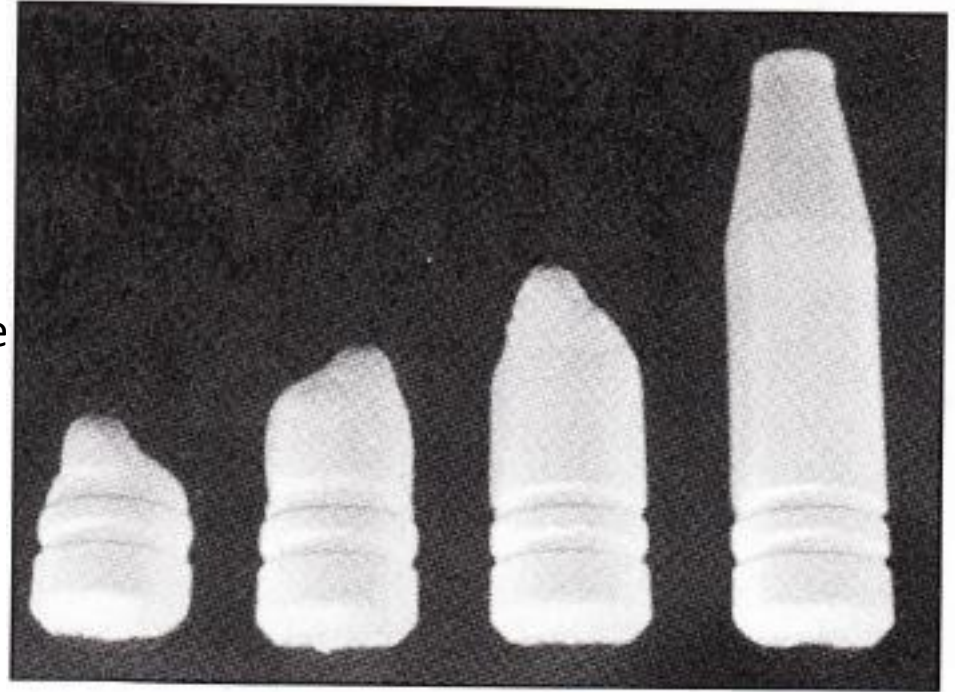
Kalıplama besleme stoğunun aynı anda ısıtılmasını ve sıkıştırılmasını gerektirir. Kalıplama makinesi besleme stoğunu 130 °C ile 190 °C arasında ısıtır. Kalıplama, erimiş besleme stoğu kalıba enjekte edilirken çok kısa sürede gerçekleşir. Besleme stoğu Şekil 6.8'de görüldüğü gibi, silindirin sonundaki memeden çıkar, yolluk, dağıtıcı ve giriş kanalından geçerek kalıp boşluğuna akar. Parçalar kalıp ayrılma çizgisinde yerleştirilmişlerdir ve kalıp açılarak dışarı alınır. Besleme stoğu soğuk kalıpta akarken soğur ve viskozitesi artar.



**Şekil 6.8.** Kalıp içerisindeki besleme stoğu akış yolunun şematik gösterimi. Besleme stoğu iki gözlü kalıp boşluğuna memeden, yolluk, dağıtıcı ve giriş kanalından geçerek dolar.

# Toz Şekillendirme

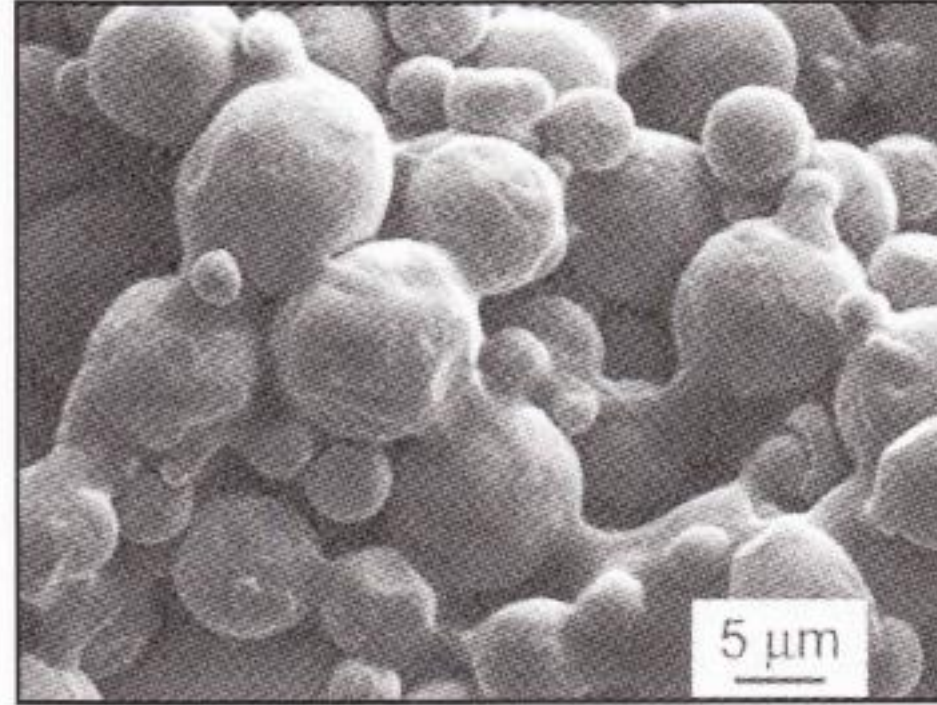
Kalıp boşluğunun yolluktan aşamalı dolumu esnasında içerdeki hava bir kılcal kanaldan dışarı itilir. Bu havalandırma kanalları doldurulacak kalıbın son kısmında bulunur. Kalıp dolum aşaması Şekil 6.10'da görülmektedir. Bu görüntülerde besleme stoğu miktarı gittikçe artmakta olup, giriş altta, havalandırma deliği ise üstte yer almaktadır.



*Şekil 6.10. Alüminadan üretilen bir parçanın üretimi sırasında kalıbın aşamalı olarak dolumu. Besleme stoğu girişten kalıba dolarken hava da zıt yönde itilerek kılcal damarlardan boşaltılır.*

# Toz Şekillendirme

Kalıplamadan sonra bağlayıcı parçadan "bağlayıcı uzaklaştırma" denilen bir işlem ile uzaklaştırılır. Bağlayıcı uzaklaştırma için ısı, ..zücü ve kılcal yöntemleri de içine alan pek çok seçe nek vardır. Isıl bağlayıcı uzaklaştırma yöntemi en sık kullanılan yöntem olup, parça yavaş yavaş 600 "C'nin üzerine havada ısıtılarak bağlayıcı ayrıştırılır. Bir diğer alternatif ise, parçayı bir çözücü içerisinde daldırmaktır. Böylece bağlayıcı bиеşenlerinden birisi ..zünerek uzaklaştırılır.

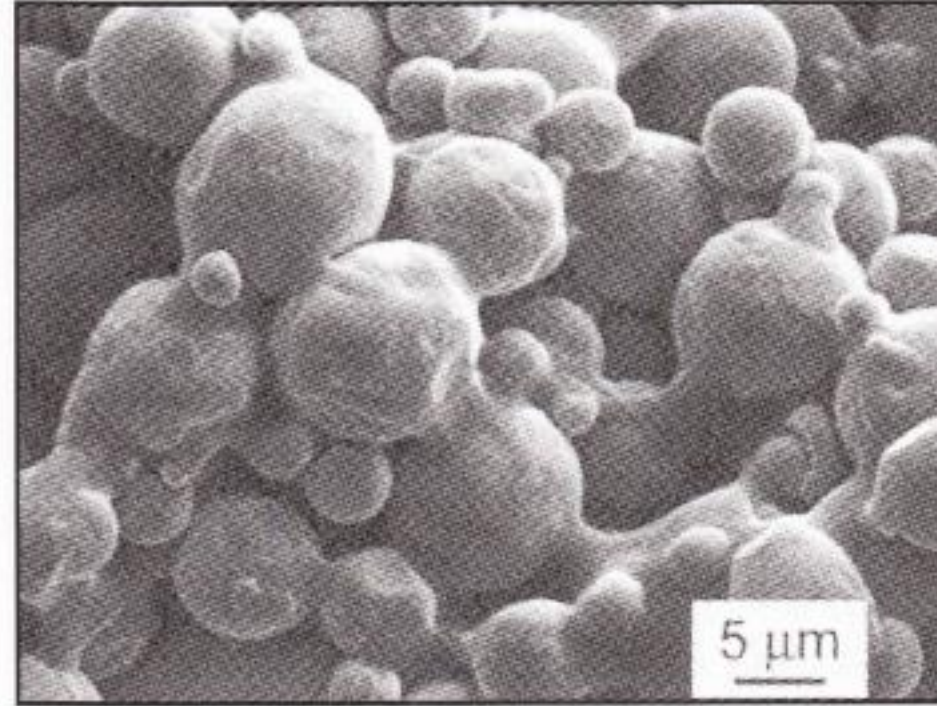


*Şekil 6.11. Bağlayıcı uzaklaştırmanın birinci basamağında sonra parçacıklar arasında kalmış bağlayıcının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü. Kalan bu bağlayıcı, sinterlemeden önce tozların dağılmadan kalmalarını sağlar (R.K. Enneti'nin izniyle).*



# Toz Şekillendirme

Bir diğer alternatif ise, parçayı bir çözücü içerisinde daldırmaktır. Böylece bağlayıcı bileşenlerinden birisi ..zünerek uzaklaştırılır. Bir miktar polimer ..zünmeden kalır ve Şekil 6.11'de görüldüğü gibi parçacıkları sarkaç tipi bağlarla bir arada tutar. Bir sonraki basamak sinterleme olup, doğrudan bağlayıcı uzaklaştırma d. ngüstine dahi1 edilebilir.

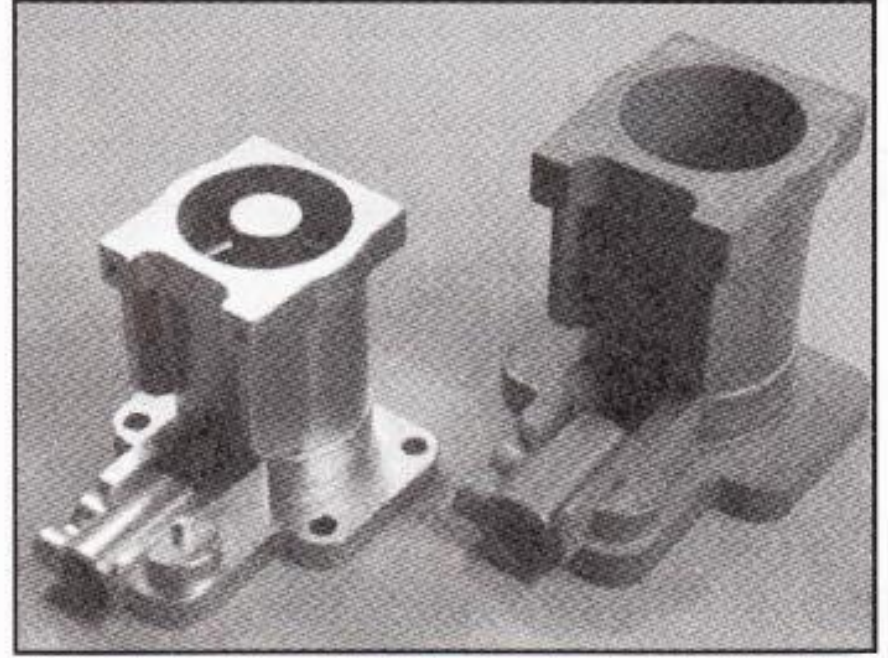


*Şekil 6.11. Bağlayıcı uzaklaştırmanın birinci basamağından sonra parçacıklar arasında kalmış bağlayıcının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü. Kalan bu bağlayıcı, sinterlemeden önce tozların dağılmadan kalmalarını sağlar (R.K. Enneti'nin izniyle).*



# Toz Şekillendirme

Sinterleme parçacıklar arası kuvvetli bağların oluşumuna yol açar ve yoğunlaşma ile parça içerisindeki boşlukları uzaklaştırır. İzotropik toz paketleme sayesinde sinterlemede beklenen ve homojen çekime sağlanabilir. Bu nedenle, kalıptan çıkan orijinal parça istenilen boyutlardaki sinterlenmiş parçadan belirli oranlarda daha büyük ebatlarda olur. Şekil 6.12'de, kalıplamadan sinterlemeye geçildiğinde meydana gelen .l.üi değişikliği görülmektedir. Sinterlemeden sonra parçanın dayanım rekabet edebilir seviyededir ve mikroyapı homojenliği mükemmeldir. Böylece pek çok diğer yöntemle göre çok daha üstün özelliklidir.



*Şekil 6.12. Ham ürün (sağda) ve sinterlendikten sonra birkaç delik açılmış (solda) bir vana gövdesi. Sinterlenmiş parça daha küçük boyutta fakat aynı şekildedir (K.L. Lim'in izniyle).*

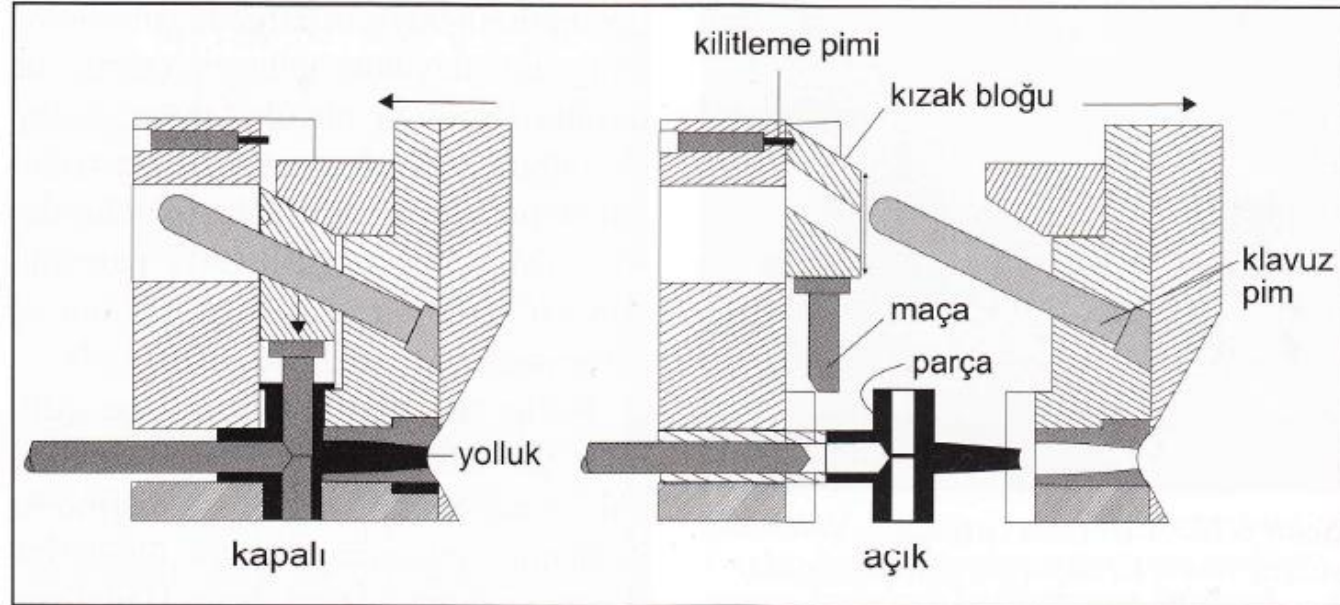
# Toz Şekillendirme

## Kalıplama Teknolojileri

TEK'de son ürünlerinden daha büyük bir kalıp oluşturulur. Bu şekil defalarca çoğaltıldığından kalıp malzemesi sert, dayanıklı ve işlenebilir olmalıdır. Sert kalıpların imalatı pahalıdır, ancak aşınma direnci yüksek olduğundan fazla miktardaki üretimler için tercih edilirler. TEK'de kalıp ömrü 300.000 parçayı geçer, hatta bazen bunun on kat fazlası dahi gerçekleştirilebilir. boşluğunun boyutu, parçada sinterleme sırasında meydana gelecek çekme de hesaba katılarak büyük tutulur. Kalıp boşluğunun etrafında kalıbı açma-kapama, parçayı çıkarma, kalıp bölümlerini ayarlama, hareketli ilave parçalar, parçayı soğutma ve yolluk, dağıtıcı ve girişi sağlayan mekanizmalar vardır.

# Toz Şekillendirme

Kızak tasarımına bir örnek Şekil 6.13'de verilmiştir. Kalıp boşluğunun eş parçaları kapanırken, kızak direk oluşturmak için hareketlendirilir. Direk etrafında dolum yapıldıktan sonra, kalıp boşluğu açılırken kızak yukarı doğru hareket eder ve böylece kalıp ayrılma çizgisine paralel delik oluşur. Bu tür hareketler parçanın bütün yönlerinde detay oluşturur ve ü. boyutlu karmaşıklığa fırsat verir. Kalıbın ömrü kalıp malzemesinin dayanabileceğinden daha küçük basınç uygulanmasına bağlıdır.



*Şekil 6.13. Şekilde dik bir maça kullanılarak parçada dik bir deliğin nasıl kalıplandığı görülmektedir. Kalıbın açılması ve kapanması sırasında maçayı klavuz pim hareket ettirmektedir. Bu tür hareketler ancak kalıplama basıncı düşükken yapılabilir.*

# Toz Şekillendirme

Son karbon seviyesi %5'tir. Bu alaşım mum ve polietilen ile birleştirilerek hacimce %58 katı yükleme yapılabilen besleme stoğu oluşturulur. Kalıplama esnasında, makinenin meme sıcaklığı 175 C, kalıp sıcaklığı 40 C'dir. Kalıp dolumu sırasında uygulanan basınç 20 MPa, besleme stoğunun soğutulması esnasında ise basınç 8 MPa'dır. Bu parçanın üretimi sırasında, kalıp dolum süresi yaklaşık 0,5 saniye, kalıp soğutma süresi 18 saniye ve her bir parça üretim döngüsü arasında geçen süre 37 saniyedir. Sinterlenmiş ve ısıtılmış parçanın yoğunluğu 7,55 g/cm<sup>3</sup> olup, 1655 MPa çekme ve 1480 MPa akma mukavemetine sahiptir. Enjeksiyon kalıplanmış parçalar şekil olarak diğer TM tekniklerinde karşılaşılanlardan çok daha karmaşıktır. İlave olarak, otomasyon sistemleri bu yönetime önemli üretkenlik kazanımları sağlamıştır.

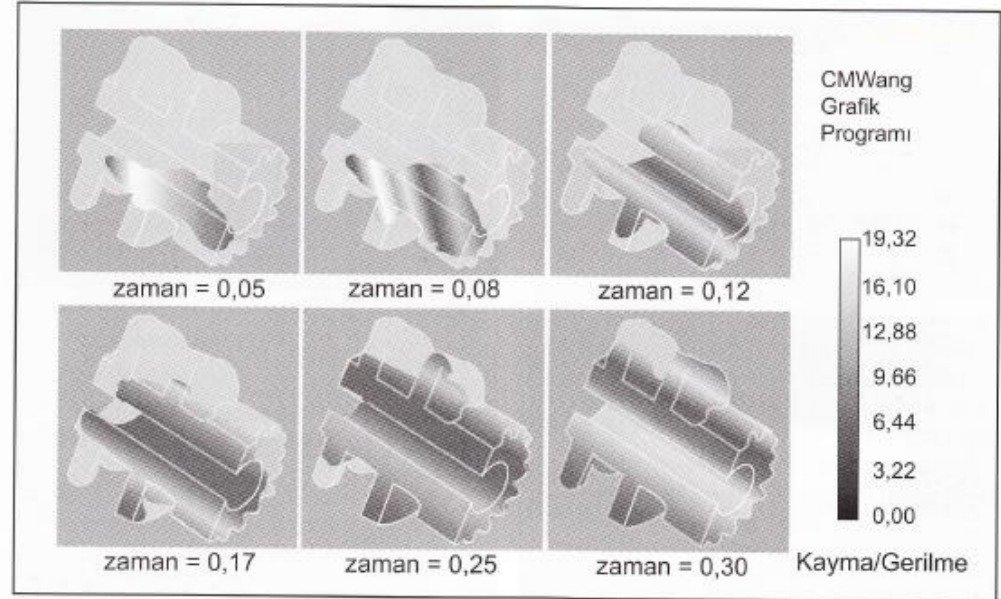


# Toz Şekillendirme

## Kalıplama için Tasarımlama

Enjeksiyon kalıplama kalıp tasarımı ve makine işletimi ile ilgili özellikler tasarım kurallarını da içeren yazılım paketlerinde mevcuttur. Üretim optimizasyonunda bilgisayar kullanımı önemli bir husustur. Bu tür üretim araçları fiyat teklifi verme aşamasında çok yararlıdır. Farklı malzemeleri, yapı teknikleri ve hatta parça tasarımları imalata başlamadan önce incelenebilir.

Bilgisayar destekli tasarım, hataları ve takım üretmek için gerekli zamanı büyük oranda azaltır. Pek çok bilgisayar modeli vardır ve bunların her birinin işlemin belirli özellikleri için ayarlanması gerekir. Şekil 6.16'da bir kalıp dolumu benzeşimi görülmektedir. Benzeşimde kalıplamanın değişik safhalarında kayma gerilmesi ve dolum cephesi görülmektedir.

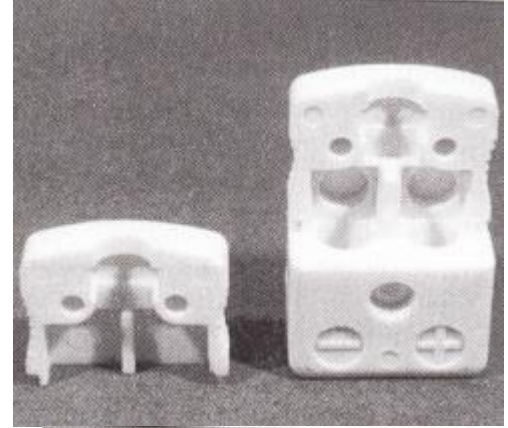
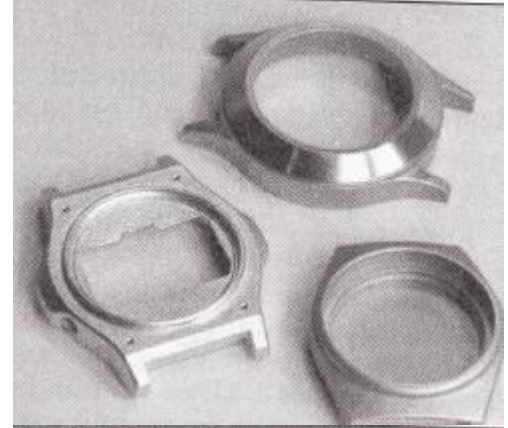


Şekil 6.16. TEK ile parça üretiminde kalıp dolumunun bilgisayar benzetimi. Şekilde dolumun ilk 0,3 saniyesindeki hacmin doluşu ve kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir (C.M. Wang'ın izni ile).

# Toz Şekillendirme

Toz enjeksiyon kalıplama, karmaşık şekilli, tam yoğunluklu parçaların üretimine uygulanır. TEK'de uygulanan homojen basınç, yoğunluk gradyanını en aza indirerek sinterlemede homojen yoğunlaşma sağlar. Genellikle, plastik enjeksiyon kalıplama ile şekillendirilebilen her şekil bu yaklaşım ile de mümkündür. Özellikle küçük ve karmaşık geometrilerin imalatında kullanılır. Bununla birlikte, parçadaki bölgesel kalınlık farklılıkları çarpılmaya neden olduğundan en çok istenilen sabit duvar kalınlığıdır.

Sabit ve ince duvar kalınlığı hızla bağlayıcının uzaklaştırılmasını sağlar. Buna bir örnek olarak zirkonyadan üretilmiş makas uçları verilebilir. Makas uçlarının uzunlukları genişliklerinden çok fazla olup, kalınlıkları da çok değişmez. Bir parçanın ne kadar hızlı üretilebileceğinin en önemli ölçüsü kalınlıktır.

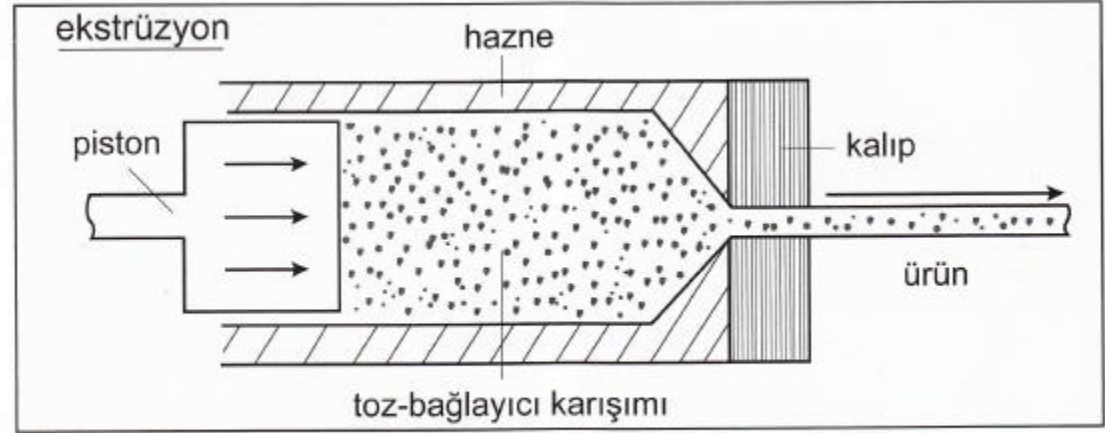


# Toz Şekillendirme

## Ekstrüzyon

Ekstrüzyon çubuklar, tüpler, bal petekleri ve matkap uçları gibi uzun, ince şekiller elde etmek için kullanılır. Pek çok bakımından besleme stoğu TEK'de kullanılanlara benzerdir. Toz/bağlayıcı karışımı ısıtılmış hazneye yerleştirilir ve bir piston ile sıkıştırılır" Şekil verme kalıbı haznenin çıkışıdır.

Basit durumlarda şekil dairesel bir deliktir, ancak pek çoklarında üretilecek parçada merkezi delikler, kayar kama yerleri veya diğer geometrilerin bulunması gerekir. Bal petekleri gibi şekillerin oluşturulmasında kalıp merkezine maça oluşturmak için ızgaralar kullanılır.



Şekil 6.20. Çubuk ve boru gibi sürekli ürünlerin şekillendirilmesinde çamur kıvamındaki toz-bağlayıcı karışımının kalıp deliğinden ekstrüzyonla geçişi.

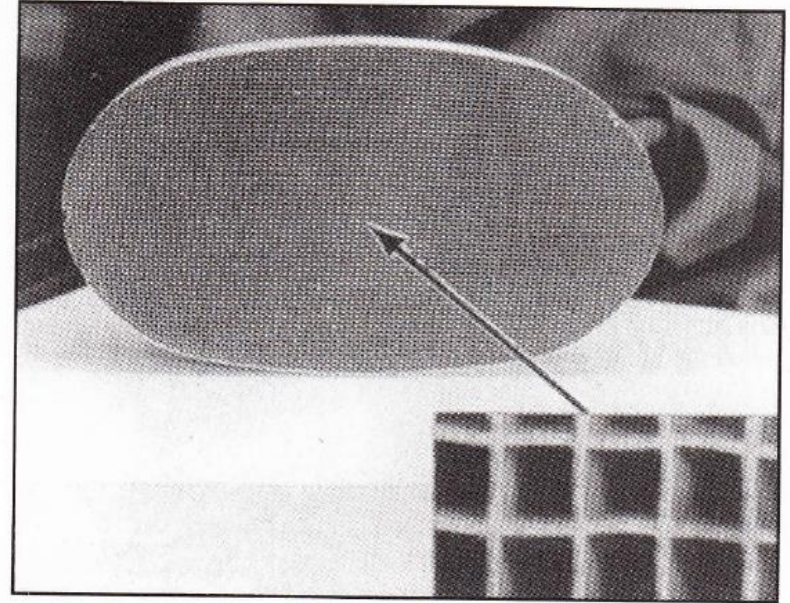
Akış bozukluklarını en düşük düzeyde tutmak için destek kalıptan akış yönünde olmalıdır. İlave olarak, kalıptan çıkan parça matkap ucunda olduğu gibi helis oluşturmak üzere döndürülebilir. Bütün bu parçalar sabit kesitli olup, ekstrüzyon işleminden sonra istenilen uzunlukta kesilmeleri gerekir.



# Toz Şekillendirme

Benzer kavramlar, ekstrüzyonla, besleme stoğunu kapalı bir kalıba girmeye zorlayıp, istenilen şekilde ürün elde etmede kullanılır. Bu sıkıştırma kalıplama olarak tanımlanır. Transfer kalıplama, bağlayıcı-toz karışımını kalıp boşluğuna gaz basıncı uygulayarak girmeye zorlar. Bu şekillendirme işlemleri için, bağlayıcılar genellikle selüloz, mum veya su esaslı olur. Ancak polivinilalkol, parafin veya mineral yağı ve stearik asit gibi yağlayıcıları da ihtiva eder.

Ekstrüzyon ile parça üretimi kapasitörler, mikro-elektronik altlıklar, gözenekli tüpler, kaynak çubukları ve otomobil ekzoz katalitik dönüştürücülerine uygulanmaktadır.



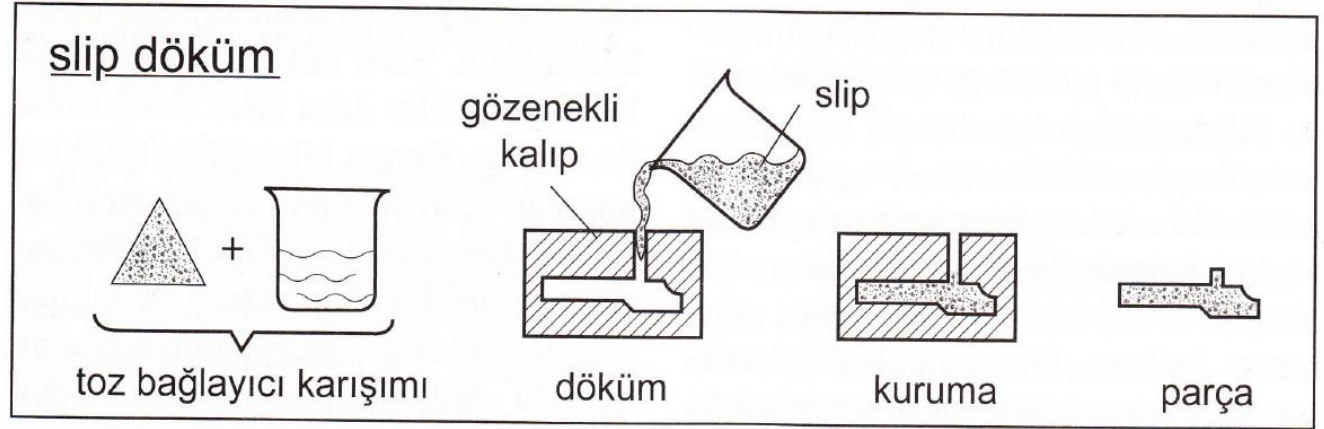
*Şekil 6.21. Bal peteği, metil selüloz ve sudan oluşan bağlayıcı içeren toz karmaşık bir kalıptan ekstrüzyonla üretilir (A.Upadhyaya ve J. Thomas).*



# Toz Şekillendirme

## Sulu Çamur Teknikleri Slip ve Sulu Çamur Döküm

Enjeksiyon kalıplama veya ekstrüzyonda besleme stoğunun viskozitesi slip, sulu çamur ve şerit döküm ile kıyaslandığında daha yüksektir. Viskoziteyi düşürerek dökümü kolaylaştırmak için besleme stoğuna su gibi çözücüler ilave edilir. Slip döküm için tipik bir bağlayıcı karışımı su, aljinat ve yüzey aktif maddelerden oluşur. Diğer bağlayıcı sistemleri ise suda çözülen, selüloz amonyum polimetil metakrilat, polivinil alkol veya alkolde çözünen diğer polimerlerden oluşabilir.



**Şekil 6.22.** Slip döküm işleminin şemantik gösterimi. Toz, düşük viskoziteli bir bağlayıcı (polimer + çözücü) ile karıştırılır ve gözenekli kalıp içerisine dökülür. Kalıp içerisindeki gözenekler bağlayıcıdaki aşırı suyu kılcal hareket ile uzaklaştırır.

# Toz Şekillendirme

Slip dökümün en yaygın kullanım alanlarından birisi seramik banyo takımlarının üretimidir. Ayrıca, prototip şekiller ve hatta pilot takım setleri üretiminde de kullanılır. Bağlayıcı bir termoplastik olduğundan, kalıp dolduktan sonra sulu çamur donar.



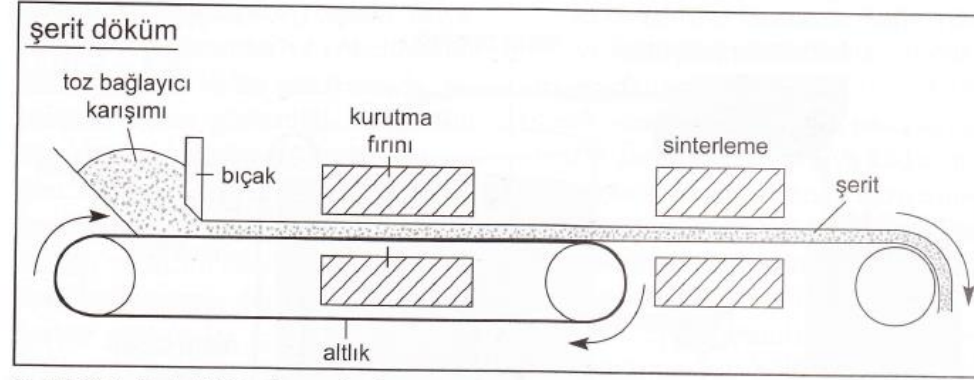
*Şekil 6.23. Şekilde görülen bronz heykel sulu çamur döküm yöntemiyle toz-polimer karışımını kauçuk bir kalıp boşluğuna döküp basınç uygulamadan üretilmiştir.*

# Toz Şekillendirme

## Şerit Döküm

Şerit dökümde benzer düşük viskoziteli toz- çözücü-polimer karışımlarını kullanılır. Ancak, oluşum basamağı, hareket eden bir plastik tabaka üzerinde karışımın çökelerek birikmesidir.

Burada toz-bağlayıcı çamuru hareket eden bir plastik tabaka üzerine sürekli beslenir ve ardından küçük bir aralıktan geçer. Çamur bir neşter vasıtasıyla sabit kalınlıkta tabaka haline getirilir. Daha sonra, çözücü buharlaştırılır, geride kalan bağlayıcı tozları birbirine bağlar ve taşıma mukavemeti kazandırılır.



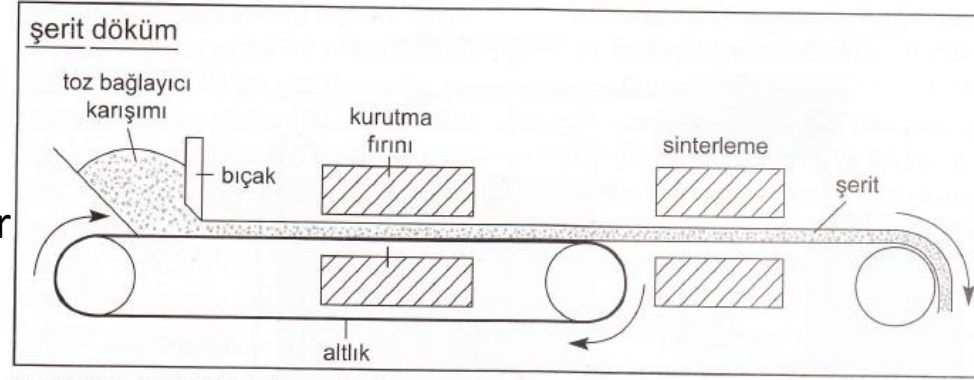
Şekil 6.24. Şerit dökümde, toz-bağlayıcı karışımı ince bir şerit halinde, hareket eden bir kağıt veya plastik altlık üzerine dökülür. Bu altlık şeriti sinterleme öncesi kurutma fırınına taşır. Bu teknik ince tabakaların üretiminde kullanılır.

# Toz Şekillendirme

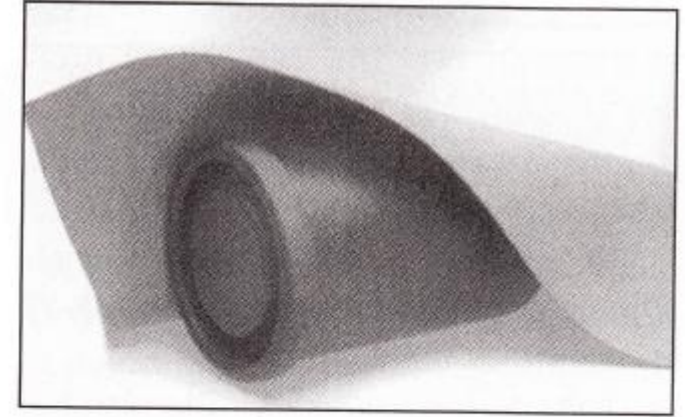
## Şerit Döküm

Şerit döküm için kullanılan bağlayıcılar daha önce tartışılanlar ile aynıdır. Yaygın bileşenler akrilikler, münlar, polivinil alkol ve polivinil butirildir. Tercih edilen çözücü sudur, ancak bazı bağlayıcılar zehirli ve sağlığa zararlı çözücülere gereksinim duyarlar.

Şerit döküm pil elektrotları, lehimleme tabakaları, mikroelektronik altlıklar, kaplamalar ve ince folyolann üretiminde kullanılır.

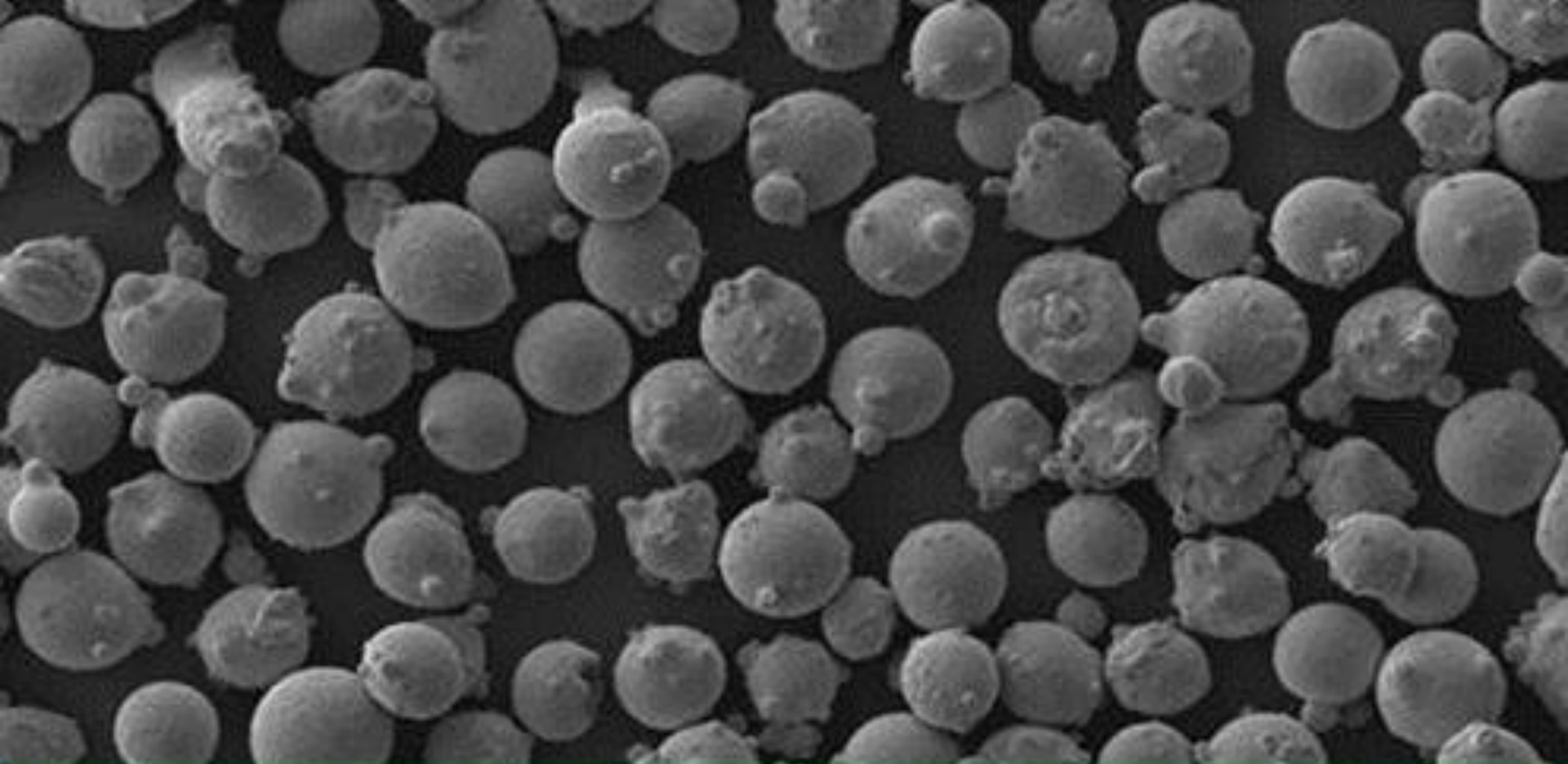


Şekil 6.24. Şerit dökümde, toz-bağlayıcı karışımı ince bir şerit halinde, hareket eden bir kağıt veya plastik altlık üzerine dökülür. Bu altlık şeriti sinterleme öncesi kurutma fırınına taşır. Bu teknik ince tabakaların üretiminde kullanılır.



Şekil 6.25. Şerit döküm ile üretilmiş tabakanın sinterleme öncesi esnekliğinin görünümü. Toz şerit küçük bir kutu üzerine serilmiştir (Julian Thomas'ın müsaadesiyle).

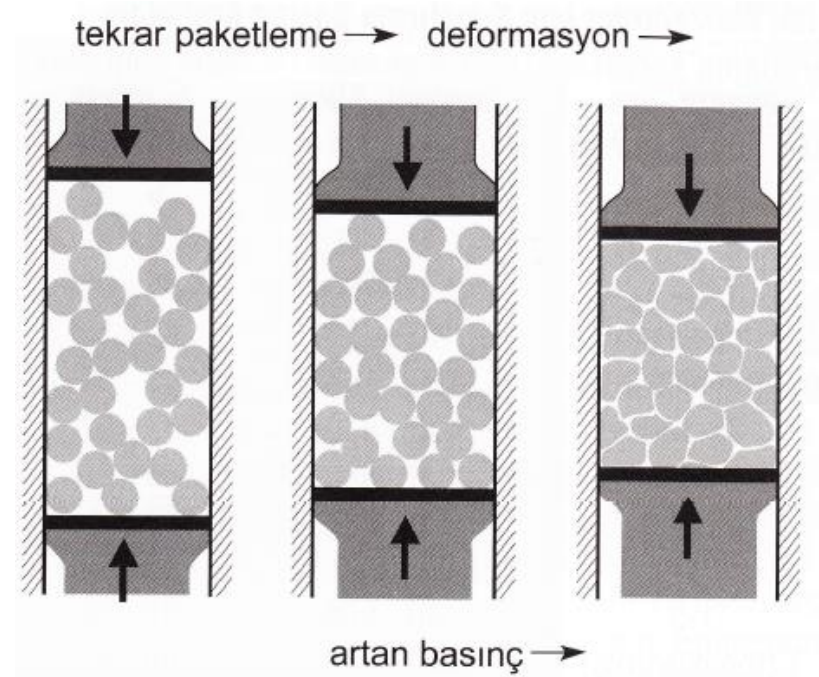
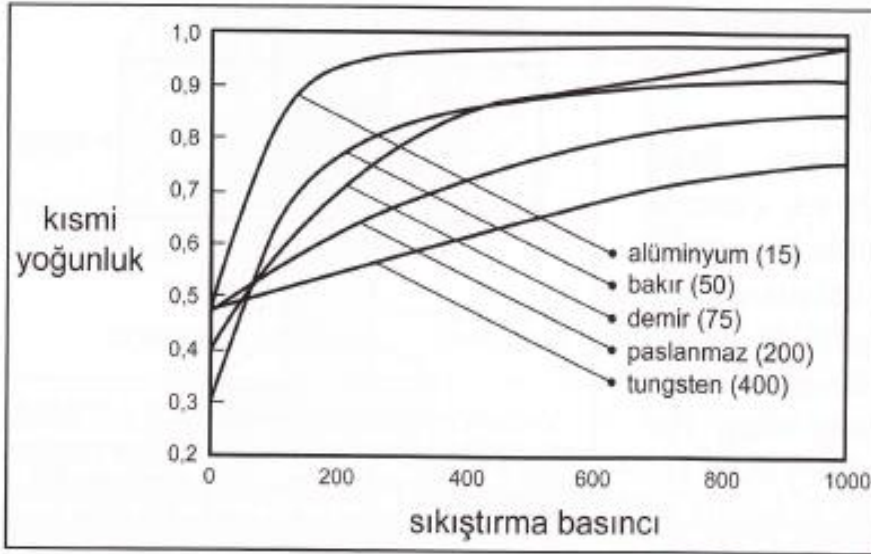




# Tozun Sıkıştırılması

# Tozun Sıkıştırılması

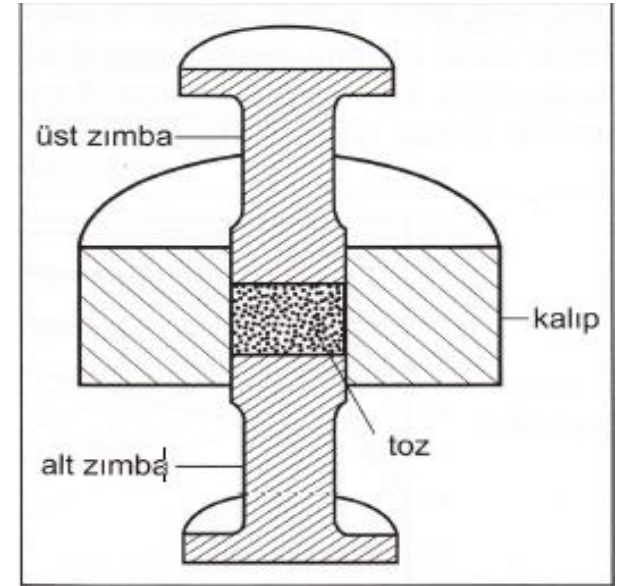
Tozlar basınç uygulandığında; önce parçacıklar birbiri üzerinden kayarak ve daha sonra ise yüksek basınçlarda parçacığın şekil değiştirmesiyle yoğunlaştırılırlar. Yoğunluk artması düşük basınçlarda önce hızlıdır, fakat gözenekler kapandıkça toz, yoğunlaşmaya karşı artarak direnç gösterir. Sıkıştırma için parçacık sertliği önemli bir parametredir.



# Tozun Sıkıştırılması

Toz görünür yoğunlukta başlar ve her bir parçacık 4-6 komşusu ile temastadır. Bu aşamada tozun herhangi bir bağ mukavemeti yoktur. Basınç uygulandıkça parçacıklar yerleşir, şekil değiştirir ve bağ oluşturur. Şekil değiştirme parçacıkların sertliğini artırdığından sıkıştırmayı devam ettirmek için daha yüksek basınç gerekir. Neticede malzeme geri dönüşü olmayan bir noktaya kadar sertleşir. Çok sert ve çok yumuşak tozlar daha düşük basınçlarda sıkıştırılır.

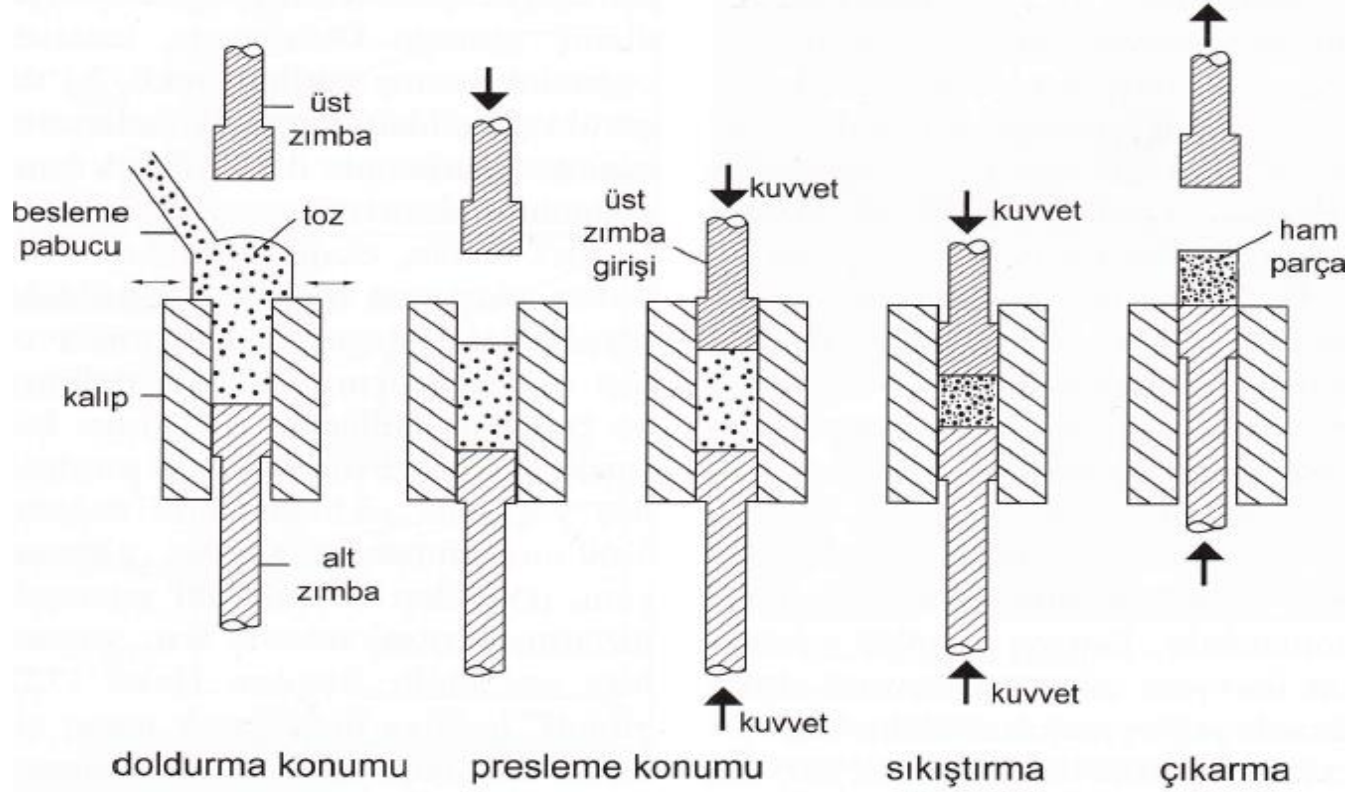
Kalıp, tozun doldurulup sıkıştırılacağı boşluğu temin eder.. Dolum sırasında alt zimbana bulunduğu durum doldurma konumu olarak tanımlanır ve kalıbın içine ne kadar toz dolumu yapılacağını belirler. Toz, kalıp boşluğuna doldurma pabucu vasıtasıyla doldurulur. Tozun akışında oluşabilecek herhangi bir değişiklik basılacak parçayı etkiler. Doldurma sonunda, sıkıştırma sırasında tozun kalıp merkezinde olması için alt zimba daha alt noktaya çekilir. Yoğunlaştırma, zimbaların kuvvet altında kalıp merkezine doğru hareketiyle oluşur. Sonunda, üst zimba geri çekilir ve alt zimba parçayı iterek çıkartır. Ayrıca, parça içinde delik oluşturmak için zimbaların içine yerleştirilmiş maça çubukları bulunabilir.



Şekil 7.3. Toz sıkıştırma için alışılmış bir zimba ve dişi kalıp seti: zimbalar toza basınç uygular ve kalıp toza yan destek olur.



# Tozun Sıkıştırılması



**Şekil 7.4.** Kalıpta sıkıştırma çevriminde, alt zımba doldurma konumunda iken kalıp boşluğuna tozlar dolar. Doldurma pabucunun geri çekilmesinden sonra ölçülü toz miktarı presleme konumuna çekilir. Üst zımba kalıba girer, alt ve üst zimbalar merkeze doğru ilerler. Sıkıştırmadan sonra, üst zımba geri çekilir ve alt zımba çevrimin tekrarından önce parçayı çıkartır.



# Tozun Sıkıştırılması

Sıkıştırılmış toza “**ham parça**” adı verilir. Preslenme sonrası yoğunluk “**ham yoğunluk**”, preslenme sonrası mukavemet ise “**ham mukavemet**” olarak adlandırılır. Basıncın alt ve üst zimbaların her ikisinden de yapıldığı işleme “**çift hareketli presleme**” denilir. Eğer basınç tek bir zimbadan uygulanırsa parça yoğunluk açısından daha az homojendir ve bu işleme “**tek hareketli presleme**” denilir.

Preslemeden sonra, ham parça kalıbın içinde mekanik olarak kilitlemiş durumdadır. Parçayı kalıptan çıkartacak kuvvete “**çıkartma kuvveti**” denir. Burada yağlayıcı çok etkilidir. Yağlayıcı etkisi arttıkça hem çıkartma kuvveti, hem de kalıp aşınmaları azalır.

Kalıpta sıkıştırmada pek çok yöntem vardır:

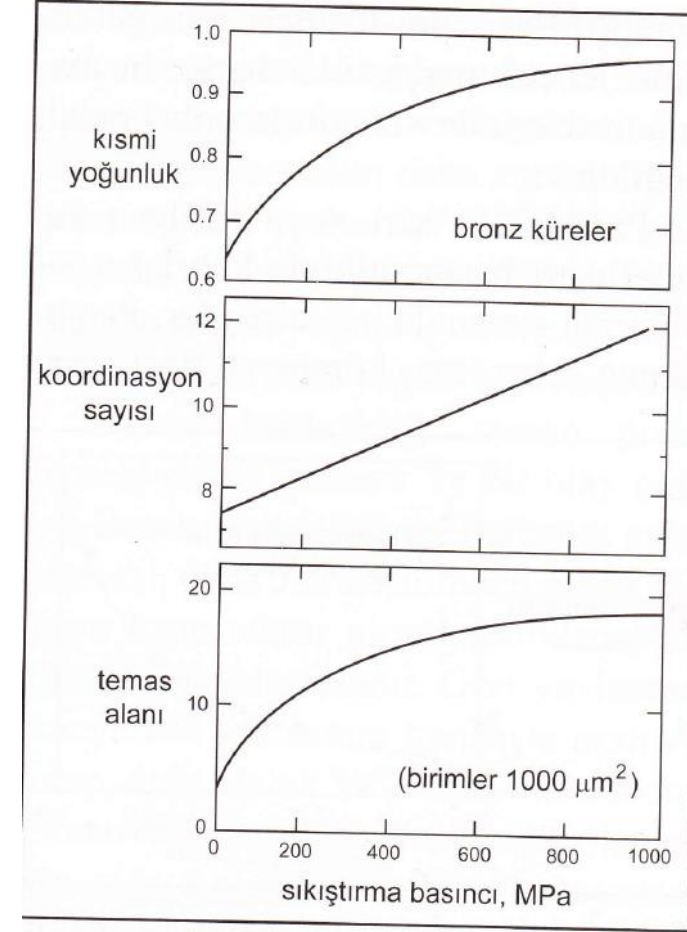
- Sert ve yumuşak kalıplar kullanılması,
- Kalıbın ve tozun ısıtılması,
- Tozun veya yalnız kalıbın yağlanması ve uygulanan üst basıncın, gerinim hızının veya basınçta bekleme zamanının değiştirilmesi.

# Tozun Sıkıştırılması

## Sıkıştırmada Parçacık Deformasyonu

Tozların sıkıştırılmasında iki aşırı uç vardır. Bunlar; şekil değiştirmeyen çok sert parçacıklar ve kolay şekil değiştiren çok yumuşak parçacıklardır. Yüksek sıkıştırma basınçlarında yumuşak toz parçacıkları bile kademeli olarak sertleşerek daha fazla yoğunlaşmaya direnç gösterir. Yumuşak tozlar orta basınç değerlerinde daha yüksek ham yoğunluğa ulaşırlar.

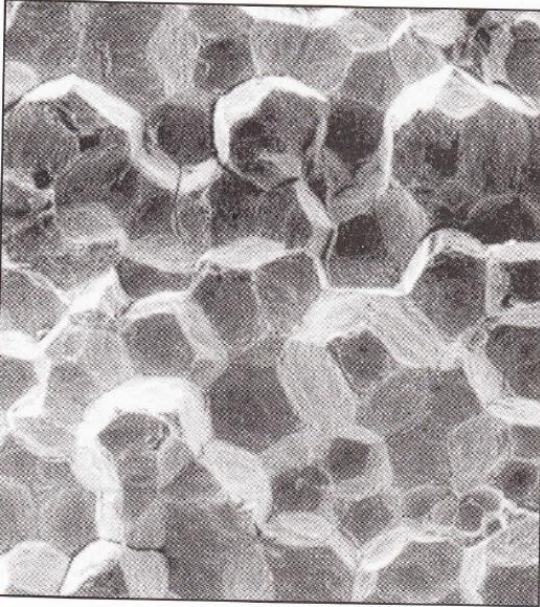
Sert karbür, oksit, borür ve nitrür tozları sıkıştırma sırasında değişikliğe uğramazlar. Dolayısıyla, ham mukavemet sağlamak için genellikle polimer bir bağlayıcı kullanılır. Sıkıştırma basınçları oldukça düşüktür ve preslenmiş yoğunluk sıklıkla teorik değerinin %60'ının altındadır. Kurşun, alüminyum, polietilen ve buz gibi yumuşak tozların sıkıştırılmasında tam yoğunluğa erişilebilir.



# Tozun Sıkıştırılması

## Parçacık Şekil Değişiklikleri

Tozların çoğu sert ve yumuşak aşırı uçlar arasındadırlar. Parçacıklar kalıp içine dolduruldukları zaman düşük temas sayıları vardır. Bu temas noktaları basınç uygulaması ile deformasyona uğrayarak parçacıkların birbirlerine yaklaşmalarına fırsat verir. İlave olarak, boşluklar kapandıkça yeni temas noktaları oluşur. Dolayısıyla yoğunlaşma, koordinasyon sayısında ve temas deformasyonunda artmaya yol açar.

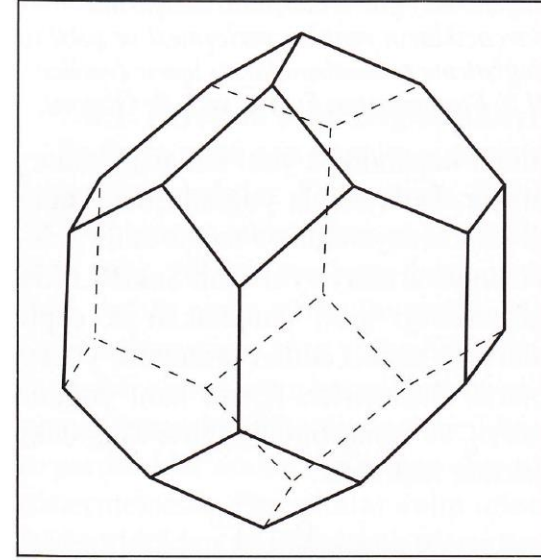
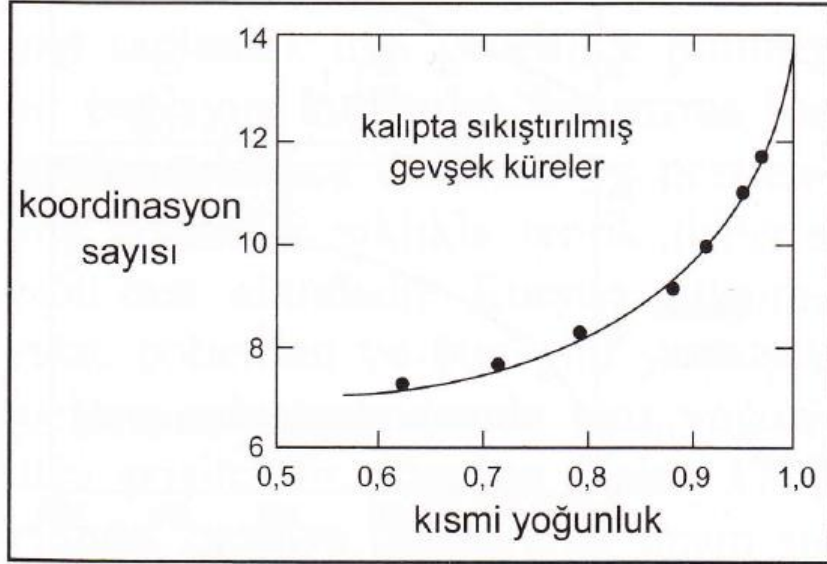


*Şekil 7.6. Taramalı elektron mikroskop fotoğrafı aşırı sıkıştırmanın sebep olduğu küresel parçacıkların düzleşmiş şekillerini göstermektedir. Küreler, koordinasyon sayısı 14 olan çokyüzlü şekline gelmişlerdir.*

Preslemeden sonra, sinterlemeden önceki mukavemet **ham mukavemet** olarak adlandırılır. Ham mukavemet, ham parçanın bükülmesi ve en yüksek gerilmenin ölçülmesi ile belirlenir ve genel olarak 20 MPa' dan düşüktür. Ham mukavemet koordinasyon sayısı, temas büyüklüğü, kısmi yoğunluk ve parçacıkların temas kalitesine bağlıdır.

# Tozun Sıkıştırılması

Sıkıştırma sırasında, kuvvet daha fazla parçacıklara dağıldıkça koordinasyon sayısı artar. Buna bağlı olarak, ham yoğunlukta artış için daha fazla basınç gereklidir. Tozun gevşek durumunda koordinasyon sayısı tipik olarak 4-6 arasında başlar. Tam yoğunlukta koordinasyon sayısı 14 değerine yaklaşır ve parçacık bir tetrakaidekahedron geometrisine dönüşür.



Sıkıştırma aşamaları düşük basınçlarda (0,03 MPa' dan daha düşük) parçacıkların yer değiştirmesiyle başlar ve az bir yoğunlaşma meydana gelir. Daha sonra sünek parçacıklar yaklaşık 100MPa basınçta deformasyona maruz kalarak görünür şekil değişikliğine uğrar. Sert fakat sünek malzemeler 1 GPa aşan çok yüksek basınçlarda preslenir. Yüksek basınçlar, kuvvetli ve sert olan alaşımlı tozların - paslanmaz çelikler, manyetik alaşımlar, takım çelikleri ve kompozitler - preslenmesi için gereklidir. Küçük parçacıklar hariç, bu basıncın üzerinde sıkıştırma çok faydalı değildir.



# Tozun Sıkıştırılması

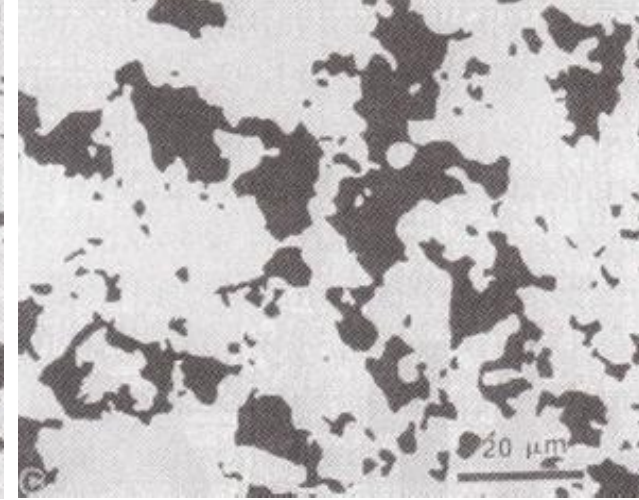
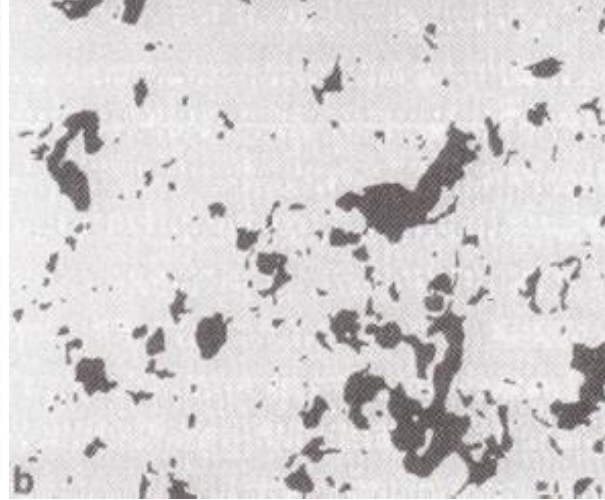
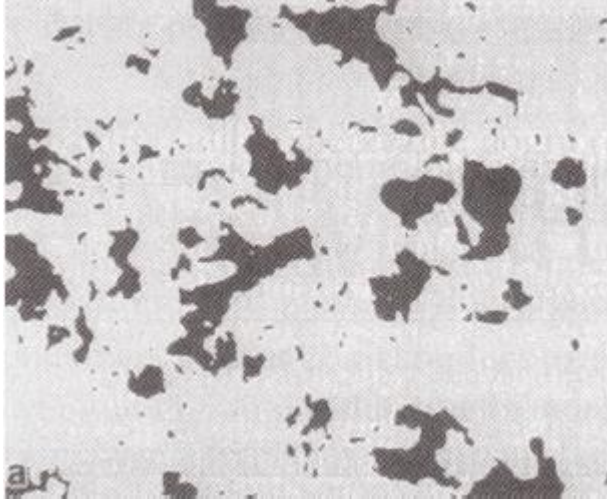
Parçacıklar sert veya kırılğan ise veya aşırı basınç altında kalırlarsa sıkıştırma sırasında parçalanırlar. Parçalanma şeker, tuz, kömür ve bazı seramiklerin preslenmesinde oluşur. Küçük parçacıklar sert olduklarından ve sıkıştırma sırasında hızlı sertleştiklerinden dolayı sıkıştırmaları daha zordur. Bazı nano ölçekli tozlar 4,5 GPa gibi çok yüksek basınçlarda preslenmelerine rağmen teorik yoğunluğun ancak %5-6 civarında görünür yoğunluğa ulaşırlar.

Basınç kaldırıldığı zaman preslenmiş parça genişir ve bu olay “**geri yaylanma**” olarak bilinir. Parçanın genişmesi, çıkartma işleminden sonra kabın içine tekrar girmemesinden açık olarak anlaşılmaktadır. Geri yaylanma sıkıştırma basıncının karesiyle orantılı olup, tipik olarak % 0,2-0,4 arasındadır. Sinterlemeden sonra beklenen ölçülerin elde edilebilmesi için bu boyutsal değişim presleme kalıbı tasarımında göz önüne alınmalıdır.

# Tozun Sıkıştırılması

## Kalıp Yüzeyi Sürtünmesi

Kalıpla sıkıştırmada en önemli zorluklardan biri kalıp yüzeyinde oluşan sürtünmedir. Bu sürtünme ham parçanın kolay çıkartılmasını engellediği gibi aynı zamanda yoğunluk farklılıklarının oluşmasını sebep olur. Zimbanın toza karşı olan hareketi kar küremeye benzer; zimbaya yakın olan yerler yoğundur, ancak uzaklardaki tozlar etkilenmemiştir. Bu mesafeye bağlı basınç sönümünün sebebi tozun kuvveti kalıp çeperlerine sürtünme olarak yaymasıdır. Basınç ham yoğunluğu belirlediği için, basınç farklılıkları yoğunluk farklarını meydana getirir

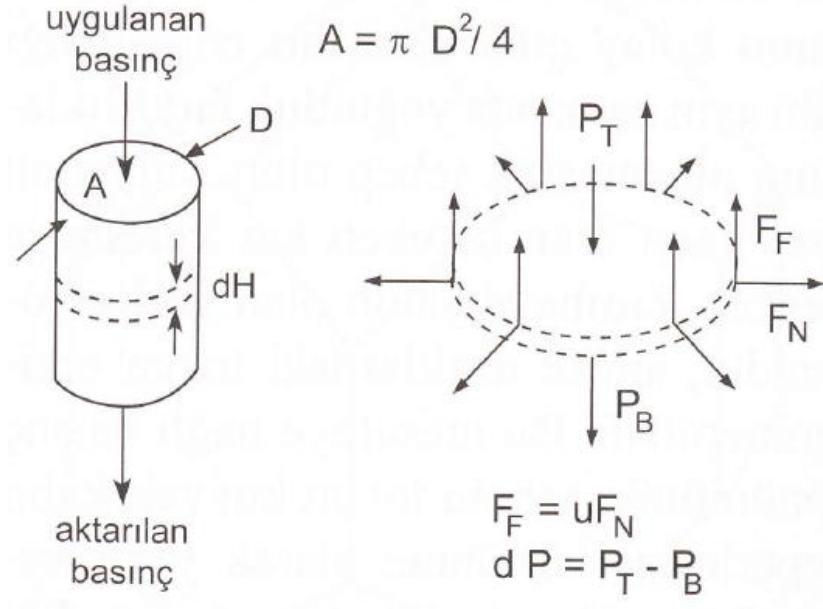


Fe-2Cu-0.8C' den üretilmiş parçanın sinterlemeden sonra çeşitli bölgelerindeki yüzey gözeneklerini (siyah) gösteren üç mikroyapı fotoğrafı: **a)** Üst bölgeler yüzeyde ortalama gözenek boyutu 12  $\mu\text{m}$ , **b)** Yan yüzeyde ortalama gözenek boyutu 10  $\mu\text{m}$ , **c)** alt yüzeyde ortalama gözenek boyutu 12  $\mu\text{m}$

# Tozun Sıkıştırılması

## Yoğunluk Gradyanları

Sinterlemede oluşan boyut değişimi ham yoğunlukla ters orantılı olduğundan düşük yoğunluklu bölgelerde daha fazla değişim oluşur. Kalıp yüzeyi sürtünmesine bağlı olarak oluşan değişken ham yoğunluk, parçanın sinterleme sırasında çarpılmasına sebep olur. Dolayısıyla, kalıp yüzeyi sürtünmeleri sinterlenmiş toleransları kısıtlar. Netice olarak, kalıpta sıkıştırma en iyi yoğunluk gradyanlarını en aza indiren şekillere uygulanır. Yoğunluk gradyanları, alt ve üst zımbaları çift hareketli preslerde aynı anda ortaya doğru hareket etmeleriyle azaltılmaktadır. Sıkıştırılmış parçada yoğunluğun en düşük olduğu bölgeye “**nötr bölge**” denir. Çoğu kez istenen nötr bölge sıkıştırılmış parçanın orta bölgesinde olmasıdır. Sıkıştırma basıncı ve yoğunluk arttıkça kalıp yüzeyinde oluşan sürtünme de artar.



# Tozun Sıkıştırılması

Homojen basınç dağılımı kısa ve geniş çaplı paçalarda oluşur. Kütle boyunca homojen olmadığı için yoğunlukta homojen değildir. Kütledeki ortama ham yoğunluk ortalama basınca bağlıdır.

Yoğunlaşmaya sebep olan ortalama basınç her zaman uygulanan basınçtan daha azdır ve aşağıdaki üç değişkene bağlıdır:

- H / D faktörünün temsil ettiği parça geometrisi
- Eksenel – Basınç dağılımı
- u faktörünün temsil ettiği kalıp duvarı sürtünmesi

Yüksek ortalama basınç, kısa ve büyük çaplı parçalarda ve kalıp duvarları yağlandığı zaman elde edilir. Dolayısıyla, zincir dişlileri ve hap şeklindeki parçaların şekillendirilmesinde kalıpta sıkıştırmanın çok verimli bir şekilde kullanılır. Çoğu parçalar haptardan daha karmaşık şekilli olduklarından, özelliklerinin kontrol edilebilmesi için ortalama yoğunluk ve yoğunluk dağılımının iyi hesap edilmesi gerekir. Aynı zamanda, uzun parçalar homojen yoğunluk dağılımı göstermediklerinden, sürtünme problemlerine karşı hassas olan borular, çubuklar ve kalın parçaların şekillendirilmesinde soğuk izostatik presleme gibi teknikler kullanılır.

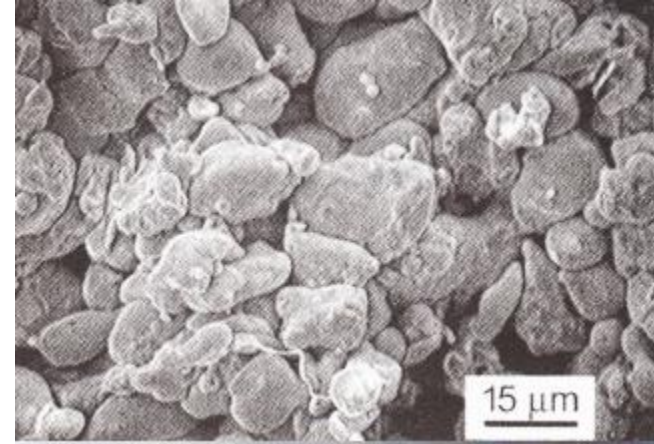


# Tozun Sıkıştırılması

## Parçacık Etkileri

Sıkıştırılabilirlik, preslenme sırasında görünür yoğunlukta ham yoğunluğa değişmez ve genellikle 550 Mpa gibi sabit bir basınçla ölçülür. Parçacık boyutu sıkıştırılabilirliğin önemli bir faktörüdür. Küçük parçacıkların görünür yoğunluğu düşüktür, genellikle serttir ve sıkıştırma sırasında hızlı iş sertleşmesine uğrar. Bu sebeplerden dolayı preslenmeleri daha zordur.

Kalıpta presleme ile yüksek ham yoğunluğa sıkıştırılabilecek şekilde tasarlanmış tozlar genelde yumuşak ve büyüktür. Küçük tozlar sıkıştırılmaya direnç gösterir, bundan dolayı nano ölçekli tozların sıkıştırılabilmeleri çok zordur. İç yapılarında gözenek bulunan sünger tozlar, içlerindeki gözenekleri direnç göstermesinden dolayı zor sıkıştırılırlar. Aynı zamanda, küçük ve sünger tozlar kalıptan çıkartması sırasında daha fazla yaylanma yapacağından çatlak oluşum ihtimali fazladır.



*Şekil 7.16. Su atomizasyonu ile üretilmiş tozun sıkıştırılma sonrası kırık yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu fotoğrafı. Yüzeydeki şekil değiştirmeleri ve mekanik kilitlemeler açıkça görülmesine rağmen, kırılma parçacık ara yüzeylerinde olmaktadır.*

# Tozun Sıkıştırılması

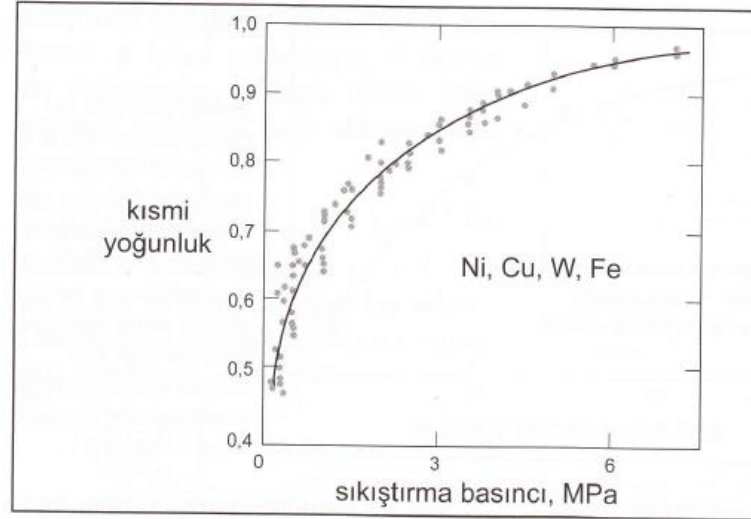
Ham mukavemet bağlayıcıdan veya parçacıkların temasından oluşur. Eğer parçacıklar yumuşaksa, bunlar temas noktalarında sıvanarak bağ meydana getirirler. Yüzeylerinde kirlilik bulunan tozların filmi kırarak için daha yüksek sıkıştırma basıncına ihtiyaç vardır. Düzensiz yapıdaki tozlar yüksek ham yoğunluğa sıkıştırıldığı zaman, parçacıklar soğuk kaynak olur ve mekanik olarak kilitlenir. Sıvama ve kilitlenme her ikisi de daha yüksek ham mukavemete katkıda bulunur.

Yuvarlatılmış fakat düzensiz şekildeki parçacıklar daha iyi ham mukavemet verir. Bunlarda sinterlemeden sonra bahsedilebilir bir mukavemet değerine ulaşır. Bundan dolayı, özellikle sert tozlarda ham mukavemeti arttırmak için polimer bağlayıcılar sıklıkla kullanılır.

# Tozun Sıkıştırılması

## Malzeme Özelliklerinin Etkisi

Yüksek sertlik tüm sıkıştırma basınçlarında ham yoğunluğu düşürür. Genellikle parçacık sertliği malzeme mukavemetiyle artar. Hatta güçlü olan sünek malzemeler dahil sıkıştırmaya direnç gösterir. Alaşımlama mukavemeti artırır, fakat sıkıştırabilirliği azaltır.



*Şekil 7.18. Sıkıştırma-  
mada yoğunlaşmaya  
akma mukavemeti-  
nin etkisi. Sıkıştırma  
basıncının akma  
mukavemetine göre  
normalize edilmesi  
ile, değişik metal  
tozlarına ait verile-  
rin birbirine yaklaştığı  
görülmektedir  
(veriler: Richard  
Heckel).*

Karbon mukavemet için arzu edilir, ancak bir alaşım elemanı olarak sıkıştırılabilirliğin azalmasına sebep olur. Dolayısıyla sinterlenmiş çeliklerde kolay sıkıştırılmayı sağlayabilmek için karbon grafit olarak demir tozuna karıştırılır ve sinterleme sırasında demir içerisinde çözünerek çelik oluşumu sağlanır. Diğer taraftan, kromun sıkıştırılabilirliğe daha az etkisi vardır ve genel olarak demir içerisine ön alaşımlaması yapılır. Bu sebeple sıkıştırılabilirlikten endişe edilen durumlarda genellikle karışım tozlar preslenir ve sinterleme parçacıkların birbirlerine nüfuz ederek alaşım oluşumu için kullanılır.

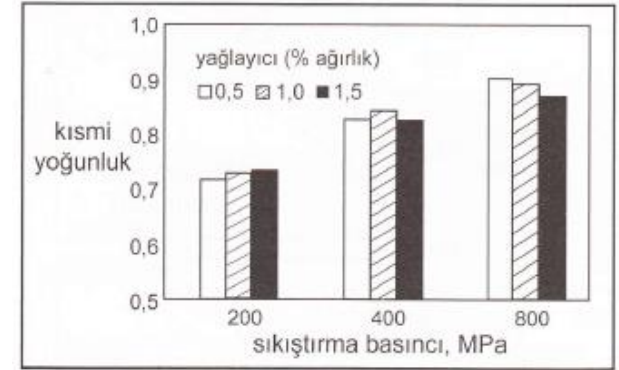
# Tozun Sıkıştırılması

Sert ve yumuşak parçacıkların karışımı orta derece sıkıştırabilirlik gösterir. Az miktarlarda sert parçacıkların sıkıştırmaya etkisi düşüktür. Fakat sürekli iskelet oluşturmaya yetecek miktarda sert parçacıklar olduğu zaman sıkıştırabilirliği ciddi derecede etkiler.

Sıkıştırılabilirliği iyileştirmek için bir bağlayıcı ilavesiyle sert parçacıklar topaklanarak granül haline getirilir. Bu granüller orta basınçta sıkıştırılır. Granüller deforme olur fakat parçacıklar deformasyona uğramaz. Sıkıştırılmış kütlede parçacıklar teorik yoğunluğu %55-60 oranındadır ve bağlayıcı gözeneklerin çoğunu doldurduğu için ham mukavemet sağlamış olur.

## Kalıpta sıkıştırma teknolojisi

Sıkıştırma; toz karışımı, yağlayıcı ve yağlama tekniği, basınç uygulama tekniği, kalıp tasarımı ve pres ile ilgili kararları içerir.



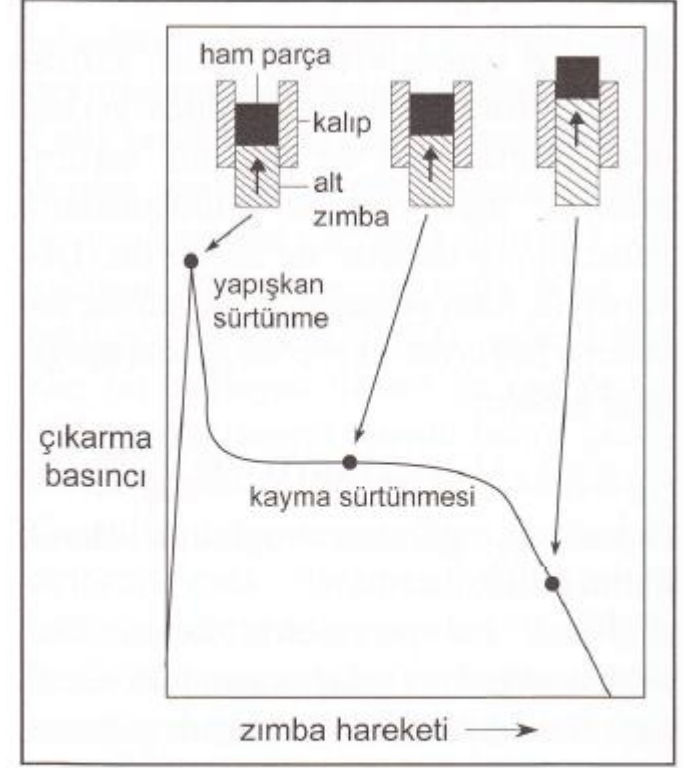
*Şekil 7.22. Yağlayıcının ham yoğunluğa etkileri. Düşük basınçlarda artan yağlama ile yoğunluk artar, fakat yüksek basınçlarda ters etki görülür. Bu veriler oksitten indirgenmiş demir tozunun ağırlık olarak %0,5; 1,0 ve 1,5 çinko stearat ile yağlanmasına aittir.*



# Tozun Sıkıştırılması

## Yağlama

Preseleme ve kalıptan çıkartma sırasında kalıp duvarları ile toz arasında oluşan sürtünme, yoğunluk farklılıkları ve kalıp aşınmasına sebep olur. Sıkıştırma basıncı arttıkça parçanın kalıptan çıkması çıkartılması güçleşir ve kalıp aşınmasını azaltmak için yağlayıcılar gereklidir. Polimer yağlayıcılar parçacık yapılıdır ve sıkıştırmadan önce tozla karıştırılır. Bir başka yöntem ise sıkıştırma çevrimleri arasında kalıbın yağlanmasıdır. Püskürtme üniteleri, yağlayıcı parçacıklarının kalıp duvarlarına yapışmaları için statik yükler. Bununla beraber; takımların yağlanmasının toz dolumundan önce yapılması gerektiğinden, kalıp duvarlarının yağlanması sıkıştırma çevrimini yavaşlatır. Pratikte, özellikle düşük miktarlarda kullanıldığı zaman, yüksek vizkositeli yağlayıcılar tercih edilir. Fazla yağlayıcı miktarı yüksek çıkartma basıncını azaltır. Kalıpların güçlü ve sert, fakat preslenmiş parçanın zayıf olmasından dolayı çıkartma sırasında parçada çatlaklar oluşabilir.

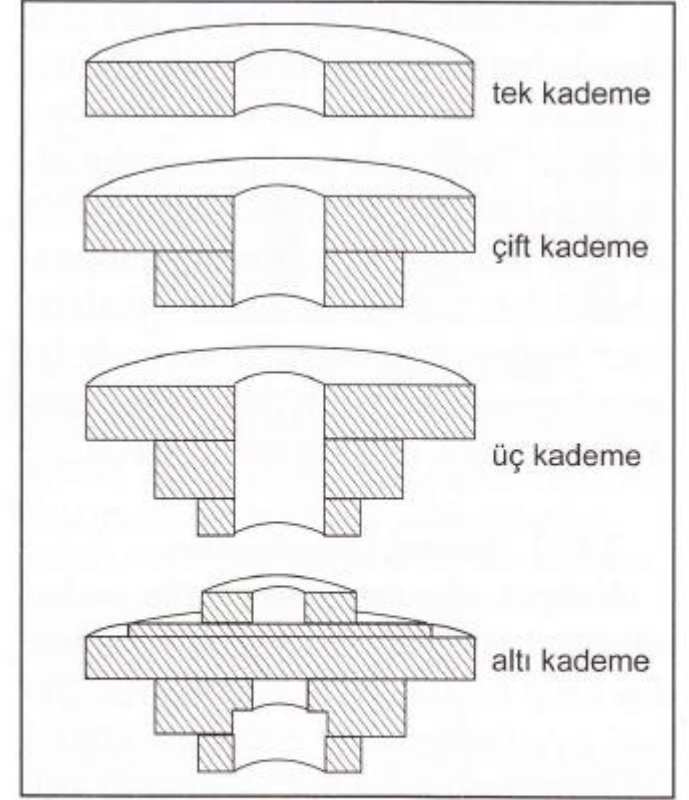


*Şekil 7.23. Alt zimba hareketine göre çıkartma basıncının değişimi. Çıkartma hareketini başlatmak için yüksek bir basınç gerekli olup, hareketin devamı için daha az kayma basıncına ihtiyaç duyulur.*

# Tozun Sıkıştırılması

## Basınç Uygulaması

Kalıpta sıkıştırmaların çoğu mekanik preslerde yapılır. Besleme pabucu dışı kalıp boşluğuna tozu doldurur. Basınç uygulamasından önce toz kütlesi kalıp merkezine taşınır. Aynı anda pek çok olayın oluşması nedeniyle, boşluğa doldurulan toz kütlesinden küçük değişimler meydana gelir. Buna bağlı olarak, sinterleme sonrasında parçaların boyutları bunun 1/3 'ü kadar değişir. Çok kademeli parçalarda yoğunlaşma homojenliği problem yaratmaktadır. Bunu önlemenin yolu kalıbı fazla doldurmak ve sıkıştırmadan önce fazla tozu atmaktır veya toz besleme pabucu kalıbın üstündeyken alt zımba geri çekilerek tozu kalıbın içine çekmektir. Doldurma yapıldıktan sonra, toz kütlesi sıkıştırma pozisyonuna taşınır ve üst zımbanın kalıba ilerlemesi sağlanır.



*Şekil 7.24. Sıkıştırılmış parçalardaki yatay çizgiler kademe kavramı hakkında bilgi vermektedir. Bu dört çizim artan karmaşıklık göstermektedir.*

# Tozun Sıkıştırılması

Özellikle parçanın boyut ile çap oranı arttıkça, tek taraftan uygulanan basınç yoğunluk ve özelliklerde büyük gradyanlar meydana getirir. Çift taraftan basınç uygulanmasıyla toza daha homojen gerilme uygulanır ve böylece daha homojen ürün elde edilir.

Hidrolik preslerde basma hızı genellikle yavaştır fakat yoğunluk daha homojendir ve toz doldurma miktarındaki değişimler parça boyunda küçük değişimlere sebep olur.

Basma zorluğunu belirlemenin yollarından biri parçanın sahip olduğu kademe sayısını bilmektir. Kademe sayısı arttıkça kalıbın karmaşıklığı hızla artar.

# Tozun Sıkıştırılması

## Kalıp

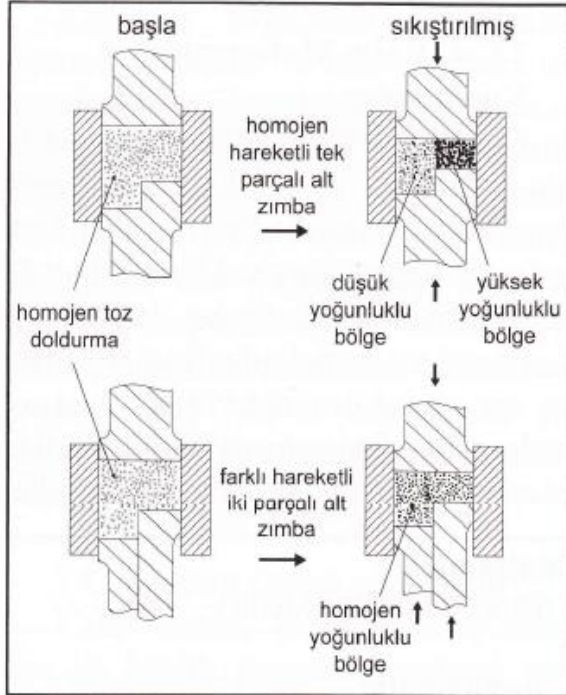
Sıkıştırma presleri, uygun şekil ve yoğunlukta hatasız parça sağlamak için kalıp hareketlerini koordine eder. Parça karmaşıklığı arttıkça, kalıp karmaşıklığı daha da artar.

Kalıp tasarımında dikkate alınması gereken husus, oluşturulacak ham parçaya göre toz doldurma yüksekliğidir. Küçük tonajlı presler ancak küçük doldurma yükseklikleri kabul edecekleri için, preslenecek parça için kalıp ve pres arasında çok iyi uyum olmalıdır. Az sayıda parça üretileceği zaman takım çeliklerinden, yüksek basınçlar ve yüksek sayıda üretim için sert metalden yapılan kalıplar kullanılır. Parçanın her kademesine aynı basıncı uygulayabilmek için kalıplar parçalı olarak yapılır.

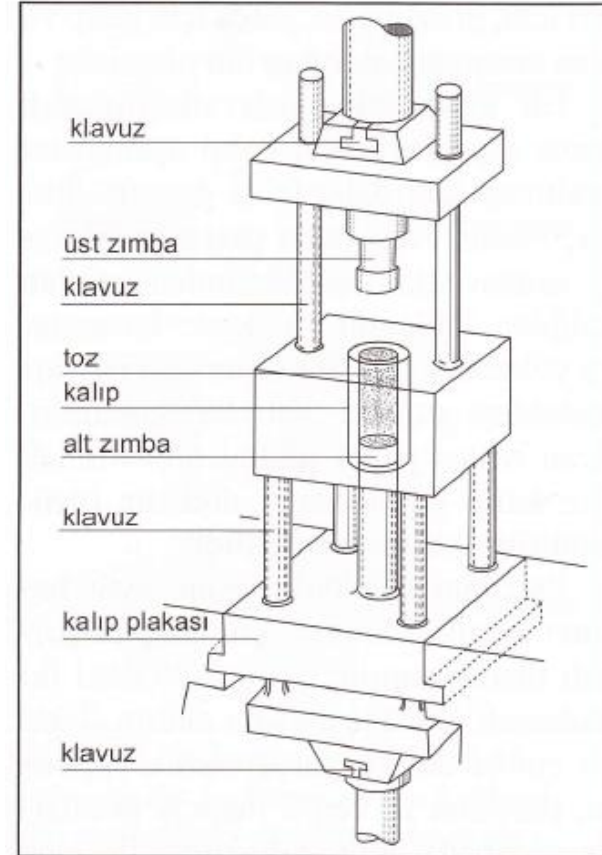
Kalıp setini prese yerleştirebilmek için çeşitli tutucu, adaptör ve bağlantı elemanları kullanılır. Bu kalıp seti parçaları hepsinin de basma ve çıkartma sırasında oluşan yüklere dayanacak şekilde boyutlandırılmaları gerekir. Zımbalar ve dişi kalıbı prese uygun bir şekilde bağlayabilmek için adaptörler gerekebilir.



# Tozun Sıkıştırılması



**Şekil 7.26.** İki kademeli bir parça, tek hareketli ve iki adımlı bir zimba ile homojen ham yoğunluk elde edecek şekilde sıkıştırılmaz (üst şekil). Dolayısıyla, presleme çevrimi sırasında değişik hareketleri verecek parçalı zimba kullanılır. Böylece homojen ham mikroyapı ve boyutlar elde edilir ve kayma çatlakları oluşmaz (alt şekil).



**Şekil 7.27.** Basit silindirik bir parça için kalıp seti. Kalıp setleri genellikle bir paket halinde presin dışında hazırlanır ve bir kaç klavuz vasıtasıyla prese topluca yerleştirilir.

# Tozun Sıkıştırılması

## Kalıp Malzemeleri ve Kaplamalar

Sert metaller, sert tungsten karbür parçacıklarının kobalt alaşım matrisi tarafından bağlanmış kompozit malzemelerdir. Bunlar pahalı ve zor işlenebilen sinterlenmiş malzemeler olup uzun çalışma ömürlüdürler. Maçalar, zımbalar ve bazı dişi kalıplar için takım çelikleri kullanılır. Bunlar daha ucuz, kolay işlenebilen ve dolayısıyla düşük maliyetlidirler. Bazı takım çelikleri toz metalurjisi teknikleriyle üretilir.

Kalıplara uygulanan kaplamalar aşınma direncini artırır. Kaplamalar çeşitli sert fazlar çok ince film tabakası şeklinde uygulanır: Titanyum nitrür (TiN), titanyum karbür (TiC), tungsten disülfür (WS<sub>2</sub>) veya elmas filmler gibi diğer sert fazlardır. İçinde polimer yağlayıcı hapsedilmiş sert elektro kaplamalar çıkartma basıncının azalmasını sağlar.

## Kalıp ömrü ve bakımı

Kalıp hasarı, gerilme hesaplamaları ile büyük geometri seçilerek engellenir. Böylece akma, bükülme, flambaj veya kırılma oluşmaz. Kalıpta kısa zamanda oluşan hasarlar kalıp malzemesinin yetersiz olduğunu gösterir. Uzun ömürlü hasarlar ise genellikle kalıbın talaşlı imalatı hatalarından kaynaklanan yorulma kırılmalarıdır. Bu sebeple keskin köşelerden kaçınılır ve çizikleri gidermek için kalıplar çok iyi parlatılır. Hiç belirgin olmayan iç hatalar bile malzeme yorulması başlatabilir.

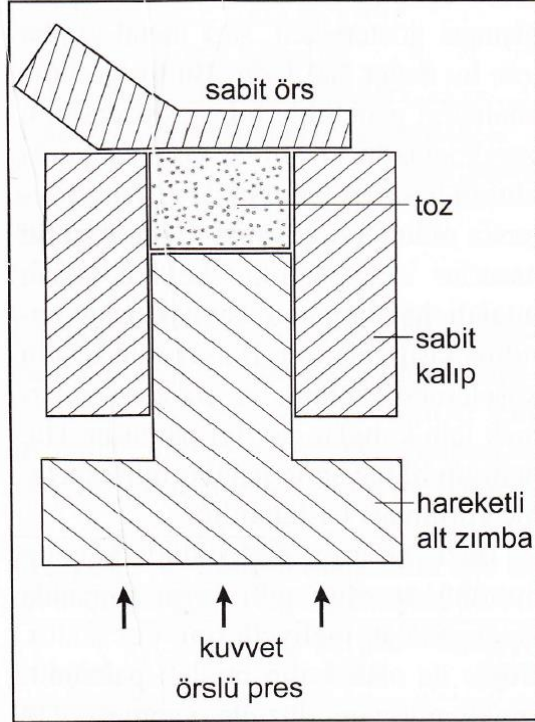
# Tozun Sıkıştırılması

Bazı tasarım değişiklikleri kalıp ömrünü artırdığı gibi, aynı zamanda kalıp imalat maliyetlerini de azaltır. Ama kalıp imalatı normalde pahalıdır, çünkü görevini düzgün yapması için çok hassas toleranslar gereklidir. Kalıp elemanlarının birbiri üzerindeki hareketi sırasında aradaki boşluktan toz girmemesi için parçaların sıkı geçmesi gereklidir. Toz parçacıkları genellikle 20 µm boyutunda olduğu için, kalıp elemanlarının geçme boşlukları da en fazla bu kadar olmalıdır. Kalıp malzemelerine ısıl işlem yapıldığında son parlatma işlemi ısıl işlemden sonra yapılmalıdır.

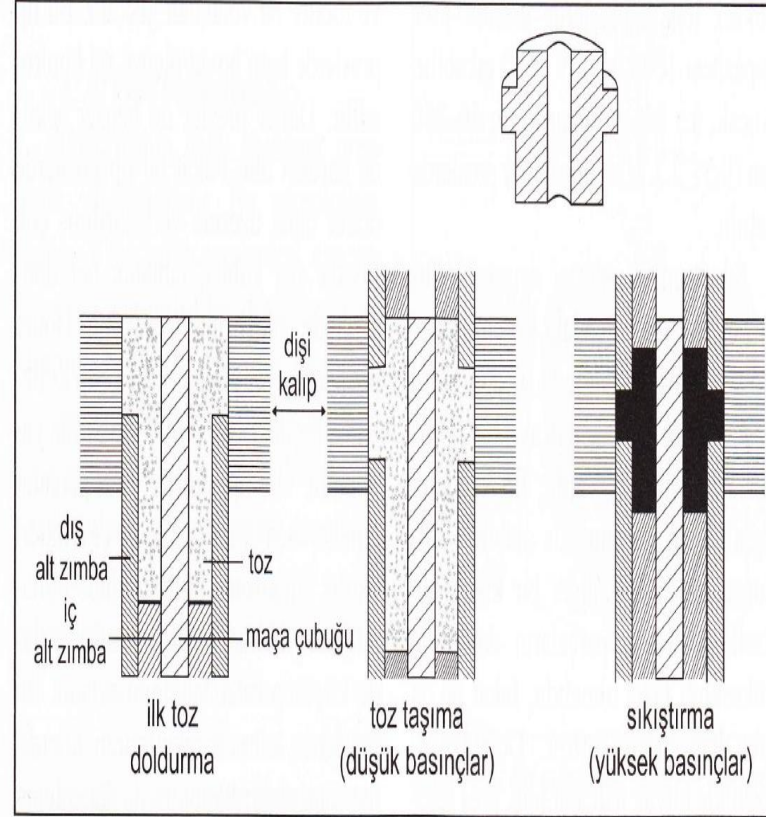
## Presleme Çevrimleri

Presleme çevrimi; tozun kalıp boşluğuna beslenmesi, toza basınç uygulaması ve ham parçanın kalıptan çıkartılması işlemlerinden oluşur. En basit halde tek zimba hareket eder, alt zimba ve diği kalıp sabittir. Düz parçalarda üst zimbanın yerine sabit bir plaka konarak presleme yapılabilir ve buna **örs tipi presleme** denir.

# Tozun Sıkıştırılması



**Şekil 7.29.** Örslü presleme tek hareketli sıkıştırmanın en basit şeklidir. Dişi kalıp boşluğu toz ile doldurulduktan sonra bir örsle kapatılır ve bütün sıkıştırma alt zimba vasıtasıyla yapılır. Bu şekilde kalıpta sıkıştırma basit parçaların çok miktarda üretimi için uygundur.



**Şekil 7.32.** Homojen sıkıştırma için erken dış zimba hareketi ile tozun taşınması sağlanır. Doldurmadan sonra toz yüzeyi düzdür, istenen flanş ise merkezdedir. Yüksek basınçlar ancak toz taşınmasından sonra uygulanır.



# Tozun Sıkıştırılması

## Pres Çeşitleri

Sıkça kullanılan pres ölçüsü tonajdır. Bu sıkıştırılacak parça için hazır olan kuvvettir. Bu kuvvet, zimbaların basma yönüne dik kesit alanı ile sıkıştırma basıncının çarpımıyla hesaplanır. Küçük parçalar düşük tonajlı preslerde, büyük parçalar ise yüksek tonajlı preslerde üretilir. Pres kapasitesi 1000 tona kadar çıkabilir. Ancak, toz sıkıştırmanın çoğu 50-250 ton kapasiteli preslerde yapılır.

Sıkıştırma preslerini ayıran bir diğer özellik ise parçadaki kademe sayısıdır. Basma yönünde %10 değişiklik gösteren her kademe için ayrı bir zimba hareketine ihtiyaç vardır. Bu kademeler alt veya üst zimbada olabilir. Doldurma yüksekliği ise diğer bir kısıtlayıcı özelliktir. Kalın parçaların doldurma yüksekliği fazla olmalıdır, fakat bu da pres kapasitesini artırır. Dolayısıyla, özellikle büyük parçalar için, pres seçiminde doldurma kapasitesi önemlidir.

Basınç uygulama mekanizmaları prese göre değişmektedir. Toz sıkıştırmada kullanılan presler; hidrolik, mekanik, havalı ve melez sistemlerdir. Hidrolik presler merkezi basınç sisteminden güç alır ve servo vanalar kanalı ile çeşitli basma takımlarına oransal hidrolik basınç uygular. Bu tip preslerde basınç iyi kontrol edilir ve kontrollü yoğunluk gerektiren işlemlerde çok uygundur. Mekanik preslerde elektrik motoru ile döndürülen bir volan vardır. Pres hareketlerini veren bütün kam ve iticiler bu volandan güç alır. Bu tip preslerde ham boyut ölçüsü iyi kontrol edilir. Döner presler de benzer şekilde hareket alır. Fakat bu tip preslerde döner tabla üzerine yerleştirilmiş çok sayıda dişi kalıba,

# Tozun Sıkıştırılması

tablanın her dönmesinde sıkıştırma uygulanır. Örs tipi presler basit parçalar içindir, ancak hızlı presleme çevrimleri vardır. Elektronik endüstrisinde kullanılanlar gibi küçük parçaların üretiminde küçük presler kullanılmaktadır. Bu preslerde kalıp hareketlerinin koordinasyonu elektrik motoru ile düzenlenir. Melez preslerde, farklı cins preslerin özellikleri aynı anda kullanılmaktadır. Mesela; mekanik pres esaslı bir melez preste, aşırı basınç seviyesinin kontrol altına alınması için zımbalara havalı basınç yastıkları uygulanabilir.

Diğer pres tasarımları, homojen parça üretmek için bilgisayarlı geri besleme sistemlerine dayanır. Bilgisayarla sayısal kontrollü (CNC) sıkıştırma presleri çok karmaşık preslerdir. Bu tip preslerde uygun kalıp tasarımı ve çalışma parametrelerinin belirlenmesi bilgisayarla benzeşimlerle yapılır. Bunlar çok karmaşık şekillerin üretiminde kullanılır.

## Algılayıcılar ve kontroller

Preslerin çoğu açık devre kontrol sistemi ile çalışır. Üretimin başlamasıyla birlikte kalıp elemanlarının yerleşimleri ayarlanır, fakat gerçek hareketler yakından gözlenmez. Ham parçalar ağırlık ve boyut için rasgele seçilerek kontrol edilir, fakat belirlenmiş kalıp hareketleri, basınçlar, doldurmalar ve diğer özellikler her bir çevrimde ölçülmez.

Gelişmiş preslerde istikrarlı üretimi takip için; kuvvet, mesafe, gerinme ve pozisyon algılayıcıları vardır. Bu kontrol seviyesi, anında kendi kendine kontrol ve düzeltme yapmaya doğru kaymaktadır. Kalıpta sıkıştırmanın bilgisayar kontrollü olmasının iki sebebi vardır:

# Tozun Sıkıştırılması

Birincisi, ayar parametreleri ve üretim verileri dahil, çalışma verilerini kayıt etmektir. Böylece, bilgisayarla kontrol edilen elektrik motorları sayesinde, kalıbın başka bir zaman tekrar üretime alınmasında aynı şartlar sağlanır. İkinci sebep ise zaman içinde üretimde meydana gelen yönelmeleri takip etmektir. Üretim partileri arasındaki farklılık ve parçadan parçaya olan değişiklikler çok önemlidir. Parçanın taşınması veya kontrol için preslere robotlar ilave edilebilir. Bunların zaman içinde mantık ve kontrol sistemine bağlanmaları gerekir.

Gözleme genellikle presleme yönünde kuvvet ölçümleri ile yapılır. Kalıpta bir hasar oluşacağı zaman bu sistemler presin çalışmasını durdurabilir. Mesela; eğer tozun dolum miktarı değişirse, kalıba giren fazla tozdan dolayı zımba deforme olabilir. Üründeki kalite değişimlerini yakalamak için preslerde üç izleyici kullanılır. Bunlar ağırlık, basınç ve boyutlardaki değişimdir.

## Hata Tespiti ve Kontrol

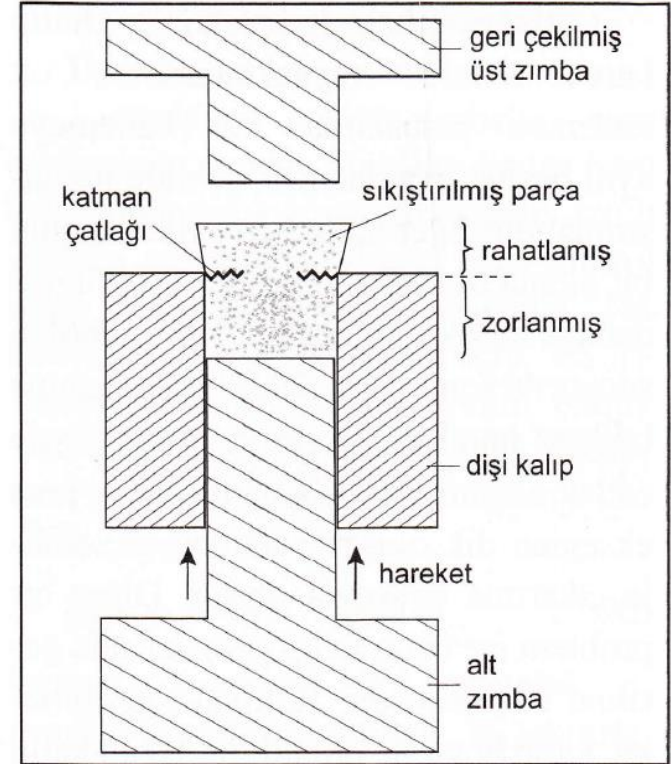
Ham çatlaklar genel olarak üç sebepten kaynaklanır:

1. Genellikle aşınmadan kaynaklanan kalıp yüzey bozuklukları
2. Uygun olmayan kalıp hareketleri
3. Çıkartma sırasında oluşan çekme gerilmeleri.

# Tozun Sıkıştırılması

Sıkıştırılmış parça ile kalıp arasında çıkartma sırasında ciddi miktarda sürtünme oluşur. Ham parçanın mukavemeti düşük, buna karşın çıkartma gerilmeleri ise yüksektir.

Çatlağın sebebi kalıp değilse, kalıp hareketlerinden kaynaklanabilir. Çok kademeli parçalarda, her kademeye aynı basınç uygulanacak şekilde toz taşınmalıdır. Eğer kalıp hareketleri uygun bir sırada olmazsa, parçanın bir bölgesi daha önce sıkıştırılacaktır. Komşu bölge sıkıştırılırken, daha önce yoğunlaşmış bölgeyi hareketle geçer ve ara yüzeyde çatlak oluşur. Bunun karşıtı olarak, pres eksenine dik oluşan çatlaklar genellikle çıkartma sırasında oluşur. Diğer bir problemse uzun kalıp parçalarında gerilme boşalmasıdır. Kalıptaki gerilmeler, kalıp boyu ile orantılıdır. Uzun kalıp elemanlarında, kısa kalıp elemanlarına göre daha fazla gerilme boşalması olur ve bu da sıkıştırma çevriminin sonunda gerilme gradyanının kaynağı olabilir.



**Şekil 7.35.** Geri yaylanma parçanın çıkarılma sırasındaki elastik rahatlamasıdır. Ham mukavemetin düşük olması veya geri yaylanmanın büyük olması durumunda, zorlanmış bölge ile rahatlamış bölge arasındaki fark çatlak oluşumuna sebep olabilir.



# Tozun Sıkıştırılması

## Yüksek Basıncılı Sıkıştırma

Bazı malzemelerde, tam yoğunlukta ham parça oluşturmak için yüksek sıkıştırma basınçları kullanılır. Eğer basınç aynı zamanda hızla uygulanırsa faydalı olur. Basınçlar 1GPa'lı aşar ve bazı durumlarda 3 GPa'la kadar çıkar. Bu basınçlara dayanabilecek özel kalıplar gereklidir. Çok fazla hacim kapladığından dolayı yağlayıcı toz ile karıştırılarak kullanılmaz, sadece kalıp duvarları yağlanır. Parça içinde kirlilik olmaması için tozun temiz olması gerekir. Yüksek enerji ve basınçlarla teorik yoğunluklara ulaşmak mümkündür.

Bu tip sıkıştırmalarda, kalıp parçalarının eğilmemesi için boyları kısa tutulur. İşlenmesi zor olmasına rağmen, sadece sert metaller bu basınçları taşıyabileceklerinden kalıp malzemesi olarak kullanılır.

## Ilık Sıkıştırma

Ham yoğunluğun artırılmasında kullanılan diğer bir yöntem, ılık sıkıştırma adı verilen, tozun ve kalıbın sıkıştırma işleminden önce ısıtılmasıdır. Ilık sıkıştırma tekniği, ısıyla polimerlerin parçacıkları birbirlerine yapıştırması esasına dayanır. Tozun ve sıcak yapıştırıcının biraz yumuşaması yoğunluk kazanılmasına ve ham mukavemetin artmasına sebep olur. Uygulamada, tipik toz ve kalıp sıcaklığı 150° C ve sıkıştırma basıncı 700 Mpa civarındadır.

# Tozun Sıkıştırılması

Toz ve pres işlemi için mikrodalgada ve yağlı sinterler kullanılır. Polimerin çok sinterlenmesi, ürünün homojenliğine etki edeceği için sıcaklığın sıkı kontrolü gereklidir. Ilık sıkıştırılmış parça oda sıcaklığına soğuduğu zaman, polimerin sertleşmesinden dolayı mukavemet kazanır. Fakat çatlak oluşumunu engellemek için ham parçanın kalıptan çıkartılması sırasında üstten baskı uygulamak gereklidir. Ilık sıkıştırma ile kazanılan yoğunluk artışı, sinterlenmiş özelliklerde iyileştirmeye yol açar. Aynı yoğunluğa alışılmış teknikle sıkıştırma yapıldığında, sinterlenmiş özellikler genellikle birbirine çok yakındır.

## Tekrarlanan Basınç Uygulamaları

Tekrarlanan basınç darbeleri ham yoğunluğu artırır. Tek darbeli bir sıkıştırmada enerji ve üst basınç birbirleriyle çok yakın olarak ilişkilidir. Aslında tekrarlanan basınç çevrimleriyle özellik toplam enerji girdisine doğru yönelir.

Yoğunluk hiçbir zaman %100'ü aşamayacağı için, sıkıştırma ile ulaşılabilecek yoğunluğun bir sınırı vardır. Sıkıştırma enerjisi, basınç-yer değiştirme eğrisinden hesaplanır, yüzey alanına uygulanan gerilmenin ilk ölçüye göre boy değişimi ile çarpımı birim hacimdeki enerjiyi verir.

# Tozun Sıkıştırılması

## Soğuk İzostatik Sıkıştırma

Soğuk izostatik presleme (CIP), kademeli ve karmaşık şekilli parçalar veya boy-çap oranının büyük olduğu parçalar için tercih edilir. CIP işleminde, toz esnek bir kalıp içinde sızdırmaz hale getirilir. Bu toz-kalıp birleşimi yağ veya su gibi bir sıvının olduğu kabın içinde sıkıştırılır. Genellikle yağlayıcılar kullanılmaz. Bununla beraber, sert metallerin ham yoğunluğunu artırmak için bazı parafinler ilave edilebilir. 1400MPa'ya kadar sıkıştırma basınçları mümkün olmasına rağmen, CIP genellikle 420MPa altındaki basınçlarda yapılır.

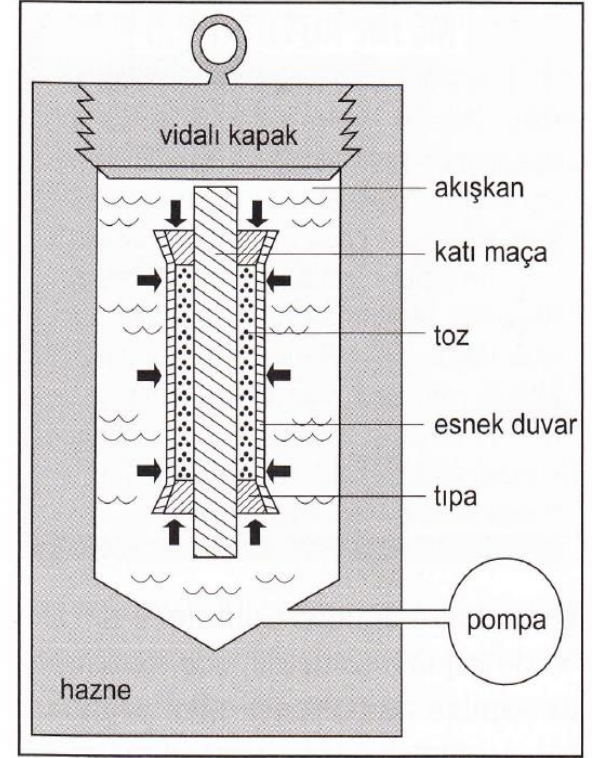
Esnek kalıp; lastik, lateks, poliüretan veya polisilikondan (oda sıcaklığında vulkanize olmuş) yapılır. Bunların seçilmesinin sebebi; bir kalıpta daldırmayla veya dökümle kolaylıkla üretilebilmeleridir. Eğer kalıp yumuşak ise, sıkıştırma sırasında parçacıklar arasındaki gözeneklere girme riski vardır. Dolayısıyla, sert ve dayanıklı polimerlerin kullanılması yaygındır. Lastik kalıplar karmaşık şekilli olabilir, fakat toz yoğunlaşmasını karşılayacak şekilde büyük olmalıdır. Genellikle tozun dolumu sırasında kalıbın şeklini kaybetmesini önleyebilmek için kalıp dışarıdan desteklenir. Bazı durumlarda ise sıkıştırmadan önce kalıbın içindeki hava boşaltılır.

Soğuk izostatik preslemenin iki tipi ıslak ve kuru kalıplama tekniğidir. Kuru kalıplama yöntemi seri üretimlerde kullanılır. Esnek kalıp basınç haznesi içine monte edilmiştir. Esnek kalıp şekil değiştirir fakat hazneden dışarı çıkarılmaz. İki uçtaki tapalar vasıtasıyla toz doldurulur ve parça esnek kalıptan çıkartılır.

# Tozun Sıkıştırılması

Islak kalıplama yöntemi ise sağdaki şekildeki gibi gerçekleşmektedir.

İzostatik presleme; büyük, uzun, ince veya kalıpta sıkıştırma yöntemiyle homojen olarak yapılamayacak parçaların üretiminde kullanılır. İzostatik presleme, kalıp yüzeyi sürtünmesi olmadığı için kalıpta sıkıştırma yöntemine göre biraz daha fazla yoğunluk verir. İzostatik preslenmiş parçalarda yoğunluk gradyanları daha küçük olduğu için büyük sinterleme daralmaları sırasında çarpılma olmaz. Bundan dolayı; sert metaller, kalıp çelikleri, paslanmaz çelikler ve birçok seramikler büyük parçaların şekillendirilmesinde kullanılır.



**Şekil 7.38.** Soğuk izostatik sıkıştırma, harici bir pompa ile basınç uygulanan bir haznede yapılır. Toz; esnek bir torba, boru veya şekil değiştirebilen kap içine konur ve bu kap uygulanan basıncı toza iletir. Basınç her taraftan uygulandığından işlem bir hidrostatik sıkıştırma değildir.



# Tozun Sıkıştırılması

## Bilgisayarla Benzeşim

Hedef; sıkıştırma çevriminde, kalıp tasarımında, kalıp hareketlerinde ve tozda oluşabilecek problemleri belirlemek için olayları benzeştirerek hataların üretimden önce önüne geçilmesidir. En çok gayret, kalıp ve tozu küçük hesaplama hücrelerine bölen sonlu eleman modellerine harcanmaktadır. Bu bölünmüş ağ geometri sıkıştırma için planlandığı şekilde yüklenir. Her bir hücre, komşu hücreden gelen kuvvetle sıkıştırılır ve şekil değiştirir. Her bir hücrede ne olacağının hesaplanması, sıkıştırma süresince parçadaki olayları belirler. Böylece konuma göre yoğunluğun ne olacağı önceden tahmin edilir. Buradaki düşünce, kalıp ve presleme çevrimini doğru olarak en az deneme ve hata ile gerçekleştirebilmektir. Bu modellerde tozun gerilmeye karşı olan davranışının bilinmesi gerekir.

Bu modeller sıkıştırma çevrimini benzeştirerek gerilme, yoğunluk, kalıp gerilmesi ve şekil değiştirmesi ve hatta çatlak oluşumunu grafik olarak verir. Bu şekilde muhtelif çözümler geliştirilerek, kalıbın imalinden önce değişik kalıp tasarımları ile sıkıştırma işleminin iyileştirilmesi sağlanır. Benzeşim sırasında muhtemel problemlerin tespiti ile, problemlerin oluşumunu engelleyecek değişik çözümler ortaya konur.

# Tozun Sıkıştırılması

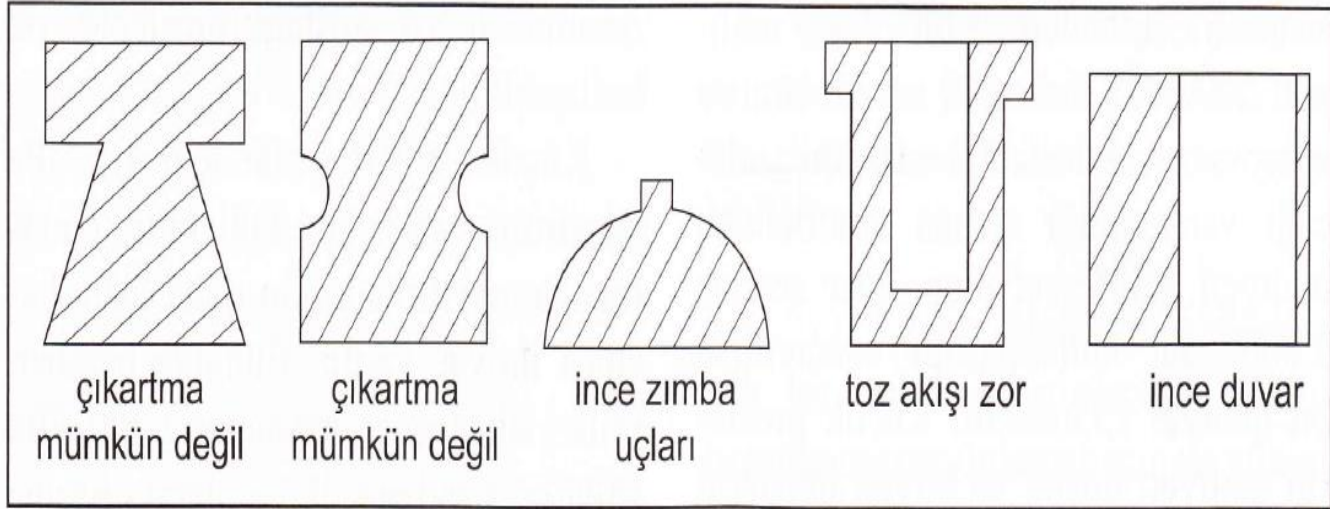
## Sıkıştırma için Tasarım

Kalıpta sıkıştırma için parça ve kalıp tasarımları tecrübe ve beceri gerektirmektedir. Toz özellikleri, parçadan beklenen özellikler ve sıkıştırılmış parçanın boyut toleransları bilinmelidir. Kalıp uzun ömürlü olacak ve en az aşınacak şekilde tasarlanır. Parça için şartnamede belirtilen toleranslar sinterlenmiş boyutu temsil ettiğinden, ham parçanın boyutları sinterleme sırasındaki ölçü değişimlerine müsaade edecek şekilde hassas olmalıdır. Tipik sinterleme toleransları  $\pm\%0,2$  ile  $\pm\% 0,5$  arasındadır ve bazı durumlarda daha dar olabilir.

Bazı şekil ve özelliklerin kalıpta sıkıştırılması zordur. Mesela, keskin kenarlı ve ince kesitli zımbalar flambaj ve eğilmeden dolayı hasar görürler. Benzer şekilde basma eksenine dik olan girintiler, delikler ve kanallar çıkartmayı engellerler. Bu geometriler parçaya sıkıştırma veya sinterleme sonrasında talaşlı imalatla verilir. Parça şekli dairesel, düz, konik ve kısa olursa boyut kontrolü daha kolay olur. Bu şekilde kalıp, basma ekseninde mümkün olduğunca basit tutulmaya çalışılır. Fabrikalarda, daha çok küçük presler ve birkaç büyük pres olduğundan, sıkıştırma işlemi  $65 \text{ cm}^2$  altında basma yönünde izdüşüm alanı olan küçük parçalara uygulanır. Çok kalın ve çok ince kesitlerin problem olmasından dolayı genellikle kesit kalınlığı 0,6 ile 60 mm arasındadır.

# Tozun Sıkıştırılması

Düz zimbalar veya parça kalınlığının %10-15'inden küçük kademesi olan zimbalar tercih edilir. Parçadaki geometri değişimleri birbirine çok yakın olmamalıdır. Bundan dolayı iki delik arasında veya delikle kenar arasında küçük boşluktan kaçınılmalıdır.



*Şekil 7.40. Şekillendirilmesi zor veya kullanılan kalıpları kırılabilir bazı parçaları kalıpta sıkıştırmaktan kaçınmak gereklidir. Bazı ortak problemler şekilde gösterilmiştir.*

A scanning electron microscope (SEM) image showing a dense field of spherical particles of various sizes, representing the sintering process. The particles are interconnected, with some showing signs of coalescence and necking. The background is dark, and the particles are rendered in shades of gray, highlighting their three-dimensional structure and surface texture.

# Sinterleme Kavramları

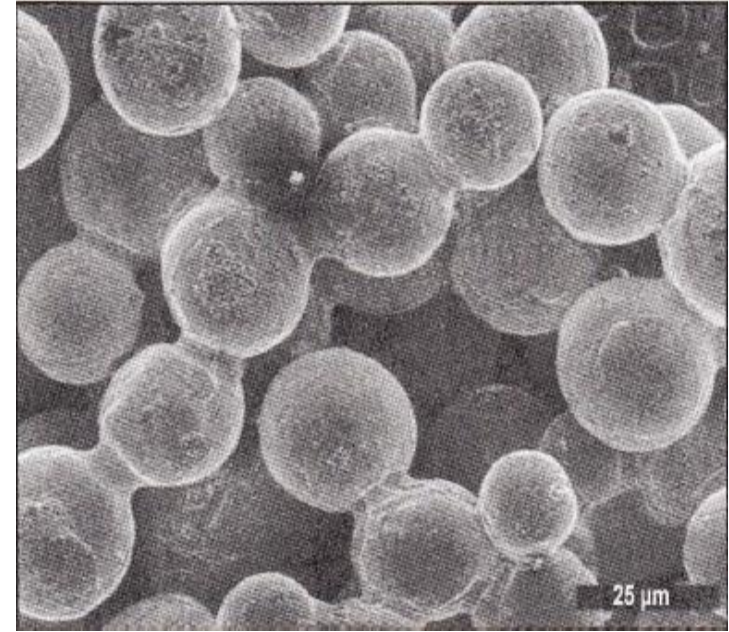


Sinterleme parçacıkların birbirine bağlanmasını önemli ölçüde mukavemet artışına ve özelliklerin iyileşmesine sebep olan ısıtma işlemidir. Bu bölümde, sinterlemeyi açıklayan atomik düzeydeki önemli olaylar üzerinde durulmuştur. Bunun yanında, sinterleme sırasında tane ve gözenek yapısındaki değişimlerin yoğunlaşma ve özelliklerin gelişimini nasıl etkilediğini göstermek için mikroyapının değişimi açıklanmıştır. Sıvı fazlı sinterleme ve hızlandırılmış sinterleme teknikleri de dahil olmak üzere, değişik sinterleme işlemlerine de değinilmiştir.

# Sinterleme Kavramları

## Sinterleme Esasları

Sinterleme, birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda birbirine bağlanmasını sağlar. Bu bağlanma, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleriyle oluşabilir. Fakat pek çok durumda, sıvı faz oluşumu ile birlikte gerçekleşir. Mikroyapı ölçeğinde, bağlanma temas eden parçacıklar arasında boyunlaşma ile kendini gösterir. Şekil 8.1'de verilen taramalı elektron mikroskobu görüntüsünde küresel parçacıklar arasında katı halde boyun oluşumu görülmektedir. Bu tür boyunlaşma mukavemetin ham mukavemete oranla artmasını ve diğer birçok faydalı özelliğin gelişmesini sağlar.



*Şekil 8.1. Gevşek durumdaki küresel bronz parçacıklarında sinterleme ile boyun oluşumunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.*

# Sinterleme Kavramları

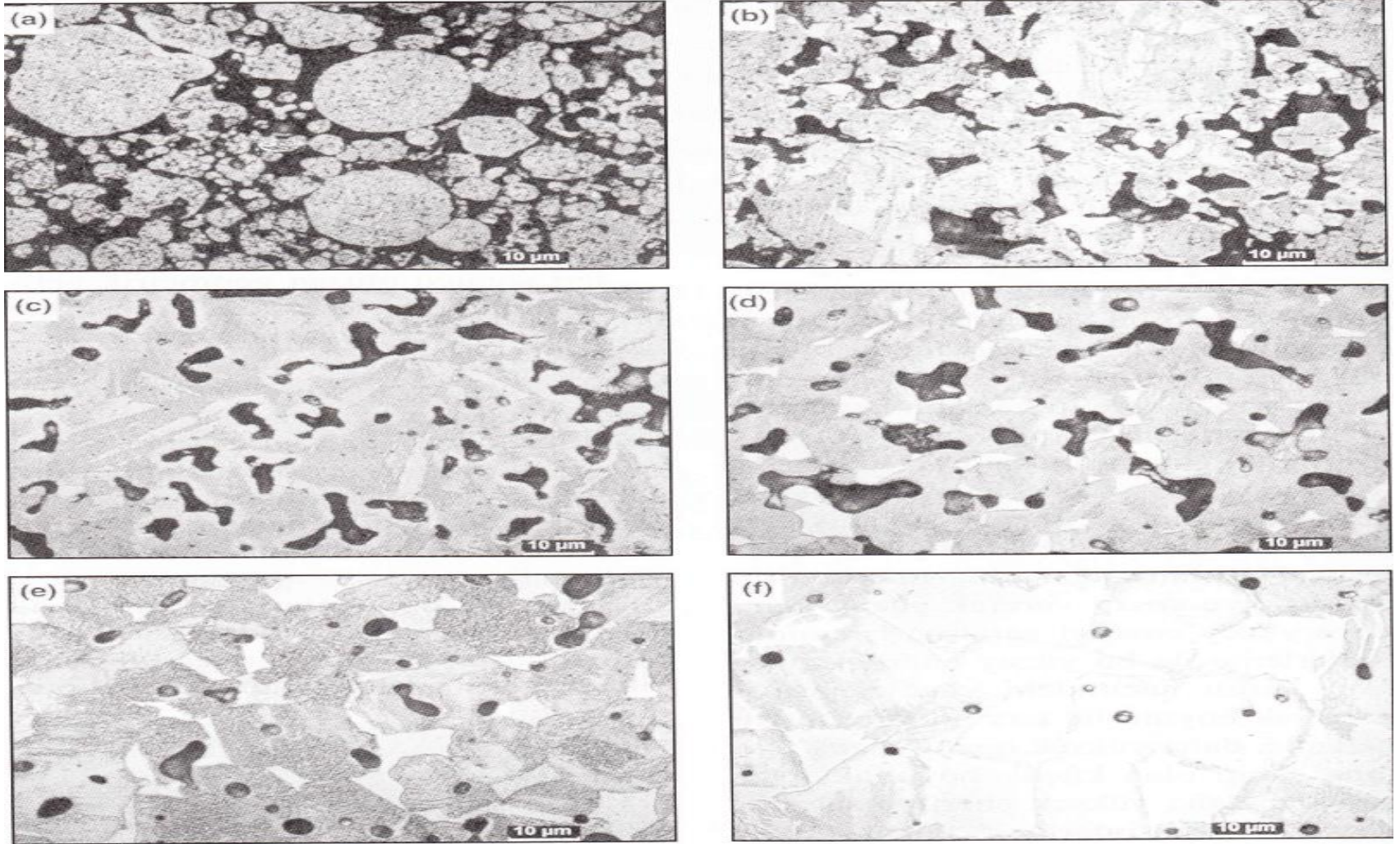
Sinterleme, yüksek sıcaklıkta atomların yayınımlı ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir. Hatırlanacağı gibi, toz üretimi malzemeye enerji vererek yüzey alanı veya yüzey enerjisi yaratma işlemidir. Sinterleme ile bu yüzey enerjisi giderilir. Birim hacimdeki yüzey enerjisi parçacık boyutu ile ters orantılıdır. Bu nedenle, daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olan küçük boyuttaki parçacıklar daha yüksek enerjiye sahiptir ve daha hızlı sinterlenir. Fakat, yüzey enerjisinin tamamı sinterlemeye harcanmaz. Kristal yapıları katılarda, hemen hemen bütün parçacık temas noktaları sınırlarını enerjisine sahip olan tane sınırı oluşturur. Böylece boyun büyümesi yüzey enerjisini azaltırken, tane sınırı enerjisini artırır. Doğal olarak, bu sadece yüzey enerjisindeki azalmanın tane sınırı enerjisindeki artıştan yüksek olması durumunda meydana gelir.

Sinterleme esas olarak itici güçler, mekanizmalar ve aşamalar açısından incelenir:

- Sinterlemenin itici güçleri bağlanmaya neden olan mikroskobik eğrilikleri tanımlar.
  - Sinterleme mekanizmaları itici güçlere tepki olarak oluşan atom hareketlerinin yolunu tanımlar.
  - Sinterleme aşamaları atom hareketleri sonucu oluşan geometrik gelişimi tanımlar.
- Bu aşamalar da diğer taraftan itici güçleri değiştirir.



# Sinterleme Kavramları

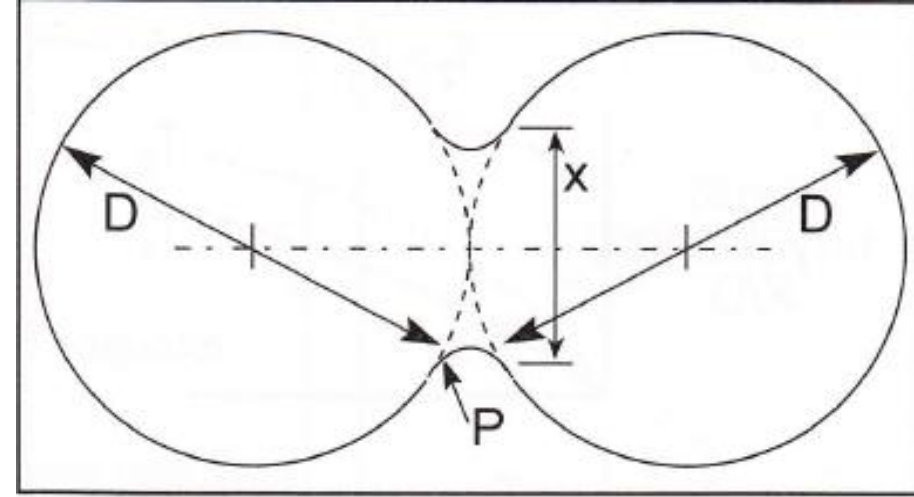


**Şekil 8.2.** Sinterlemede mikroyapı değişimini gösteren fotoğraflar. Bu fotoğraflar 17–4PH paslanmaz çelik tozlarının, 1365 °C'a kadar olan sıcaklıklara ısıtılmasından sonra, farklı sıcaklıklardan hızlı soğutulması ile elde edilmiştir: (a) 1000 °C, (b) 1100 °C, (c) 1200 °C, (d) 1260 °C, (e) 1300 °C ve (f) 1365 °C (mikroyapılar; Yunxin Wu'nun izniyle).



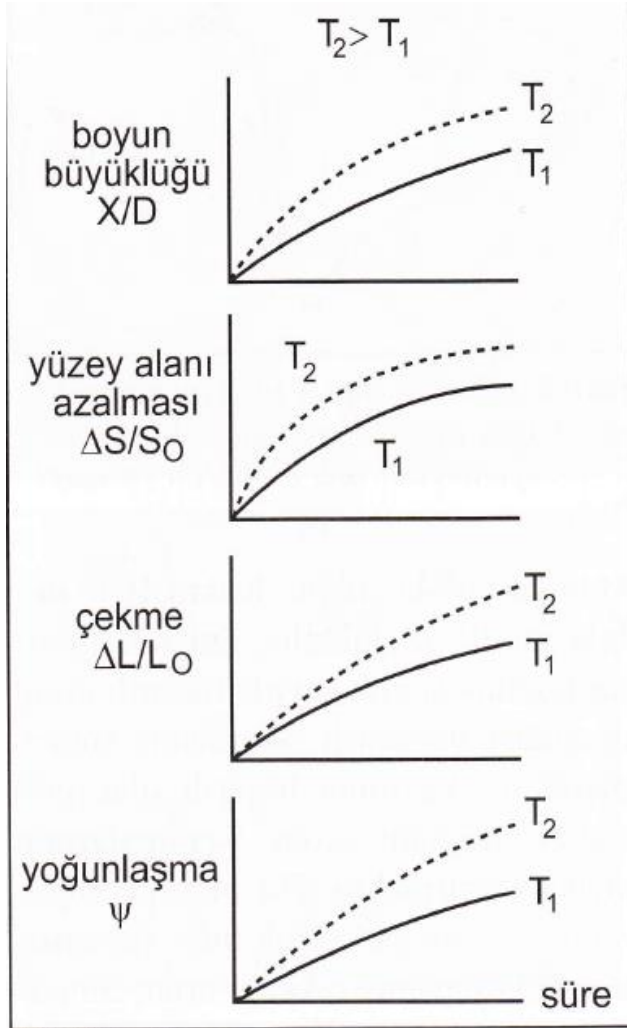
# Sinterleme Kavramları

Sinterleme sırasında atom hareketi görülmez, ancak hacim değişimleri meydana geldiğinden, işlem genelde bu değişimler ile izlenir. Boyun büyümesi bunlardan bir tanesidir. Sinterlemenin temel ölçülerinden biri, Şekil 8.3'te tanımlandığı gibi boyun büyüklük oranıdır,  $X/D$ , boyun çapının parçacık çapına oranıdır. Ayrıca, sinterleme sırasında yüzey alanı hızla azalır (yüzey alanındaki değişimin başlangıç yüzey alanına oranıdır.) boyutsuz parametresiyle izlenir. Yüzey alanı mikroskop analiz, gaz adsorpsiyonu veya gaz geçirgenliği teknikleriyle ölçülür.



*Şekil 8.3. Boyun çapı  $X$  olan iki küresel parçacığın sinterlenme profili. Küre çapı  $D$  ve boyunun dairesel profilinin yarıçapı  $P$ 'dir.*

# Sinterleme Kavramları



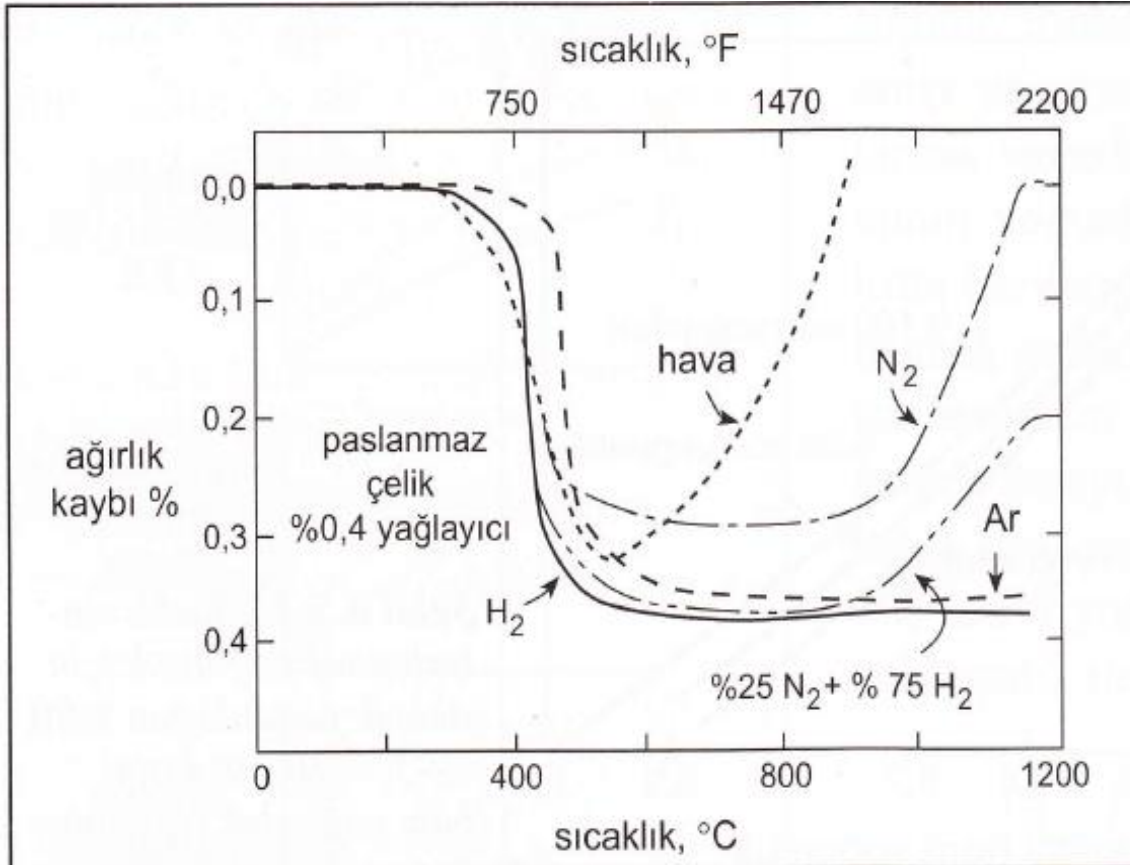
Bunların yanısıra, birçok ham parçada sinterleme sırasında boyut, yoğunluk, mukavemet, sertlik, elektrik ve ısıl iletkenlik, elastik modülü gibi özellik değişimleri olur. Bu nedenle, sinterleme işlemini izlemek için hacim özellikleri kullanılabilir ve Şekil 8.4'te gösterildiği gibi sıcaklık ve zamanla benzer değişimler gösterir.

## POLİMER YAKMA

- ❖ Sinterleme öncesi, bağlayıcı veya yağlayıcı olarak kullanılan polimerler uzaklaştırılmalıdır. Polimer yakma işlemi, ham parçanın polimerin kararlılığını kaybedip buharlaşarak bileşenlerine ayrıştığı sıcaklıklara ısıtılması sırasında gerçekleşir. Isı, polimeri önce ergitir ve daha sonra molekül bağlarını kopararak ham parçadan buharlaşarak ayrılan küçük moleküllerin oluşmasını sağlar.
- ❖ Toz metalurjisinde kullanılan polimerlerin çoğu karbon-karbon, karbon-oksijen ve karbon-hidrojen bağı gibi aynı tür temel bağları içerir. Bu nedenle, polimerlerin çoğu aynı sıcaklık aralığında yanar.

# Sinterleme Kavramları

Buharlaşan moleküller metan  $CH_4$ , karbondioksit  $CO_2$ , karbon monoksit  $CO$ , su  $H_2O$  ve diğer yanma yan ürünlerinin karışımından oluşur. Polimer yanması fırın atmosferine oksijen gibi aktif elementlerin katılmasıyla hızlandırılabilir. Argon gibi nötr atmosferler bütün ayrışma ürünlerinin doğrudan polimerden oluşmasını gerektirir. Oksijen ve hidrojen yetersizliği kurum oluşumuna ve karbon kirlenmesine yol açar.



**Şekil 8.6.** %0,4 bağlayıcı içeren paslanmaz çelik ham parçanın polimer yanması sırasındaki ağırlık kaybı. Yanma işlemi değişik atmosferlerde sabit ısıtma hızında gösterilmiştir. Argon ve hidrojen tam yanma gerçekleştirirken, hava ve azot malzemeye tepkimeye girdiğinden yanma sonrası ağırlık artışı olur.

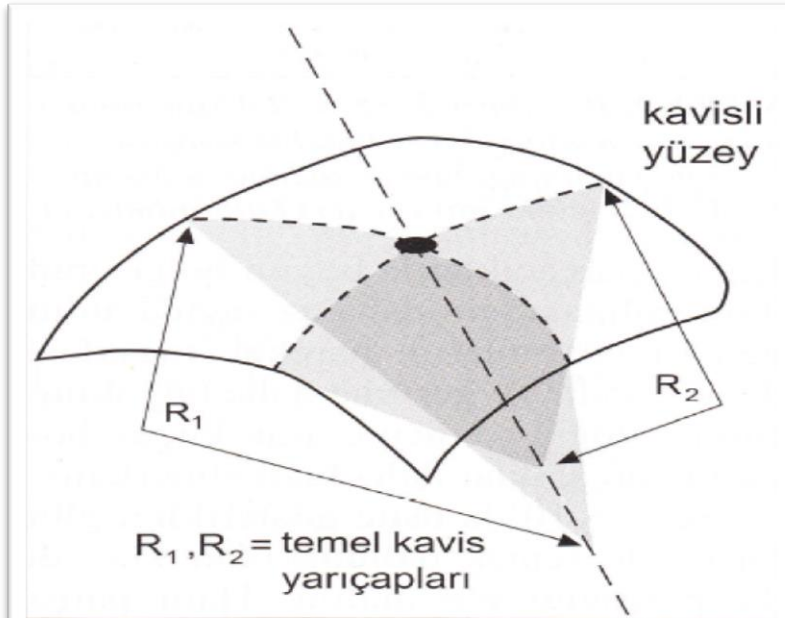


# Sinterleme Kavramları

## KATI HAL SİNERLEME TEORİSİ

### Mekanizmalar ve Aşamalar

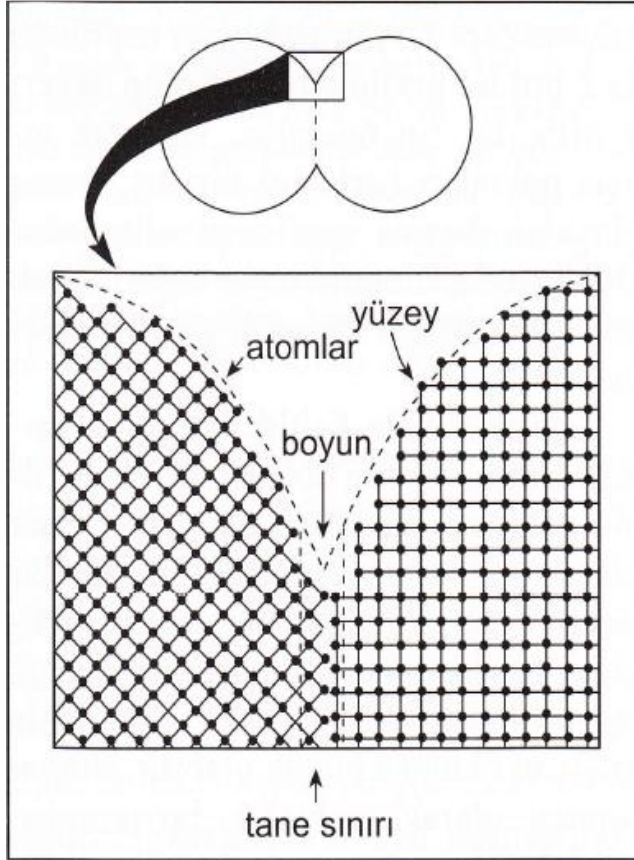
Sinterlemenin itici gücü yüzey enerjisinin azaltılmasıdır. Rasgele atom hareketleri sırasında, atomlar mikroyapıdaki boşlukları doldurur. Kavisli yüzeylerin atom yerleşmeleri üzerine etkisini göstermenin bir yolu gerilmeye bakmaktır.



Şekil 8.7. Kavisli yüzey üzerinde bulunan bir noktadaki kavis iki temel yarıçapla tanımlanır.

Kavisli bir yüzey üzerinde genel bir nokta ve iki yarıçap  $R_1$  ve  $R_2$ , Şekil 8.7'de gösterilmiştir. Yarıçap buhar fazının içinde ise, bu içbükey yüzeye karşılık gelir, kabule göre negatif işaretlidir. ve yüzey basınç altındadır. Diz bir yüzeyde gerilme yoktur. Böylece, sinterleme sırasında iç bükey yüzeyler basma gerilmesi altında, dış bükey yüzeyler ise çekme gerilmesi altındadır.

# Sinterleme Kavramları



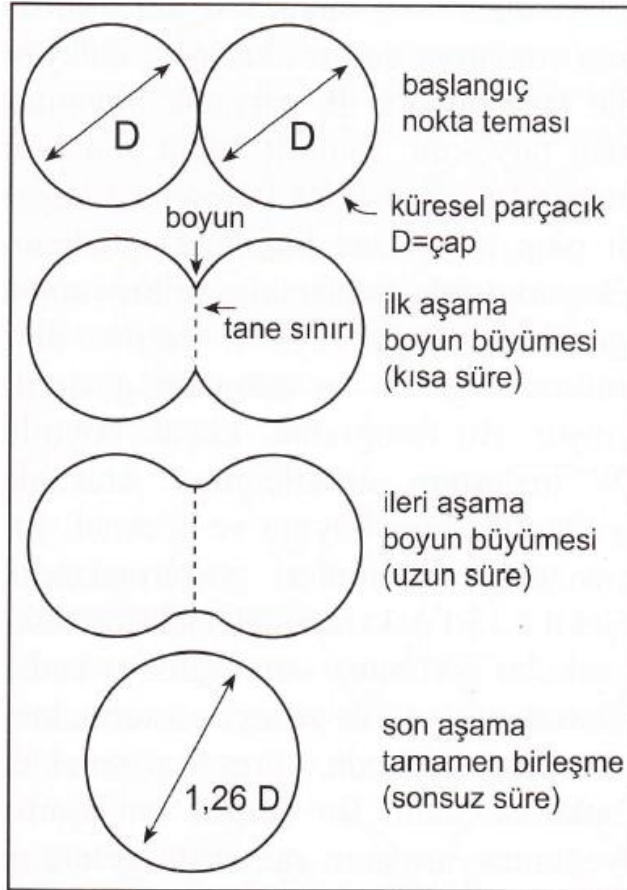
**Şekil 8.8.** Parçacıklar arasındaki sinter bağının atom düzeyinde şematik gösterimi. Atomlar kristal kafesindeki yerlerindedir, ancak bağlanma bölgesindeki kafes uyumsuzluğu tane sınırını oluşturur. Boyun bölgesi atom bağlarının önemli ölçüde kusurlu olduğu, yüzey ve hacim taşınım işlemleri ile büyüyen bölgeyi temsil eder.

❖ Boyun bölgesi atom düzeyinde Şekil 8.8'de gösterilmiştir. Dikkat edilirse, yüzeyin bozulmuş atom bağı ile tanımlandığı ve tane sınırının da kusurlu olduğu görülür. Dolayısıyla, boyun bölgesi önemli ölçüde bozulmuş haldedir. Parçacık yüzeyi boyunca boyun bölgesinden uzaktaki bir mesafede kavis sabittir.

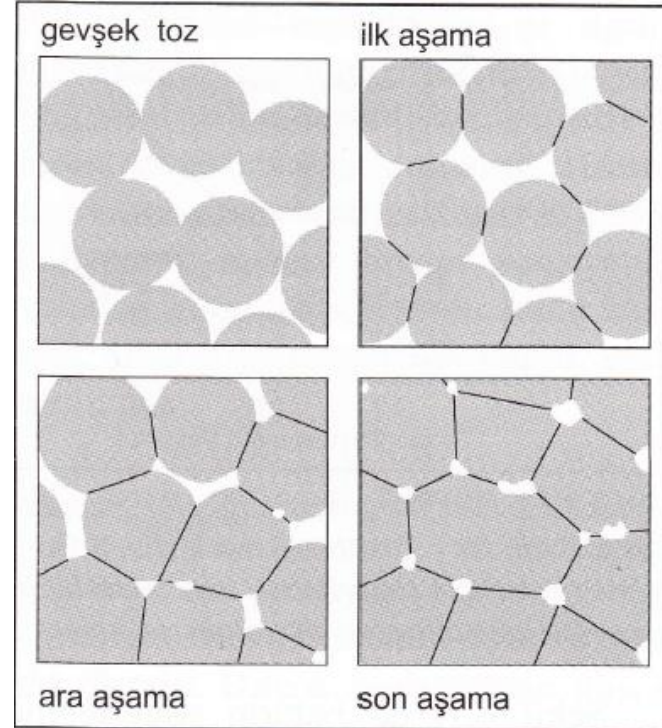
## SİNERLEMENİN AŞAMALARI

Sinterlemenin ilk aşaması, her parçacık üzerinde birkaç noktada boyun büyümesi ile tanımlanır. Fakat, boyunlar birbirinden bağımsız olarak büyür. Bu durum Şekil 8.11'de gösterilmiştir. Sıkıştırma olmadan parçacıklarda temas küçük noktalar ile başlar. Başlangıçta gözenekler düzensiz ve köşeli şekildedir. Boyun zamanla dışbükey bölgedeki atomlar tarafından doldurulan bir içbükeyliği temsil eder. Boyun büyüdükçe kavis azalır ve işlem yavaşlar. Sinterlemenin ara aşamasında gözenekler yuvarlaklaşır, fakat gözenekle etrafındaki kavis kütle transferi için itici güç oluşturmaya devam ederek içbükey bölgeleri doldurur. Sinterlemenin ara aşamasında, boyunlar birbiri ile etkileşecek ve örtüşecek ölçüde büyümüştür. Her ne kadar gözenekler yuvarlaklaşıp düzgün hale gelse de hala dışa açıktırlar. Diğer bir ifade ile, akışkanlar ham parça içine girip çıkabilir. Sinterlemenin ilerlemesiyle taneler büyür ve gözenekler küçülür. Sinterlemenin son aşamasında gözenekler kapalı ve küreseldir. Tam yoğunluğa yaklaşılrken tane sınırı hareketini zorlaştıran gözenek sayısı azaldığından tane büyümesi hızlanır. Gözenekler, sadece önemli oranda bulduklarında tane büyümesine engel oluşturur.

# Sinterleme Kavramları



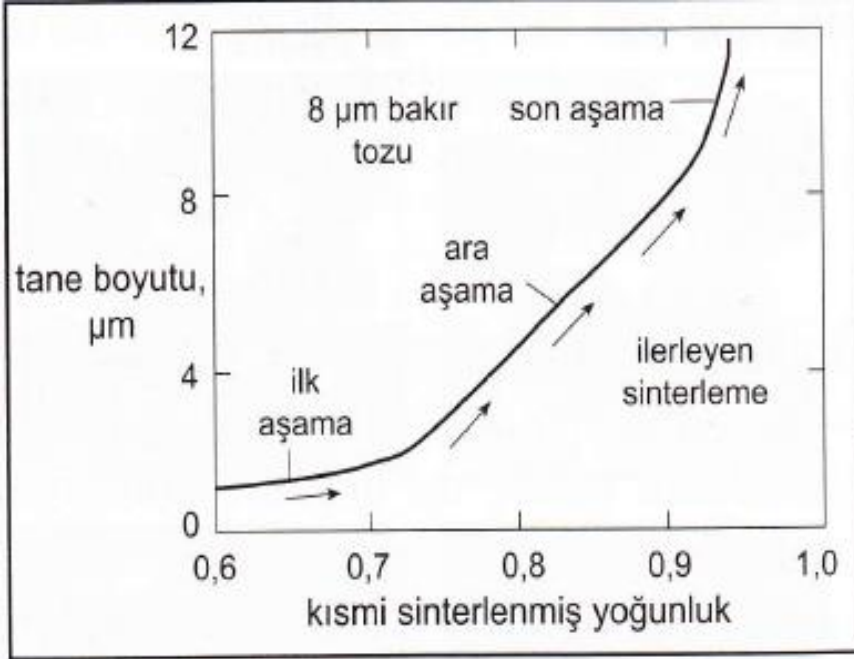
**Şekil 8.10.** Sinterlemede nokta teması ile başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli. Boyun büyümesi parçacıklar arası temas noktasında tane sınırı oluşturur. Eğer süre yeterli ise iki parçacık birleşerek sonunda iri bir parçacık oluşturur.



**Şekil 8.11.** Gevşek toz ile başlayan ve sinterlemenin değişik aşamalarını gösteren kavramsal çizimler. İlk aşamada boyunlar küçüktür ve birbirleri ile etkileşmez, gözenekler köşelidir ve tane boyutu küçüktür. Ara aşamada gözenekler daha düzgün hale gelir ancak açıktır, komşu boyun bölgeleri birbiriyle birleşmemiştir; tane sınırları gözenekler arasında kalmıştır. Son aşamada gözenekler azalmış, izole edilmiş ve dışarıya kapalıdır. Tane boyutu artmıştır.



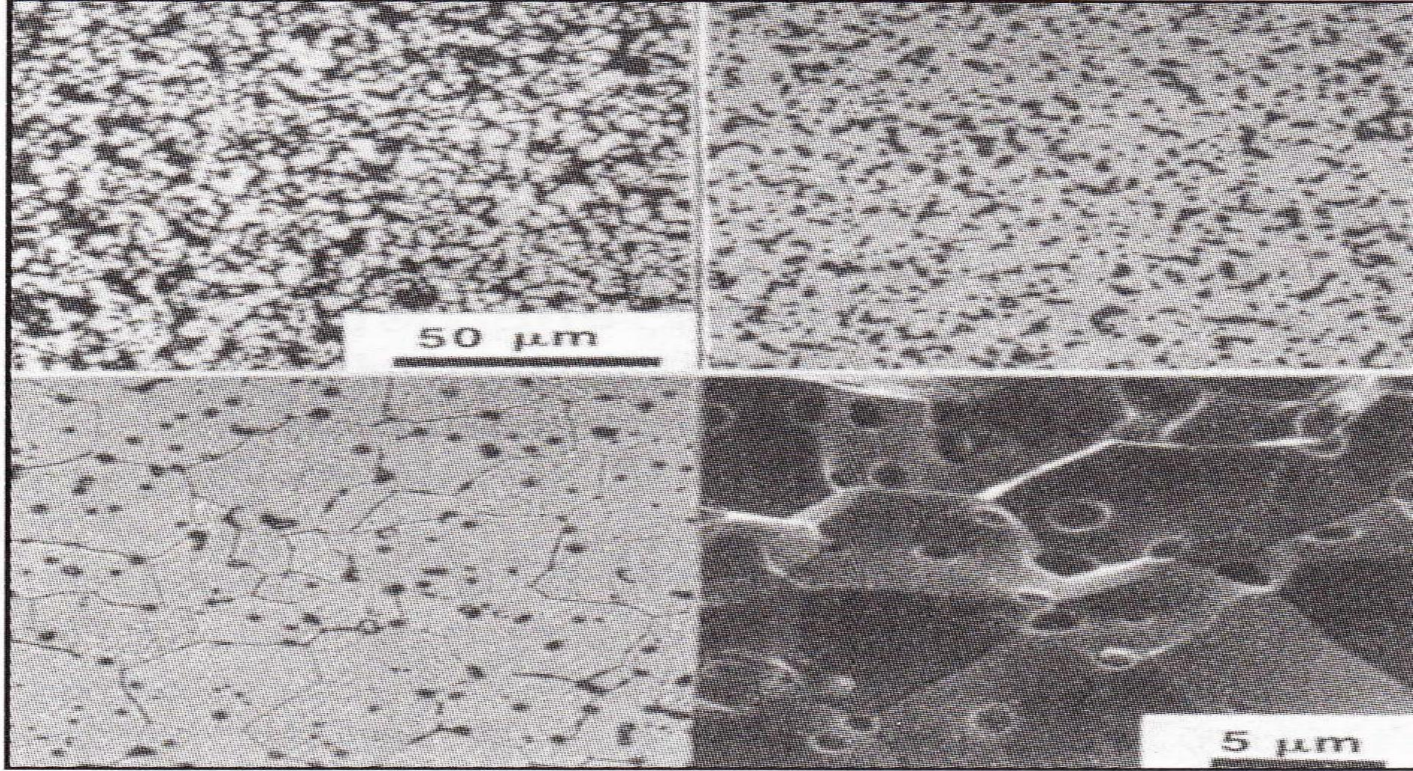
# Sinterleme Kavramları



Şekil 8.12'de bakırın sinterlenme yoğunluğuna bağlı olarak tane boyutunun değişimi verilmiştir. Aynı şekilde, gözenek içinde gazın olduğu durumlarda, gözeneklerin küçülmesi durur ve irileşmeye başlar. Bu enteresan durumda; yoğunluk azalır, ortalama gözenek boyutu artar, gözenek sayısı azalır, gözenek izolasyonu oluşur ve sinterlenme yavaşlar. Son aşamada, küresel gözenekler etrafındaki kavis çekmeye neden olur.

*Şekil 8.12. Grafikte gösterildiği gibi gözenekler yok edildikçe tane büyümesi hızlanır. Değerler bakır için sinterlenmiş tane büyüklüğü ve yoğunluğa aittir (veriler; Robert Coble).*





**Şekil 8.13.** Sinterleme sırasında yoğunluk artışı ve tane büyümesini gösteren dört mikrofotograf. Siyah bölgeler gözenekler olup ilk aşamada (sol üst) malzeme yarı gözenek ve küçük parçacıklardan oluşur. Ara aşamada (sağ üst) gözenekler daha az ve yuvarlaktır. Son aşamada (sol alt) taneler büyümüş ve gözenek oranı azalmıştır. Kırılma yüzeyi (sağ alt), tane sınırlarındaki küresel

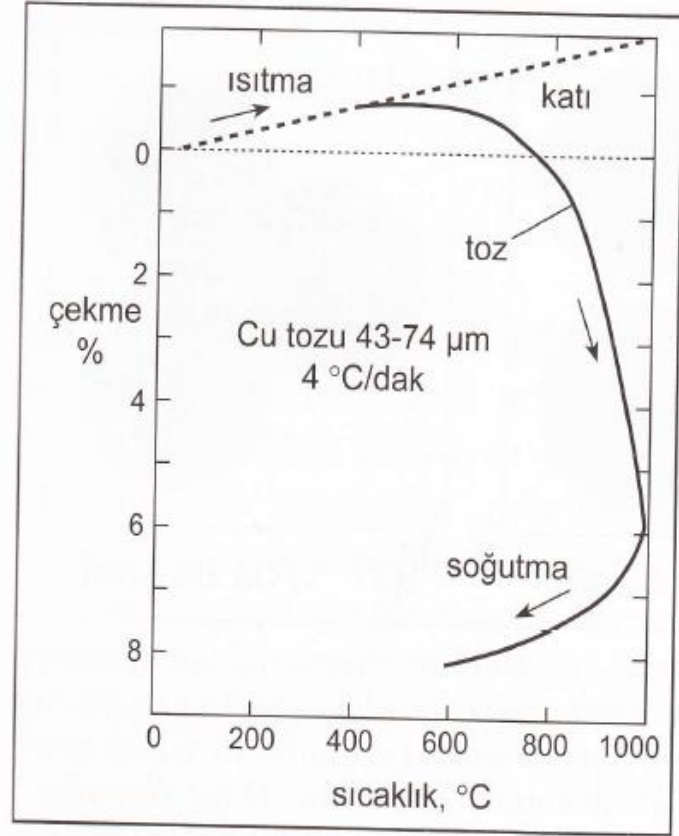


# Sinterleme Kavramları

## 1. İlk Aşama:

Sinterlemenin ilk aşamasına, çoğu zaman sinterleme sıcaklığına ısıtma sırasında hızla ulaşılır. İlk aşamada, boyun büyüklüğü oranı  $X/D$  0,3'ten azdır ve sinterleme çekmesi  $\delta$   $L/L_0$  genellikle  $0/03$ ' in altındadır. Mikroyapı büyük eğrilik gradyanları içerir ve tane boyutu, parçacık boyutundan fazla olamaz.

Sinterlemenin çekme miktarı ile izlenmesi sadece hacim taşınım işlemlerinde geçerlidir. Ancak, çekme ham parçanın değişik sıcaklıklara değişik sürelerde ısıtılması ile kolaylıkla ölçülebilir. Alternatif olarak dilatometre veya doğrudan görüntüleme teknikleri ısıtma sırasında çekmenin sürekli kaydedilmesinde kullanılabilir. Dilatometre ile uygulanan yaygın bir teknik sabit hızda, 5 veya  $10^\circ\text{C}/\text{dak}$  ısıtma ile belirli sıcaklık aralığında tarama yapmaktır. Şekil 8.15'te, bakır tozunun ısıtma hızındaki sinterleme çekmesi bir örnek çıktı olarak gösterilmiştir. Sinterlemenin aktif olduğu bölgeyi belirlemek için numune boyu sıcaklığa bağlı olarak kaydedilir ve çekme hesaplanır.  $500^\circ\text{C}$ 'a kadar sadece ısıl genişleme belirgin olup bunun üzerindeki sıcaklıklarda ise sinterleme çekmesi daha baskındır. Dilatometre sinterleme sıcaklığını tek bir deney kullanarak belirler.

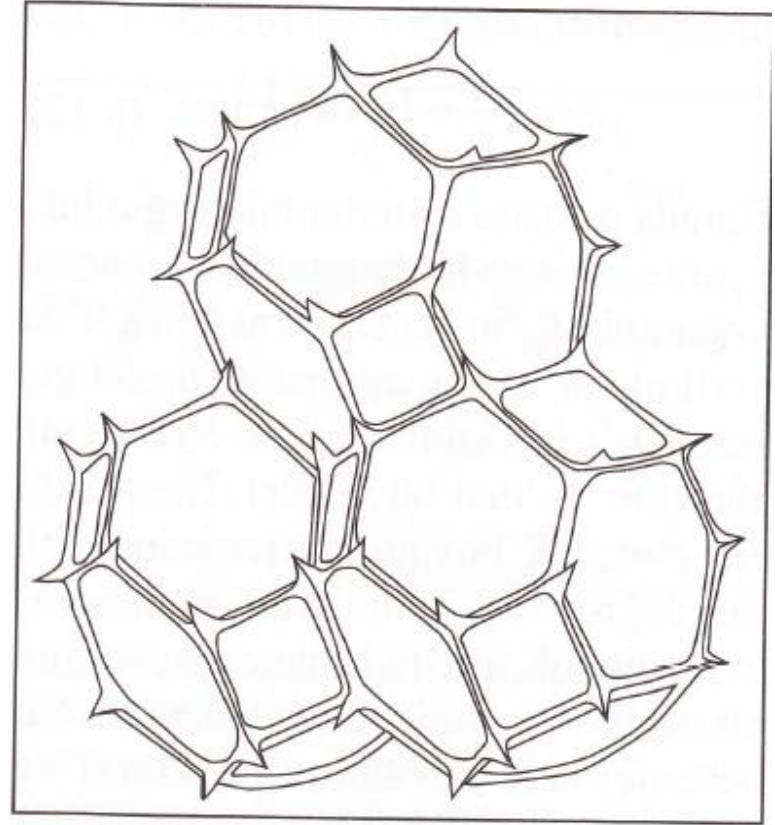


*Şekil 8.15. Boyutları 43-74  $\mu\text{m}$  arasında olan bakır tozlarının  $4^\circ\text{C}/\text{dak}$  ısıtma hızında sinterleme çekmesinin sıcaklığa bağlı olarak değişiminin dilatometre ile belirlenmesi  $500^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda önemli ölçüde çekme meydana gelmektedir (P. Duwez'in verilerine göre çizilmiştir.)*

# Sinterleme Kavramları

## 2.Ara Aşama :

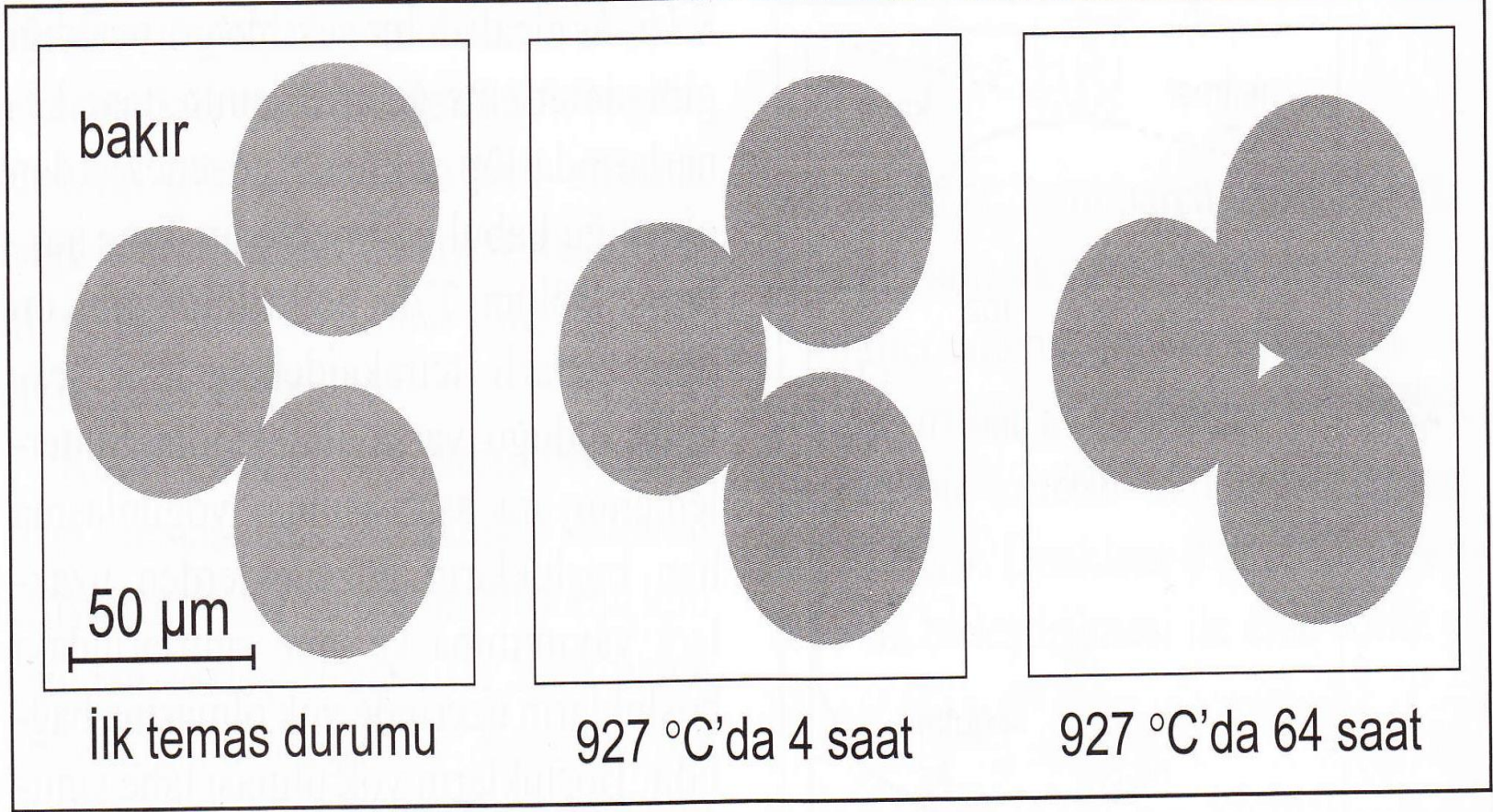
Özellik gelişiminin önemli bir bölümü sinterlemenin ara aşamasında gerçekleşir. Bu aşama gözenek yuvarlaklaşması, tane büyümesi ve genellikle yoğunluk artışı ile tanımlanır. Şekil 8. 16'da idealize bir şekilde gösterildiği gibi sinterleme geometrisinin, tane kenarlarında tüp şeklinde gözeneklerden oluştuğu kabul edilmektedir. Tane şeklinin, Bölüm 7'de belirtildiği gibi on dört kenarlı tetrakaidekahedron şeklinde olduğu varsayılmaktadır. Sinterlemenin ara aşamasında, yoğunlaşma hızı boşlukların gözeneklerden uzaklara yayınımına ve tane sınırlarındaki boşlukların üzerinde yok olmasına bağlıdır. Boşlukların yok olması tane sınırlarının hacim değişimini telafi etmesini gerektirir. Bu ise tane büyümesi, tane bükülmesi ve tane dönmesi ile gerçekleşir. Tane dönmesinin yoğunlaşmaya katkısının bir kanıtı Şekil 8.17'de bakır kürelerinin sinterleme esnasındaki görüntülerinde verilmiştir.



*Şekil 8.16. Sinterlemenin ara aşamasındaki gözenek ağının şematik çizimi. On dört köşeli tetrakaidekahedron şeklindeki tanelerin kenarlarında birbiriyle bağlantılı silindirik gözenekler yer almaktadır.*



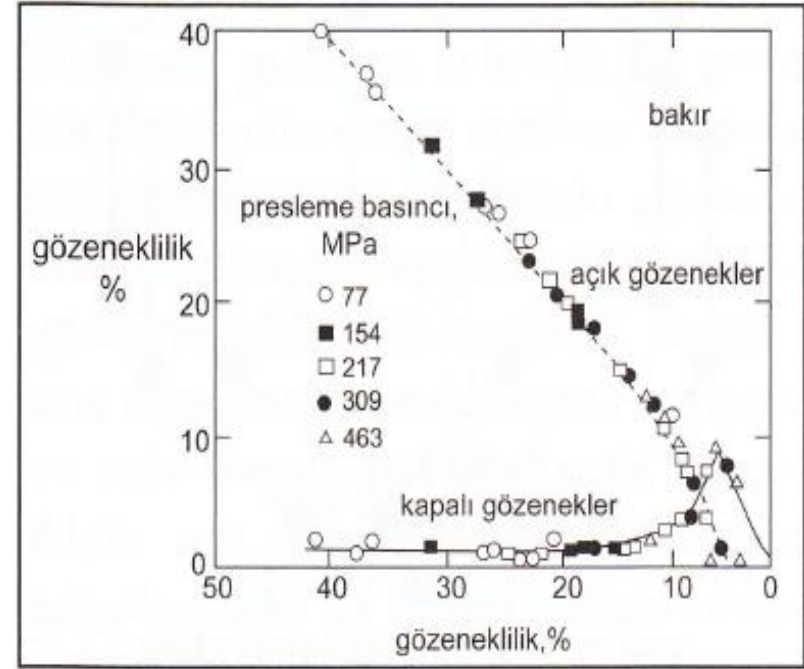
# Sinterleme Kavramları



*Şekil 8.17. Bu üç görüntü bakır parçacıklarının 927°C'daki sinterlenmesini göstermektedir. Boyun büyümesi sırasında boşlukların tane sınırlarında yok olması nedeni ile taneler yavaşça yeni yönler döner ve yoğunluğu artırır. Sinterlemedeki yoğunluk artışında tane sınırlarındaki boşlukların ortadan kalkması çok önemlidir (Görüntüler; H.E.Exner'den alınmıştır).*

## 3. Son Aşama

Sinterlemenin son aşaması kapalı gözenekler ile olur. Şekil 8.18'deki bakırın sinterlenme verileri, açık ve kapalı (izole) gözenek miktarlarını toplam gözenek miktarına göre göstermektedir. Uzunluğu  $L$  ve çapı  $d_p$  olan silindirik bir gözenek,  $L > n d_p$  olunca kapalı küresel gözeneklere dönüşür. Son aşama sinterlemesi sırasında gözenekler kapalıdır, izoledir ve küresel veya mercek şeklinde olma eğilimindedir.



**Şekil 8.18.** Farklı basınçlarda preslenmiş ham bakır parçalarda açık ve kapalı gözenek oranlarının toplam gözenek ile değişimi. Bu veriler ilk presleme basıncının yüksek olduğu durumlarda dahi gözenek kapanmasının aynı noktada olduğunu göstermektedir (F. Thummler ve W. Thomma'nın verileri kullanılmıştır.)

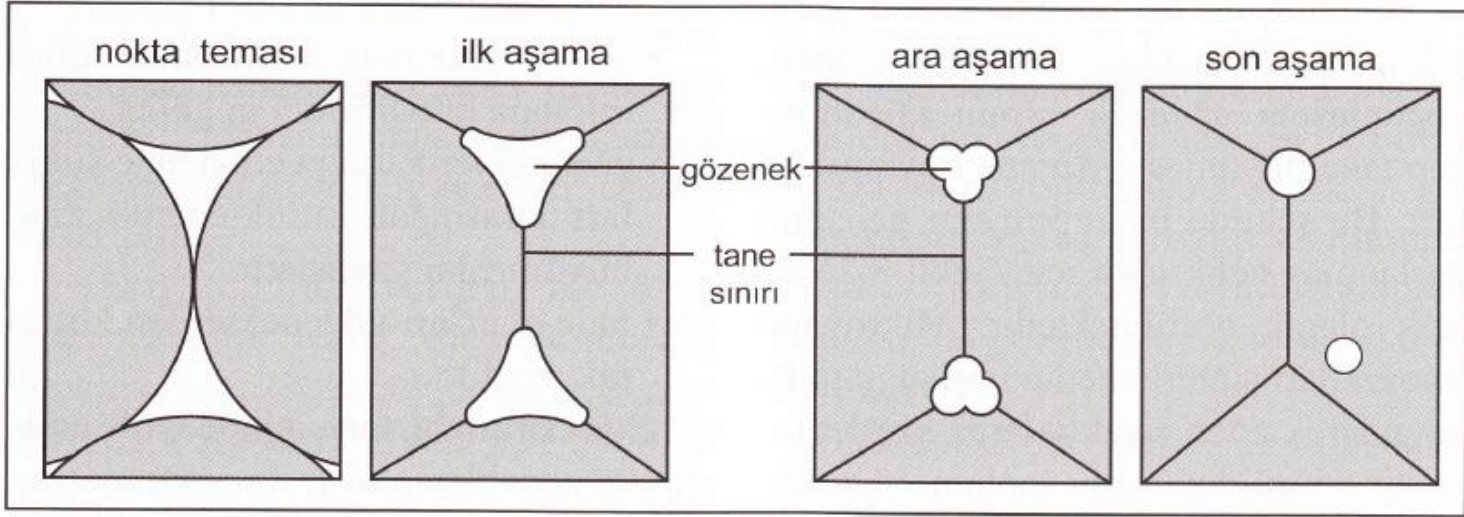
## Veri Analizi

Sinterleme alışmaları zaman, sıcaklık, parçacık boyutu, ham yoğunluk, ısıtma hızı ve atmosfer gibi özelliklere bağlıdır. Veriler küçük boyutlu tozda yüzey alanı kaybının daha hızlı olduğunu göstermektedir. Sonuçların analizi ham parçaların yüzey yayılımını kontrolünde sinterlendiğini göstermektedir.

Katı-hal sinterleme verilerinin analizinde, yüzey taşınımının çekme oluşturmadığını belirlenmiştir. Sinterleme teorisinin bir sonucu, ham parçanın davranışını malzeme ve toz özelliklerinin etkileri ayrılarak incelemek için model sistemleri üzerinde yapılır. Genellikle model sistemler teller, küreler, levha üzerinde küre geometrilerinden oluşur. Ölçülen sinterleme davranışını, boyun büyüklüğü, yüzey alanı, yoğunluk, çekme, hatta elastik modül veya elektrik iletkenliği olabilir.



# Sinterleme Kavramları



*Şekil 8.24. Parçacıkların nokta temasından başlayarak sinterleme sırasındaki gözenek yapı değişimlerinin şematik gösterimi. Gözenek hacmi azalır ve gözenekler düzgünleşir. Gözenek küreselleşmesi meydana gelirken gözeneklerin yerini tane sınırları alır.*

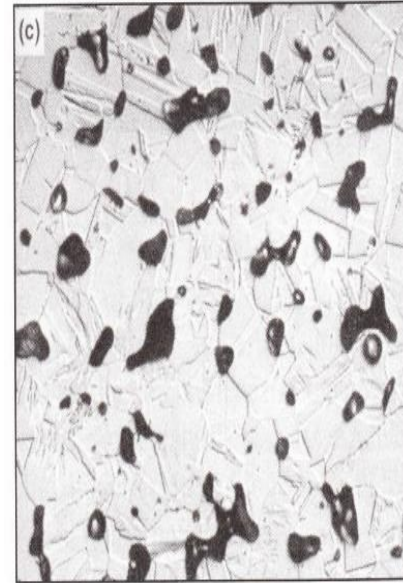
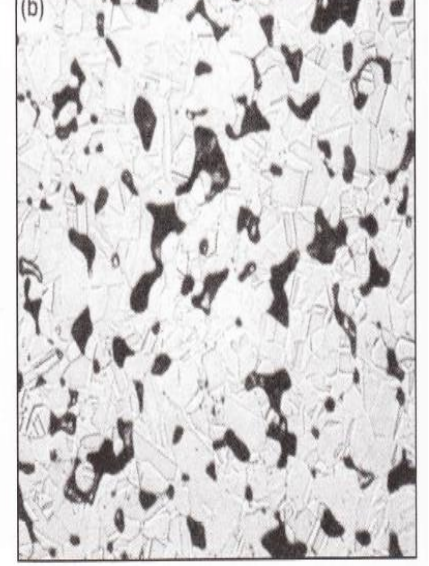
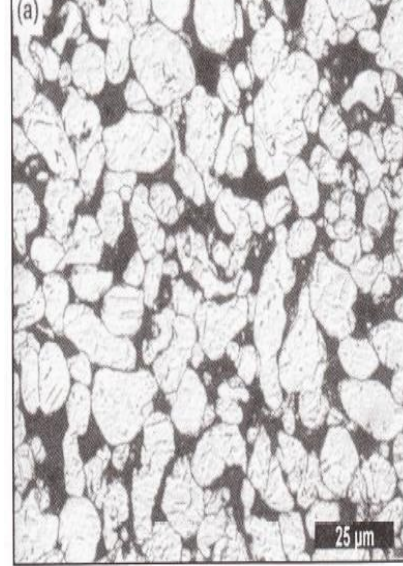
İyi sinterleme için, hızlı tane büyümesi aşamasında dahi, gözeneklerin tane sınırı ile bağlantılı olmasının sağlanması önemlidir. Sinterleme sırasında gözenek yapısındaki değişikliklerin kavramsal bir gösterimi Şekil 8.24'te verilmiştir. Parçacıklar arasındaki temas noktaları büyüyerek boyun oluşturur. İlk aşamadan sonra, tane sınırı ve gözeneklerin düzenlenmesi sinterleme hızını kontrol eder. Ara aşamanın başlangıcında, gözenek geometrisi oldukça girintili çıkıntılı olup gözenekler tane sınırlarının kesişme noktalarında yer alır. Sinterlemenin ara aşamasının devamında, gözenek geometrisi silindirik hale gelir ve sonra yoğunlaşma ile birlikte kapalı küre şeklinde gözeneklere dönüşür. Çünkü yoğunlaşma gözenek çapını küçültürken tane büyümesi gözenek boyunu artırır.



# Sinterleme Kavramları

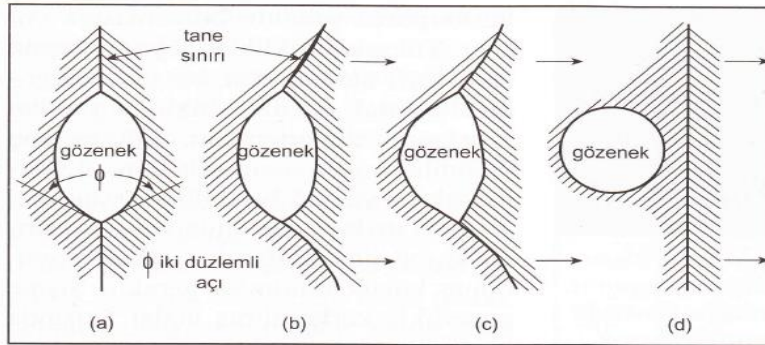
Şekilde bir mikroyapı gelişimi, paslanmaz çelik tozu için Şekil 8.25'te açık olarak görülmektedir. Mikroyapı fotoğrafları sinterlemenin başlangıcında ve giderek artan sıcaklıklarda kaydedilmiştir. Görüldüğü gibi toplam gözenek miktarı azaldıkça gözenekler yuvarlaklaşmakta ve başlangıçtaki parçacık sınırları kaybolmaktadır. Sinterleme ilerledikçe, gözenek tane sınır etkileşimi üç şekil alabilir:

- gözenekler tane sınırlarında kalarak tane büyümesini engeller,
- gözenekler hareket eden tane sınırları tarafından sürüklenerek tane büyümesini yavaşlatır.
- tane sınırları gözeneklerden koparak ayrılır. Son durumda, tane içinde izole edilmiş gözenekler oluşur ve yoğunlaşma ilerlemez. Tipik sinterleme sıcaklıklarında, malzemelerin çoğu orta veya aşırı düzeyde tane büyüme hızları gösterir.

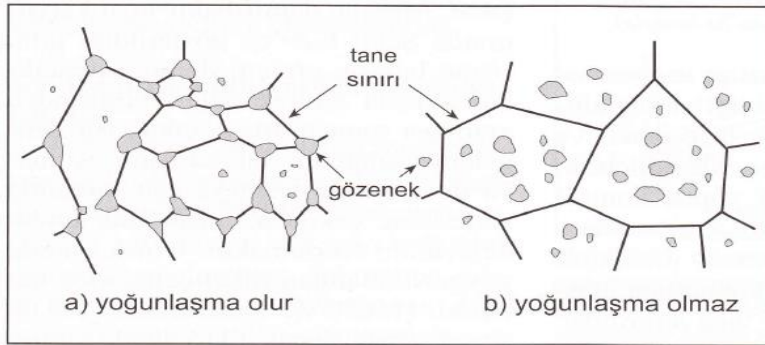


Şekil 8.25. -325 elek boyutunda olan 304L paslanmaz çelik tozunun artan sıcaklıklarda ısıtılması ile elde edilen üç optik mikroyapı fotoğrafı.

# Sinterleme Kavramları



**Şekil 8.26.** Sinterlemenin son aşamasında gözenek izolasyonu ve küreselleşmesi adımları: (a) tane sınırındaki gözeneklerin oluşturduğu iki düzlemlilik katı-buhar denge açısı (b) ve (c) gözenek sürüklenmesi ile tane büyümesi ve (d) tane sınırı kurtulması ile gözenek izolasyonu.



**Şekil 8.27.** Sinterlemede olası iki gözenek-tane sınırı düzenlemesi. Tane sınırındaki gözenekler yoğunluk artışı sağlarken (a), tane içindeki gözenekler yoğunlaşma sağlamaz (b).

Yüksek sıcaklıklarda, Şekil 8.26'da gösterildiği gibi tane sınırı hareketi gözenekten ayrılmaya yol açar. Düşük sıcaklıklarda, tane büyümesi yavaş olduğundan gözenekler tane sınırına bağlı kalır. Gözenek hareketi yüzey yayılımı ve buharlaşma-yoğunlaşma ile mümkündür. Sonuç olarak, sinterlemede mikroyapı gelişiminin ana belirleyicisi sıcaklıktır. Şekil 8.27'de verilen iki olası gözenek tane sınır düzenlenmesini inceleyelim. Gözenekler tane kenarlarında veya tane içinde yer alabilirler. Gözeneklerin tane kenarlarında bulunduğu durumdaki sistem enerjisi düşüktür. Çünkü gözenekler toplam tane sınır alanını ve enerjisini azaltır.

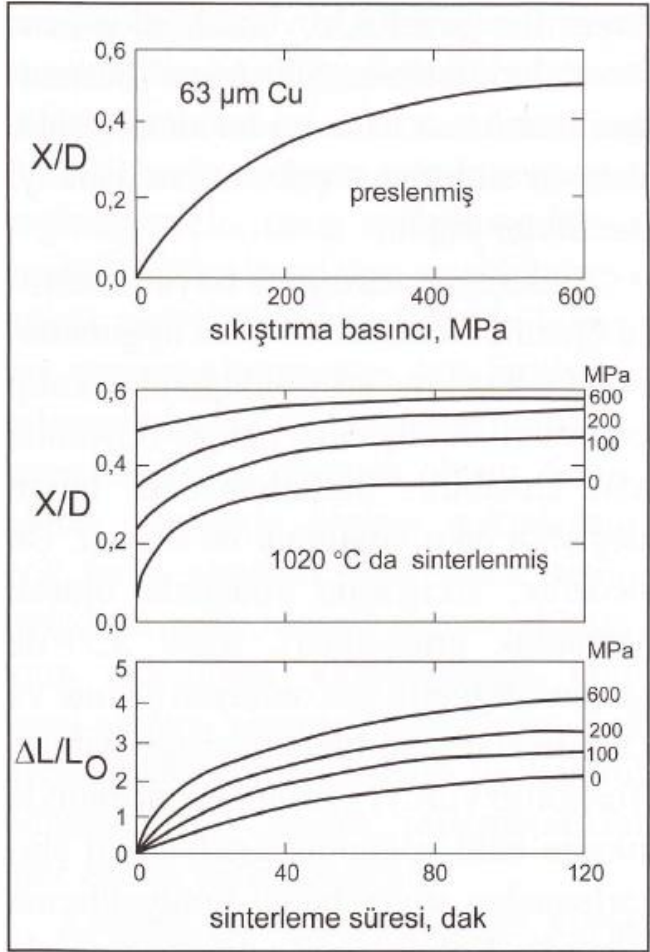
# Sinterleme Kavramları

Eğer gözenek ile sınır ayrılırsa, sistemin enerjisi yeni oluşturulan tane sınırı alanına orantılı olarak artar. Sonuç olarak, gözenek tane sınırına bağlanma enerjisi vardır ve bu enerji gözenek miktarı ile artar. Böylece, ara aşamanın başlangıcında, gözeneklerden sınır ayrılmasının az olması beklenir. Yoğunlaşma arttıkça, gözeneklerin yavaş hareketi ve bununla birlikte kilitleme kuvvetinin azalması sonucunda gözenekler tane sınırlarından kurtulur. Gözeneklerin tane sınırlarından ayrılması sinterleme ile erişilebilecek son yoğunluğu sınırlar. Bu nedenle, sıcaklığı dikkatli bir şekilde kontrol ederek kurtulmanın en aza indirilemeyecek ve parça şeklinin bozulmasına yol açar.

## Yoğunlaşma – Bağlanma Olayları

Yoğunlaşma ve çekme toz metalürjisinde iki uç olay olarak görülür. Hassas parça üretimi yapan pek çok imalatçı sinterleme sırasında boyut değişimi olmamasını ister. Eğer çekme önlenirse, preslenmiş ham parça boyutları hassas bir şekilde korunur. Sinterlenmiş parçayı kabul edilebilir, sınırlara getirmek için takım boyutlarının çekmeyi dengeleyecek şekilde büyük olması zorunludur. Bu sorun oluşturur, çünkü ham parça içindeki yoğunluk gradyanı sinterleme süresince farklı oranda çekmeye çekmeye ve parça şeklinin bozulmasına yol açar. Yüksek sıcaklıklarda yoğunlaşma daha hızlı olduğundan, bir seçenek göreceli olarak düşük sıcaklıkta yapılan kısa süreli sinterlemedir. Yüksek son yoğunluğu garanti etmek için sıkıştırma işlemi yüksek basınçlarda yapılır.





*Şekil 8.30. 63 μm küresel bakır tozlarının sinterlenmesine sıkıştırmanın etkisi. Üstteki eğriler boyun büyüklüğü oranını sıkıştırma basıncı ve sinterleme süresinin fonksiyonu olarak gösteriyor. Altteki eğri ise sıkıştırma basıncıyla sinterleme çek-*

## Ham Yoğunluğun Sinterlemeye Etkileri

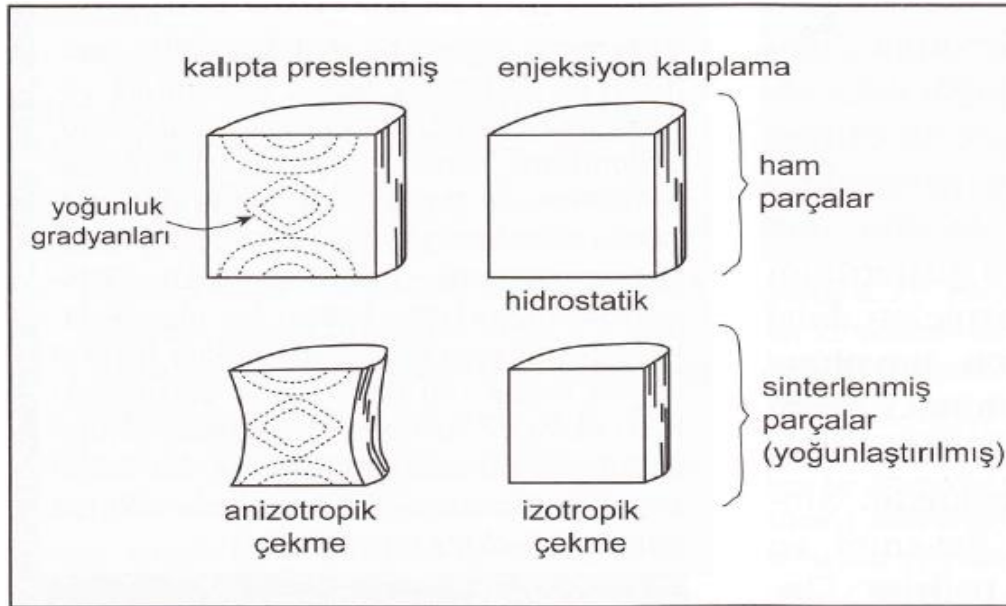
Pek çok toz sinterleme öncesinde sıkıştırılır. Bu sıkıştırma işlemi yoğunluğu artırmakla birlikte sinterleme sırasında çarpılmaya yol açan yoğunluk gradyanları oluşturur. Sıkıştırma işlemi ham yoğunluğu artırdığından, daha yüksek sinterleme yoğunluğuna ve daha az boyut değişimine yol açar. Şekil 8.30'da, sıkıştırmanın sinterlemeye olan etkisi 1020 °C'de 2 saate kadar sinterlenen 63 micron boyutundaki bakır tozları için verilmiştir. Üstteki çizim sıkıştırmadaki parçacık deformasyonu sonucu ilk boyun büyüklüğündeki artışı göstermektedir. Yüksek sıkıştırma basınçları yoğunluğun ve parçacıklar arası temas boyutunun büyümesine yol açar. Ortadaki çizimde gösterildiği gibi, yüksek sıkıştırma basınçları daha büyük sinterlenmiş boyun boyutuna katkı sağlar. Son olarak, alttaki çizim sıkıştırma basıncı arttıkça çekme oranındaki azalmayı göstermektedir. Sinterlenmiş boyun boyutu dayanım ve süneklik gibi özellikleri belirler.



# Sinterleme Kavramları

## Ham Yoğunluğun Sinterlemeye Etkileri:

Genellikle yüksek sıkıştırma basınçları istenir. Sıkıştırma basıncının artırılması daha iyi boyut kontrolü, daha az sinterleme çekmesi ve daha iyi özellikler sağlar. Sinterleme süresince boyut kontrolü önemli bir konudur. Bazı uygulamalarda net çekme sıfır olduğundan kalıp boyutları üretilecek parça boyutuna eşit alınabilir. Sinterlemedeki boyut değişimi ham yoğunluk ile değişir. Bu nedenle, sıkıştırma sırasında oluşan yoğunluk gradyanlar Şekil 8.31'de gösterildiği gibi eşit olmayan çekme ve çarpılmaların problem kaynağı olabilir. Toz-kalıp yüzeyi sürtünmesi nedeniyle oluşan ham yoğunluk gradyanları sinterlemeden sonra boyut gradyanlarına dönüşür. Kalıpta preslenmiş parçalarda en az boyut değişimleri, iri toz boyutu, yüksek presleme basıncı, düşük sinterleme sıcaklığı, kısa sinterleme süresi, düşük parça yüksekliği ve homojen parça geometrisi ile sağlanır.



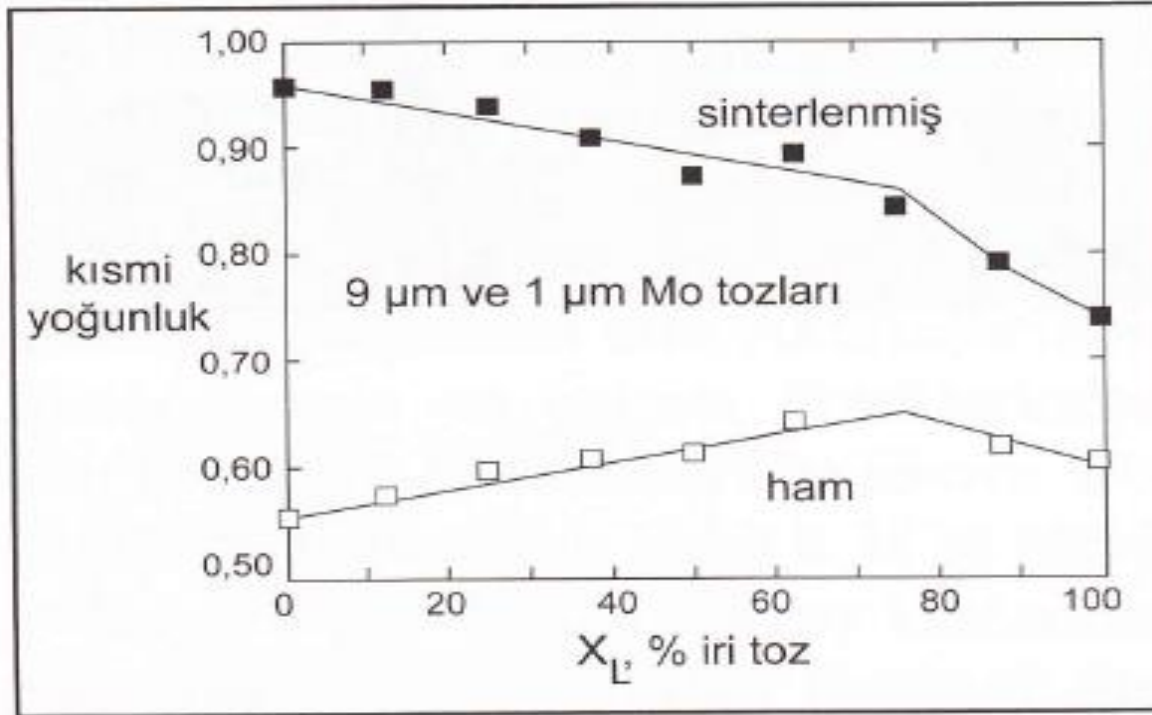
*Şekil 8.31. Kalıpta preslenmiş ve enjeksiyon kalıplama ham parçaların, çekme etkilerinin karşılaştırılması. Kalıpta preslenen ham parçadaki yoğunluk gradyanları anizotropik çekmeye ve çarpılmış son şekle yol açar. Diğer taraftan, enjeksiyon kalıplama ile hidrostatik şekillendirme, yüksek sıcaklık sinterleme yoğunlaşması sağlarken çarpılmalara yol açmaz (John Warren'in izniyle).*

## Karışım Toz Sinterlemesi

❖ Karışım tozlar çoğu zaman alaşımların, kompozitlerin veya yüksek paketleme yoğunluklu yapıların üretimi için kullanılır. Örnek, yüksek paketleme yoğunluklu tozlar farklı boyuttaki tozların karıştırılması ile elde edilir. Diğer durumlarda, bir ana alaşım bir tozla karıştırılır ve sinterleme sırasında yayılım ile karışım homojen alaşım haline getirilir. Son olarak, özellikle parçacıklı kompozitler, çözünmeyen tozların karışımı ve sinterlenmesi ile iki fazlı mikroyapı elde edilir. Aynı bileşimdeki ancak farklı boyuttaki toz karışımları genellikle daha yüksek ham yoğunluk verir. Ortalama parçacık boyutu arttıkça, sinterleme işlemi kötü yönde etkilenir. Bu nedenle, iki farklı durum ortaya çıkabilir. Düşük sinterleme sıcaklıkları ve kısa sinterleme sürelerinde, paketleme yararı baskındır ve toz karışımı en düşük boyut değişimi ile en yüksek yoğunluğu verir.

❖ Yüksek sinterleme sıcaklıkları ve uzun sinterleme sürelerinde, sinterleme etkisinin kötüleşmesi daha baskın olur ve en küçük ortalama toz boyutunda en yüksek yoğunluk elde edilir. Şekil 8.32'de bu son etkiyi, 1 pm ve 9 pm molibden tozu karışımları için, ham yoğunluk ve sinterlenmiş yoğunluğun karışım oranına karşı değişimi göstermektedir. Ortalama toz boyutu arttıkça (büyük parçacıklıların yizdesinin artması) sinterlenmiş yoğunluk azalır. İki farklı tozdan oluşan kompozitlerde, özellikle de fazlardan birisi kararlı ise, benzer problemlerle karşılaşılır.

❖ Fazlardan birinin tane büyümesini geciktirdiği durumlarda, sinterlemeyi artırır. Ancak, karışım toz sinterlemesi tam homojenlik sağlamak için, uzun sinterleme süresi veya yüksek sinterleme sıcaklığı veya küçük tozlar gerektirir. Eğer iki bileşenin yayılım katsayıları çok farklı ise, bileşenlerin eşit olmayan yayılma güçlerinden dolayı gözenek oluşur. Sonuç olarak, özellikle ergime noktalarının çok farklı olmaları durumunda, şişme meydana gelir.



**Şekil 8.32.** Karışım bileşiminin iki modlu molibden tozlarının sinterlenmesine etkisi. İri tozların oranı arttıkça ham yoğunluk artar. Fakat ortalama parçacık boyutunda artma nedeni ile sinterleme çekmesi azalır. Sonuç olarak, en yüksek sinterlenmiş yoğunluk en küçük toz ile elde edilir (veriler; Henry Hausner).

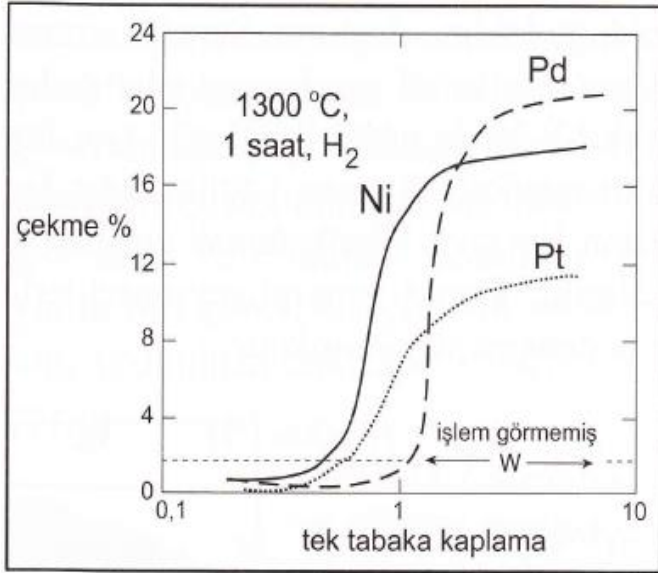
## Destekli Sinterleme:

❖ Bir malzemenin yayılma gücü sıcaklık da dahil birçok etmen tarafından belirlenir. Bununla birlikte, küçük oranda katkıları yaparak sinterlemeyi hızlandırmak mümkündür. Bunun bazı örnekleri; volframa nikel, demire fosfor ve paslanmaz çeliğe bor katılmasıdır. Yayınım hızları sıcaklık ve kristal yapısı da dahil olmak üzere birçok etmen tarafından belirlenir. Demir gibi bir malzeme, 910 °C'deki hacim yayılma gücü ferrit olarak bilinen hacim merkezli kübik (HMK) yapıda, östenit olarak bilinen yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya göre yaklaşık 300 kat daha fazladır. Hacim merkezli kübik yapının korunması sinterlenmeyi destekler ve bu nedenle Mo, P ve Si katkısı sinterlemeye yardımcı olur. Bu tür karışık fazlı mikroyapılar aynı zamanda sinterleme esnasında tane büyümesine direnç göstererek sinterlenmiş yoğunluğu daha da artırır.

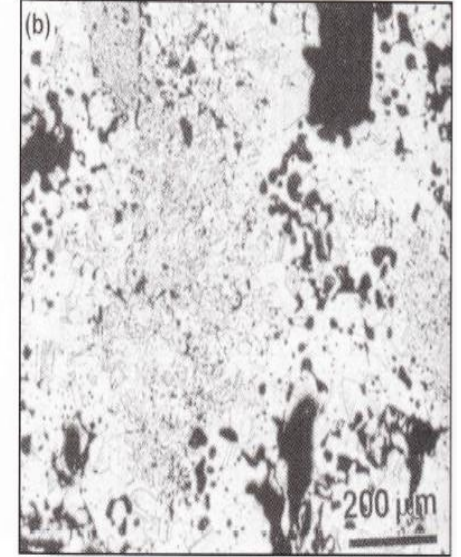
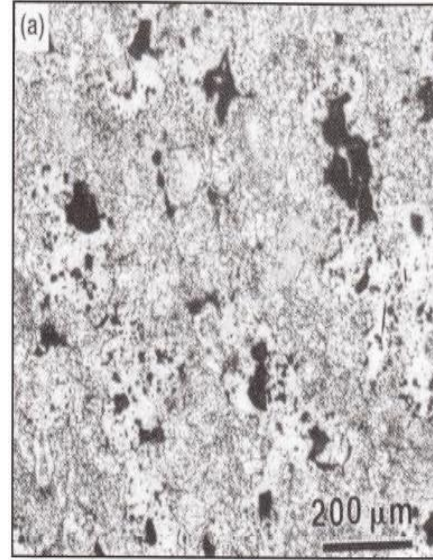
❖ Sinterlemeyi önemli ölçüde desteklemenin bir yolu da aktifleştirilmiş sinterlemedir. Bu işlem, sinterleme için gerekli olan aktivasyon enerjisini azaltan katkıların katılmasını içerir. Bunun sonucu olarak daha düşük sinterleme sıcaklığı, daha kısa sinterleme süresi veya daha iyi özellikler sağlanmış olur. Aktifleştirilmiş sinterlemenin en çarpıcı örneklerinden biri bazı geçiş elementleri ile işleme tabi tutulmuş volframdır.



# Sinterleme Kavramları



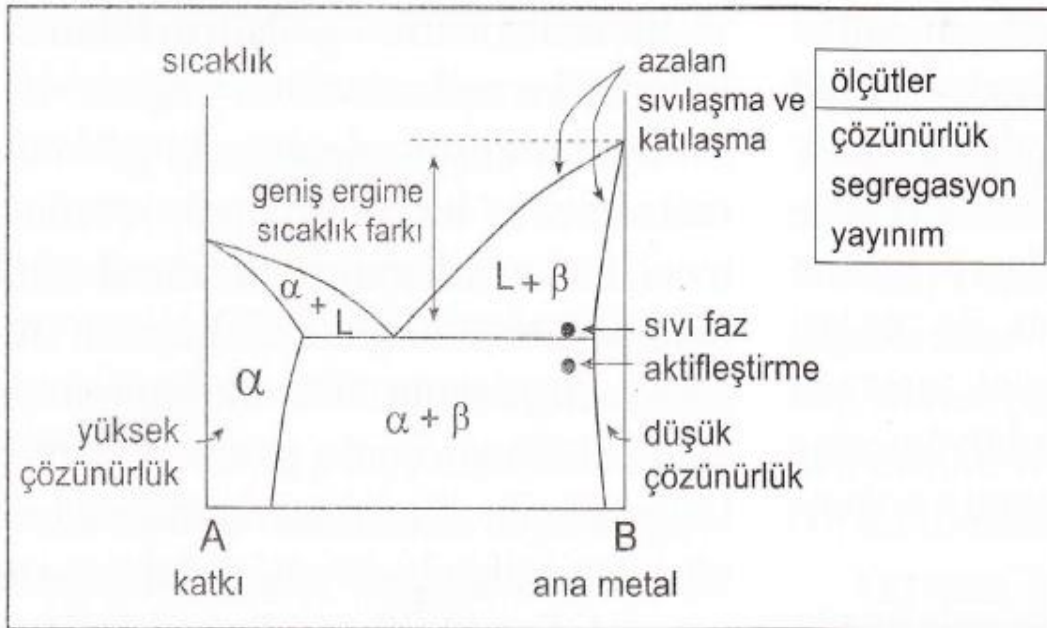
**Şekil 8.34.** Değişik sinterleme aktifleştiricileri ile işlem yapılmış 0,6 µm boyutunda W tozunun 1300 °C'deki sinterleme çekmesi. Aktifleştirici miktarı W tozu üzerinde atomik tek tabaka olarak (ağırlıkça %0,5'in altındadır) ifade edilmiştir. Aktifleştirilmiş sinterlemeyi gözlemlemek için W tozunun üzerinde sürekli bir tabaka olması gerekmektedir. Aynı şartlarda sinterlenen işlem görmemiş W tozunun çekme oranı kesikli yatay çizgi ile gösterilmiş olup yaklaşık %2 civarındadır.



**Şekil 8.33.** Bakır-kalay karışım tozlarında (90:10 bronz) çeşitli sinterlenme aşamalarında oluşan mikroyapılar; (a) 600 °C'ye kadar ısıtılmış (kalay ergidikten sonra), (b) 810 °C'ye kadar ısıtılmış ve (c) 850 °C'de 5 dak sinterlenen parça.

# Sinterleme Kavramları

Sinterlemenin geliştirilebilmesi için, katkı malzemesinin ergime sıcaklığının düşük olması, sinterlenen malzemenin bir malzemede çözünmesi, katkı malzemesinin sinterlenen malzemede çözünmemesi gerekir. Bu tek yönlü çözünürlük sinterleme sırasında aktifleştiricinin parçacık temas bölgelerinde segregasyonuna neden olur. Bu bölgede yayılım daha hızlı gerçekleşir. Aktifleştirilmiş sinterleme sistemleri için ideal faz diyagramı Şekil 8.35'te verilmiştir. Aktifleştirilmiş sinterleme sıcaklığı bölgesinin hemen üzerindeki sıcaklıklarda sıvı faz oluşur.

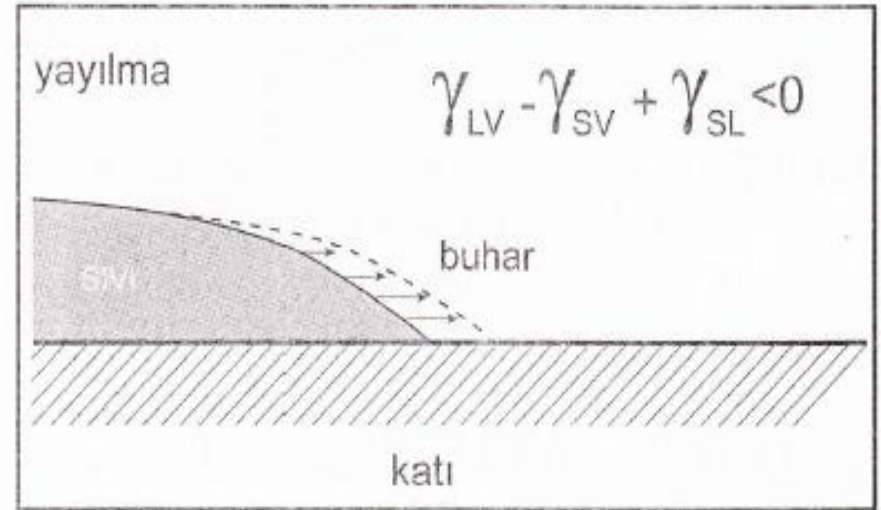


**Şekil 8.35.** A katkısının B ana metalin sinterlenmesini desteklediği idealleştirilmiş ikili-faz diyagramı. Aktifleştirilmiş sinterlemenin başarısı için üç ana kriter özgül faz diyagram özellikleri ile ilgilidir. Sıvı fazlı sinterleme için uygun sıcaklık ve bileşim diyagram üzerinde gösterilmiştir.

# Sinterleme Kavramları

❖ Sıvı Fazlı sinterleme sinterleme sırasında sıvı faz oluşumu sinterleme hızını büyük ölçüde artırır. Esas olarak sıvı faz, taneleri birbirine bağlayan ve içinde hızlı yayılımın olduğu lehimi oluşturur. Sıvı faz sinterleme için temel gereksinim ıslatmadır. Şekil 8.36'da gösterildiği gibi sıvı faz katı tanesinin üzerine yayılmasıdır. Islatan bir sıvı, küçük temas açısına sahiptir. Temas açısı yüzey enerjilerinin dengesi ile tanımlanır. Genellikle, ıslatma katının sıvı içinde çözüldüğü durumlarda gerçekleşir. Bunlara ilave olarak bu çözünürlük katının sıvı içinden yayınabilmesini sağlar. Bu şartlardaki yayılım hızları olası katı hal yayılımından çok daha fazladır. TiC-Ni ve WC-CO sermetleri, Cu-Sn gibi metaller ve çeşitli seramik-cam bileşimleri gibi pek çok sistemler bu uygun özellikleri gösterir.

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos(\theta) \quad (8.17)$$



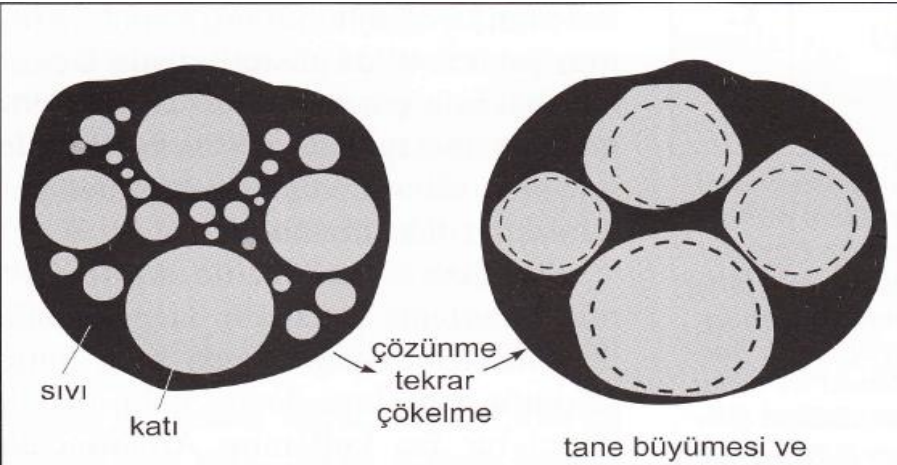
Şekil 8.36. Sıvı fazlı sinterlemede katı tanelerin sıvı ile ıslatılması temel gereksinimdir. Sıvının katı tanelerin üzerine yayılması için düşük temas açısı ile tanımlanan uygun yüzey enerjileri gerekir.



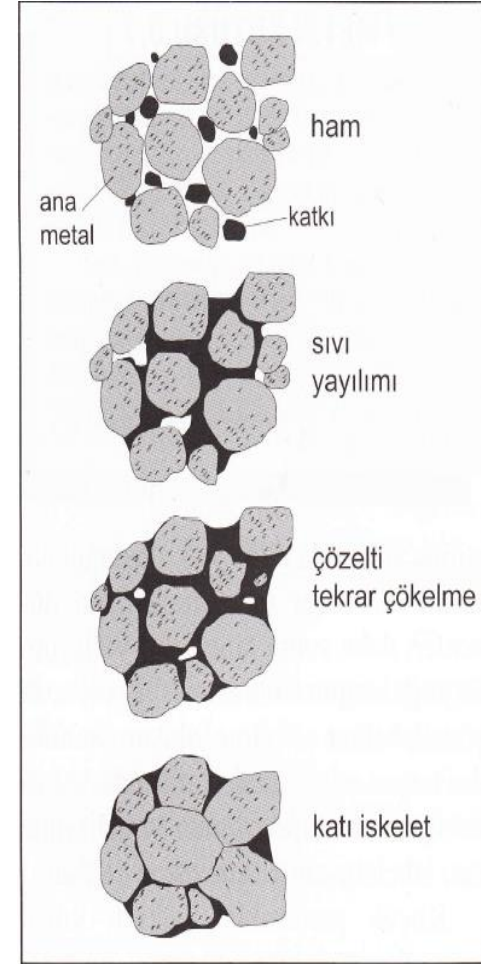
# Sinterleme Kavramları

## Mekanizmalar

Sıvı fazlı sinterlemedeki yoğunlaşma aşamaları Şekil 8.37'de şematik olarak gösterilmiştir. Başlangıçta, ısıtma safhasında taneler katı hal sinterlemesi ile birbirine bağlanır. İlk sıvı oluştuğunda, tanelerin yeniden düzenlenmesi ile hızlı bir yoğunluk artışı olur. Oluşan sıvı katıyı ıslatarak oluşmuş olan katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlenmeyi sağlar. Bundan sonra, çözelti tekrar çökme olarak bilinen işlemde, sıvı katı atomların taşıyıcısı olur. Bu aşamada daha küçük tane kütleleri sıvı içinde çözünür, sıvı içinden yayılır ve daha sonra büyük tanelerin üzerine çöker. Katı tane çözünürlüğü tane boyutu ile ters orantılıdır. Dolayısıyla ile, öncelikle küçük taneler sıvı faz içinde çözünür. Zamanla tane sayısı azalır ve tane boyutu artar. Çözelti tekrar çökme işlemi ve tane şekli yerleşimi Şekil 8.38'de gösterilmiştir.



*Şekil 8.38. Çözelti-tekrar çökme işlemi, küçük tanelerin çözünmesi ve daha sonra büyük tanelerin üzerine katı faz çökmesi ile tane büyümesini sağlar. Tane büyümesinin yanısıra, işlem tane şekli yerleşimine imkan tanır, katının daha iyi paketlenmesini ve kalan boşlukların doldurulması için sıvının*

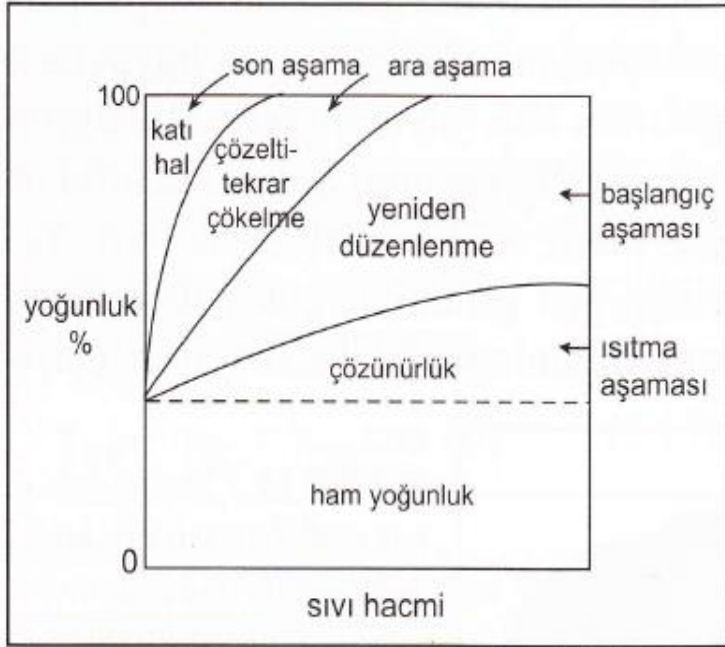


*Şekil 8.37. İki toz karışımı kullanılarak sıvı faz sinterlemesinin kavramsal aşamaları. İşlem sırasında ana metal katı durumdadır ve sıvı faz oluşumu katkı metalinden kaynaklanır.*

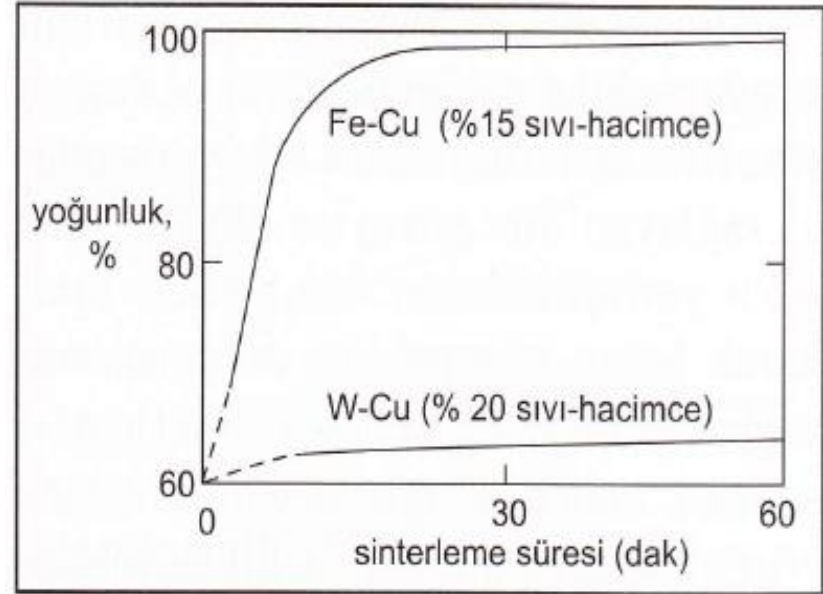


Düşük çözünürlüklü veya iri taneli sistemlerde yoğunlaşma yavaştır. Sıvının hacim oranı arttıkça gözenekleri dolduracak sıvı miktarı daha fazla olduğundan yoğunlaşma da kolaylaşır. Ancak, yerçekiminden dolayı ham parça çökmesi sorun olur. Şekil 8.39'da yoğunlaşmanın sıvı oranı ile değişimi verilmiştir. Eğer sıvı yoksa, sinterlenme katı-hal işlemleri ile gerçekleşir. Fazla sıvı olması durumunda ise (yaklaşık % 35 hacim oranı), sıvı oluşumu ile birlikte taneler arasındaki gözenekler dolar. Ancak, bu durumda ham parça şeklini koruyamayabilir. Ara sıvı oranlarında, ham parça şeklini korur, ancak katı taneler arasındaki boşlukları doldurmak için yeterli sıvı yoktur. Bu tür durumlarda, toz karışımındaki kimyasal gradyanlardan dolayı sinterleme ısıtma esnasında olur. Sıvı oluştuğunda, kılcal kuvvetler taneleri yeniden düzenler, daha sonra tane şekli yerleşimi ve yoğunluğun daha artmasına yol açan Çözelti tekrar çökme oluşur. Sonunda, temas eden taneler arasında kararlı boyunlar oluşur ve son yoğunlaşma katı iskeletin sinterlenmesine bağlıdır. Küçük parçacıklar yüksek kılcal kuvvetler ve kısa yayımlı mesafesi nedeni ile sıvı faz sinterlenmesine yardımcı olur. Fazla sıvı oranı ve sıvı içinde yüksek katı çözünürlükleride yoğunlaşmasına yardımcı olur. Bu son etki Fe-Cu ve W-Cu sistemlerinin sinterlenmiş yoğunluklarının karşılaştırıldığı Şekil 8.40'da gösterilmiştir. Demir sıvı bakırda çözünürken, tungsten çözünmez. Dolayısıyla ile Fe-Cu sisteminde sıvı oranı daha az olmasına rağmen yoğunlaşma daha hızlı olur.

# Sinterleme Kavramları

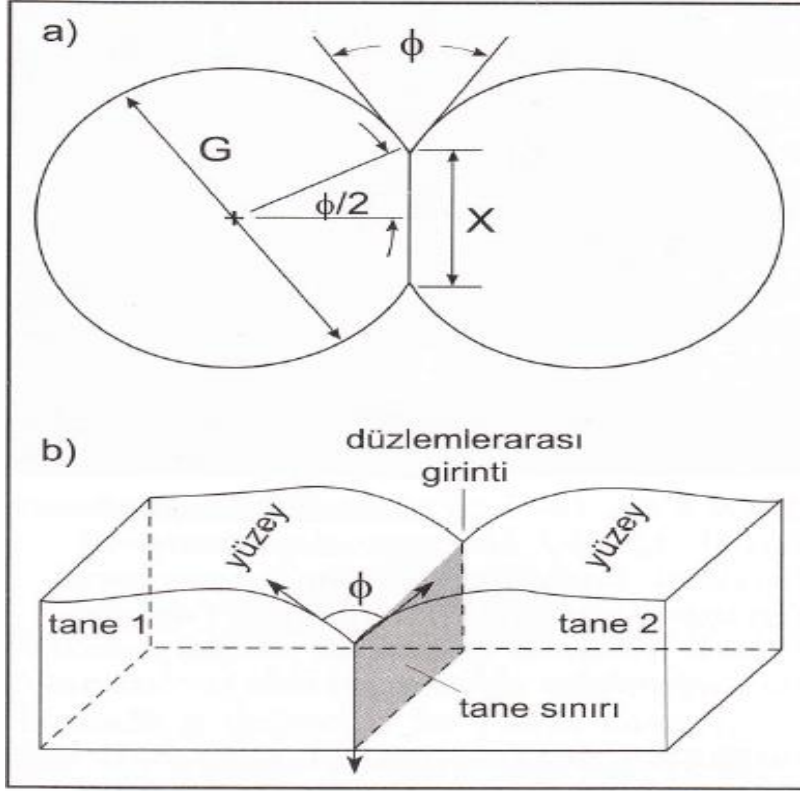


**Şekil 8.39.** Baskın bölgelerin gösterildiği yoğunluk sıvı oranı haritası. Ham parça, ham yoğunluğa eşit yoğunluk ile başlar ve karışım tozların kimyasal çözünürlülük gradyanlarından dolayı ısıtma sırasında yoğunlaşma başlar. Sıvı oluştuğunda parçacıkların yeniden düzenlenmesi ile daha fazla yoğunlaşma olur. Bunu takiben çözelti-tekrar-çökme işlemi ve son olarak katı hal sinterlenmesi ile oluşur. Her işlemin göreceli önemi sıvı miktarına bağlıdır.



**Şekil 8.40.** Sıvı fazlı sinterlemede çözünürlüğün yoğunlaşmaya etkisi. Demir sıvı bakır içerisinde çözünürken, tungsten çözünmez. Sonuç olarak, sinterleme süresince bu iki sistemde büyük yoğunluk farkı oluşur (veriler, F. V. Lenel).

## Mikroyapı Gelişimi:



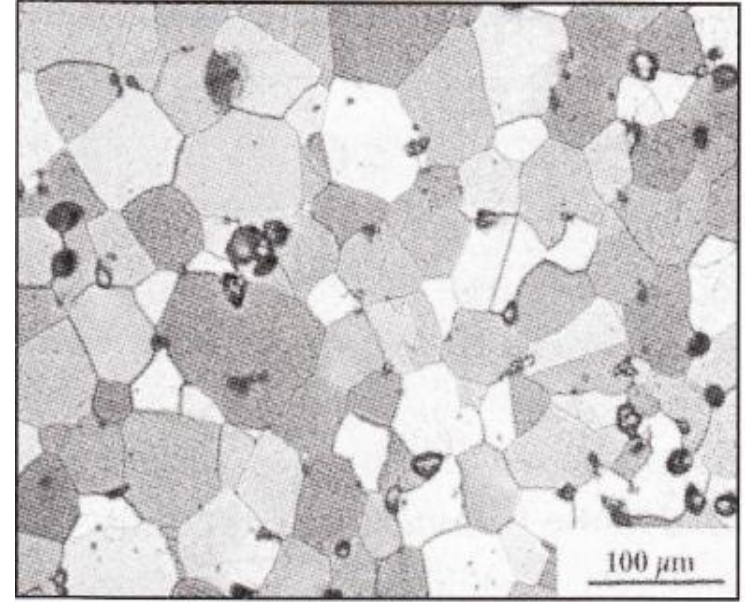
**Şekil 8.41.** Sıvı fazlı sinterlemede tane-tane teması dengesi için iki tane modeli. (a) 'da gösterildiği gibi, çapı  $G$  olan iki tane sıvı tarafından çevrelenir. Bu işlem, boyun tane boyutu oranı için dengeli iki düzlemlilik açı  $\phi$ , değeri oluşturur. Aynı geometri (b) 'de gösterildiği gibi tane sınırının oluştuğu düz yüzeyler için de geçerlidir.

Sıvı ile temas ettikten sonra, Şekil 8.41a'da gösterildiği gibi, iki-taneli düzenleme esas kararlı bir katı-sıvı yapısı ortaya çıkar. Katı taneler kendilerini çevreleyen sıvı ile kararlı boyunlar oluşturduktan sonra denge durumu oluşur. Sıvı fazlı sinterleme sırasında katı taneler şekil değişimine uğrar ve komşu tanelerle aralarında daha sıkı yerleşmeyi sağlayan diz yüzeyler oluşur. Tane şekli yerleşmesi sıvı fazı serbest bırakarak kalan gözenekleri doldurmasını sağlar. Şekil 8.42, sıvı faz sinterlemesi sonrası tungsten ağır alaşımının mikroyapısıdır. Şekil birbiriyle temas eden yuvarlaklaşmış tungsten tanelerini göstermektedir. Sinterleme sıcaklığında taneler arasında yer alan faz sıvıdır. sıvı fazın hacim oranı ve iki düzlemlilik açısına bağlı olarak, birkaç farklı tane sıvı yapısı mümkündür. Genellikle iki düzlemlilik açısı  $20^\circ$  ile  $40^\circ$  arasında ve sıvı fazın oranı da hacimce %20'nin altındadır.



## Sıvı Fazlı Sinterleme Çeşitleri

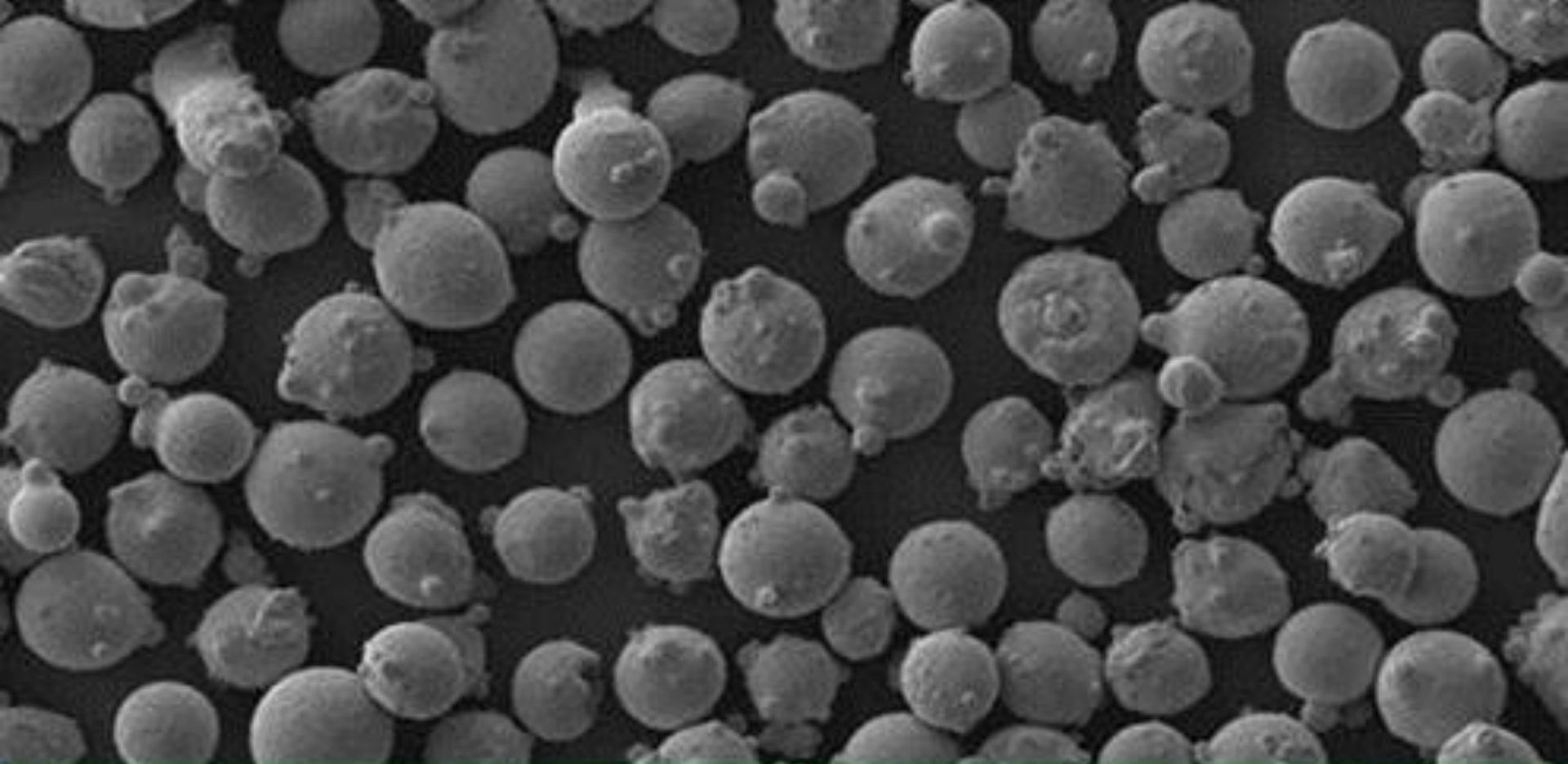
Süper katıgen sıvı fazlı sinterleme, karışım tozlar yerine ön alaşımlı tozların kullanıldığı, sıvı fazlı sinterlemenin değişik bir türüdür. Alaşımlı tozlar, her bir parçacıkta sıvı çekirdeklenmesi için, sıvılaşma ve katılaşma eğrilerinin arasında bir sıcaklığa ısıtılır. Sonuç olarak, yarı-katı parçacıklar yumuşar ve kılcal etkiden dolayı yeniden düzenlenme ile hızla yoğunlaşır. Sıcaklık ve bileşim sıvıların hacim oranını belirler. İşlem, geniş ergime aralığına sahip sistemlere uygulanır ve büyük parçacıklar ile yüksek yoğunlaşma sağlandığı için çekicidir. Bu yöntem takım çelikleri ve paslanmaz çeliklerin üretiminde kullanılır.



*Şekil 8.47. Nikel-alüminyum toz karışımının ekzotermik tepkimeli sinterlenmesinden oluşan yapının optik görüntüsü. Tepkime ısıtı kullanılarak ilk yoğunluğu %72 olan ham parça, yoğunluğu %96 olan  $Ni_3Al$  intermetalğine sinterlenir (Animesh Bose ve David Sims'in izniyle).*



Tam yoğunluklu kompozitlerin üretimi ile ilgili diğer bir seçenek, sinterdöküm olarak da bilinen sıvı emdirme dir. Emdirme açık gözenek yapısına ve dış sıvı kaynağına dayalıdır. Düşük hızda ısıtma sırasında parçacık yapısı sinterlenir ve tepe sıcaklığa ulaşıldığında dışta sıvı oluşur ve gözeneklere sızar. Bunun olabilmesi için sıvının temas açısının düşük olması gerekir. Emdirme uygulamalarına; Fe-Cu, Cr-Cu, SiC-Al, TiC-Ni, Co-Cu, W-Cu, CdO-Ag, WC-Cu, WC-Ag, ve Mo-Ag sistemleri örnektir. Her uygulamada, emdirme işleminden önce yüksek ergime sıcaklığına sahip faz sinterlenir. Bu işlem iki fazın ergime sıcaklıkları arasında meydana gelir. Gözenekli iskelet ile emdirilen sıvı arasında tepkime oluşturularak yeni bir malzeme elde edilebilir.



# Sinterleme Pratiğı

## **A-GEREKSİNİMLER**

Sinterleme işlemleri, ham toz parçayı istenilen kalite, şekil ve boyuta sahip bir ürüne dönüştürür. Sinterleme döngüsünü tanımlarken, göz önüne alınması gereken ilk husus, sinter bağının istenilen seviyeye getirilmesidir.

Parçacıklar arası bağ oluşturmanın yanında sinterleme döngülerinin oksit giderme gibi ikincil amaçları da vardır.

## **B-İŞLEM ATMOSFERLERİ**

Sinterleme atmosferinin en önemli görevi, yüksek sıcaklıktaki kimyasal tepkimeleri kontrol etmektir.

Ayrıca atmosfer, bağlayıcı veya yağlayıcı giderme, numunelere ısı yayılımını, zararlı katkıların oluşumunun engellenmesi ile karbon ve azot seviyeleri gibi son kimyasal bileşiminin kontrol edilmesinde önemlidir.

## **B.1. ÖNEMLİ TEPKİMELELER**

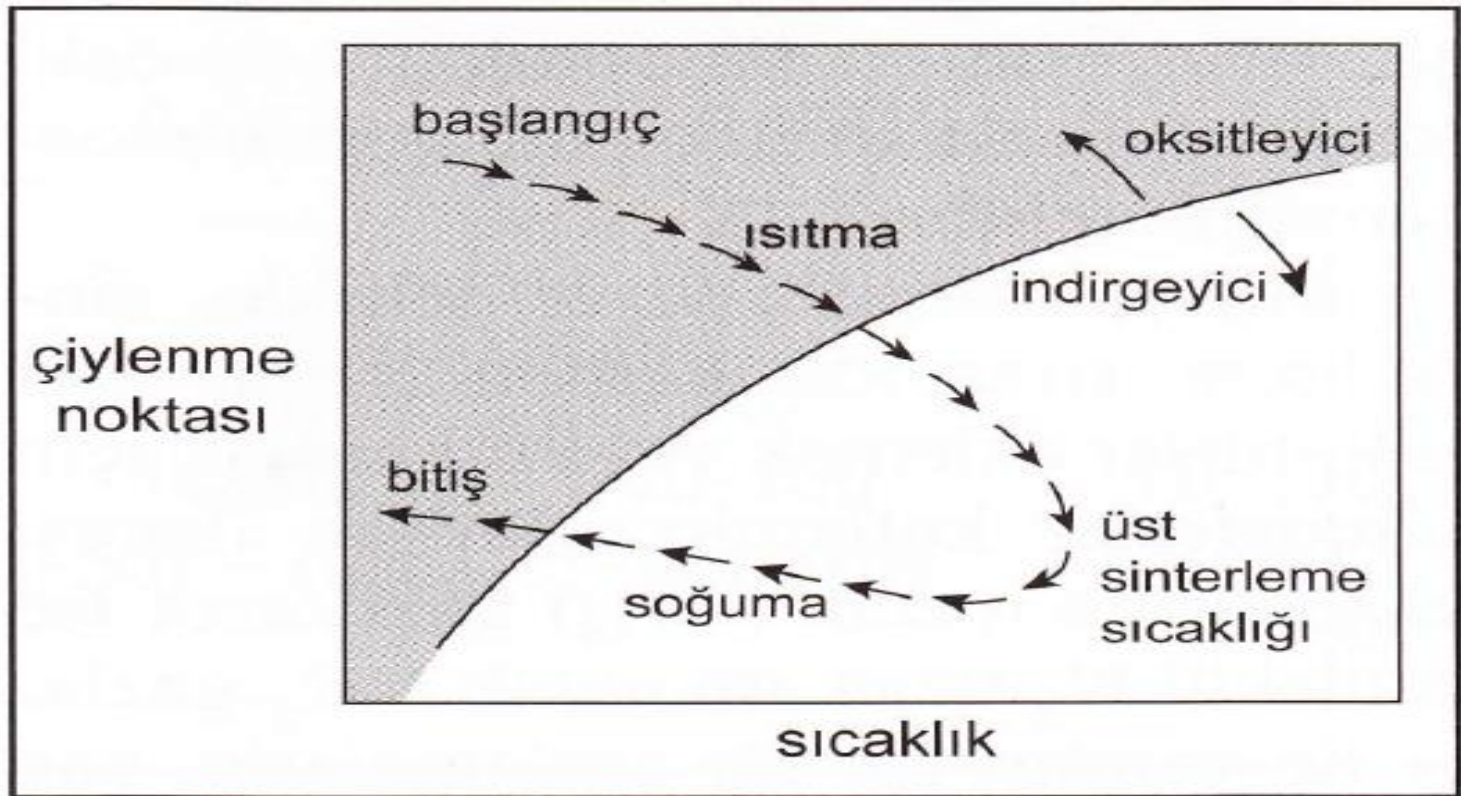
Preslenmiş ham parça, etrafındaki atmosfer ile kimyasal etkileşime girer ve bazı durumlarda atmosferden gaz emer. Karbürleme ve nitrürleme tepkimeleri son ürünün ağırlığını artıran örneklerdir. Buna karşılık oksit indirgeme atmosfere gaz transferine sebep olur. Böylece oksitlenme ve indirgeme, karbürleme-karbon yanması ve benzer tepkimeler sinterlemenin bir parçasıdır.

Atmosferin bileşimi, malzeme ve istenilen kimyasal tepkimelere bağlıdır. Oksit seramikler genellikle hava ortamında sinterlenir, ancak yüksek performanslı malzemelerin çoğu için koruyucu atmosfer gereklidir. Bu durum oksitler için de geçerlidir. Metallerin sinterlenme sırasında oksitlenmeden korunması ve absorbe edilen oksijen ve nemin ham parçadan uzaklaştırılması gereklidir. Metallerin sinterlenmesi için genellikle indirgeyici atmosfer gereklidir.



# Sinterleme Pratiği

Çiğlenme noktası, su buharının sinterleme atmosferinde yoğuştuğu sıcaklıktır ve hidrojen indirgeme potansiyeli için basit bir ölçümdür. 7 C çiğlenme noktası atmosferde hacimce %1 su buharı demektir, buna karşılık -42 C ise hacimce %0,01 su buharına karşılık gelmektedir.



Bir toz metal parça sinterleme sıcaklığına ısıtılırken, parçacıklar nem veya oksijen absorbe ettiğinden dolayı ilk önce oksitleyici ortama maruz kalır ve gözenekler hava ile dolar. Yüksek sıcaklıkta parça ve atmosfer indirgeyici kısımda bulunur. Fakat soğuma sırasında, parça oksitlenme-indirgenme bölgesini geçerek oksitlenir. Bu durum yüksek sıcaklıkta gerçekleşirse, parça önemli lde etkilenir. Bu bakımdan sinterleme sıcaklığından soğutma sırasındaki atmosfer kalitesi çok önemlidir. Soğutma esnasında temiz atmosferin sağlanması fırın tasarımında en önemli noktadır.

İndirgenmeye benzer şekilde, sinterleme sırasında karbon veya azot gibi türler eklemek veya çıkarmak için atmosferler kullanılır. Karbon ilavesi ekseriyetle metan ( $CH_4$ ) gazı, azot ise molekül  $N_2$  veya amonyak  $NH_4$  gazları ile yapılır.

## **B.2. ATMOSFER BİLEŞİMLERİ**

Sinterleme atmosferi olarak hava azot, argon, oksijen, hidrojen ve çeşitli gaz karışımları kullanılır. Tüm kimyasal tepkimeleri kontrol etmek için, atmosferdeki safsızlık seviyesinin bilinmesi önemlidir. Sinterleme sırasında ne olacağını oksijen, karbon monoksit, metan, karbon dioksit ve su buharı gibi gazların miktarı belirler. Sinterleme için çeşitli atmosfer koşulları mümkündür:

- . Oksitleyici (karbon dioksit, su veya oksijen)
- . Nötr (argon, helyum veya vakum)
- . İndirgeyici (hidrojen veya karbon monoksit)
- . Hidritleyici (hidrojen veya amonyak)
- . Hidrit giderici (vakum veya argon)
- . Nitrürleyici (azot veya amonyak)
- . Karbürleyici (metan veya propan)
- . Karbon giderici (karbondioksit, su veya oksijen)

Bu atmosfer şartları tek değildir. Mesela hidrojen ve metan karışımı ile hem indirgeyici hem de karbürleyici ortam oluşturulabilir.

**ÇİZELGE 9.1. Sinterleme Atmosferlerinin Bileşimleri**

bileşen	hidrojen	azot-hidrojen	parçalanmış		saflaştırılmış
			amonyak	endotermik	ekzotermik
%N <sub>2</sub>	0	75-98	25	39	67
%H <sub>2</sub>	>99,9	2-20	75	39	13
%H <sub>2</sub> O	<0,01	0,001	0,004	0,8	<0,1
%CO	0,0	0,25	—	21	19
%CO <sub>2</sub>	0,0	0,05	—	0,2	<0,1
%CH <sub>4</sub>	0,0	0	0	0,5	0,5
ppm O <sub>2</sub>	10-25	5	10-35	10-150	10-200
çiylenme noktası, °C	(-70) – (-20)	(-75)- (-50)	(-50) – (-30)	(-16)-(-10)	(-10)



Hava pek çok oksit seramiklerin sinterlenmesinde kullanılır. Ayrıca, altın ve alüminyumun sinterlemesinde de başarılı bir şekilde kullanılır. Ancak hava su içeriğindeki değişimlerden dolayı kontrol edilemeyen atmosfer olarak kabul edilir. Bu bakımdan daha çok düşük performanslı seramik sistemleri için kullanılır.

Azot, hidrojen, su, karbon monoksit ve karbon dioksit karışımı gibi endotermik atmosferlerin maliyeti düşüktür. Endotermik gaz 6,5 kısım havanın 1 kısım doğal gaz ile katalitik tepkimesi neticesinde (genelde metan) üretilir. İlgili indirgeyici bir atmosfer, hava ve doğal gazın ekzotermik tepkimesi sonucu ortaya çıkan karbon dioksit ve su buharının giderilmesi neticesinde elde edilir.

Doğal gazdaki günlük değişimlerin, işlem kontrolünü zorlaştırmasından dolayı ekzotermik ve endotermik atmosferlerin kullanımını tavsiye edilmemektedir.

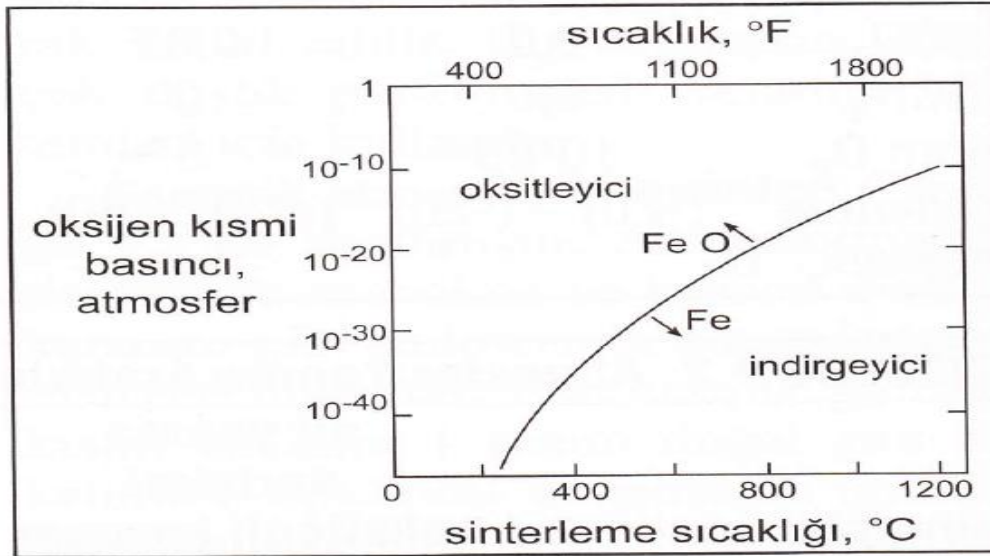
**ÇİZELGE 9.2. Atmosfer Yanma Aralıkları**

atmosfer	alt yanma derişimi oksijenli karışım	alt yanma derişimi havalı karışım	yüksek yanma sınırı havalı karışım
hidrojen	5	4	74
karbon monoksit	5	12	74
metan	18	5	15
amonyak	15	16	27

Çizelge 9.2'de hidrojen ve diğer atmosferlerin yanıcı olduğu bileşim aralığı verilmektedir. Hidrojen yüksek ısıl iletkenliğe sahip olup, soğutmayı ve ısıtmayı kolaylaştırır. Yüksek çığlenme noktası hidrojenin oksit indirgeme kabiliyetini azaltır ve atmosferi karbon giderici hale getirir.

## Vakum İşlemi

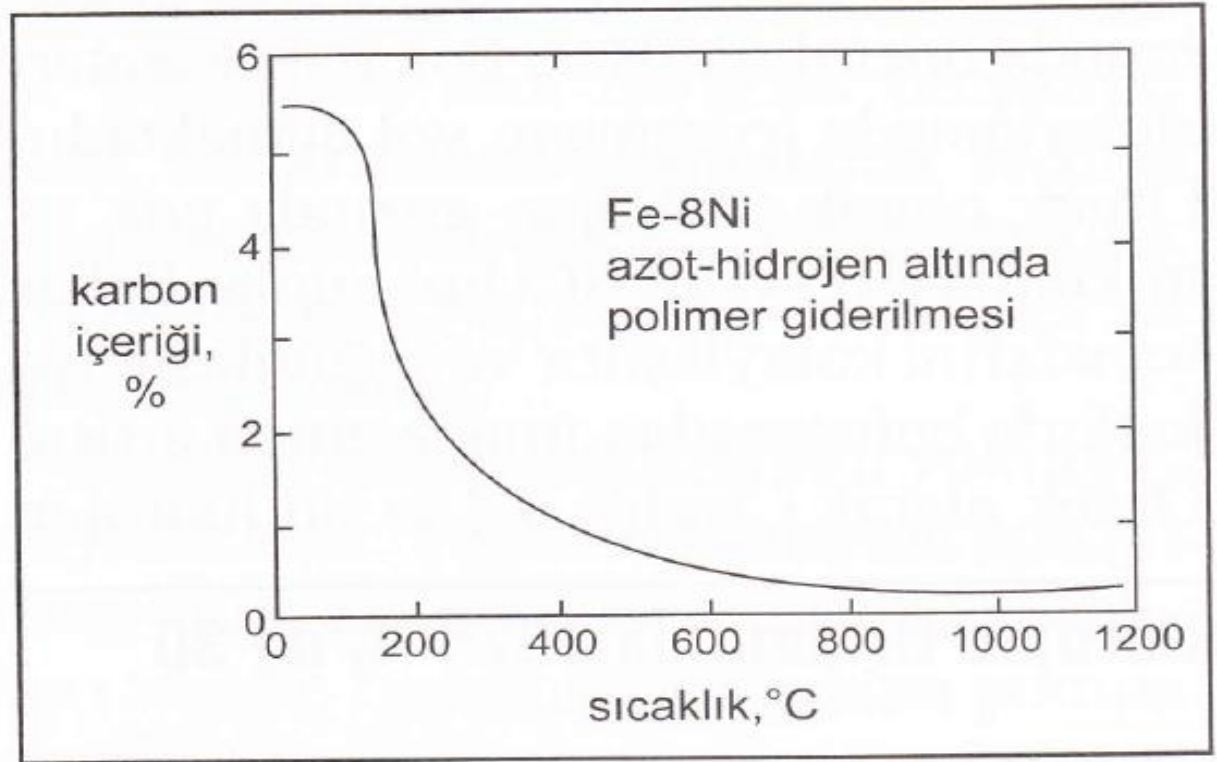
Vakum işlem, atmosferinin yokluğunu ifade eder. Vakum sinterleme için iyi izole edilmiş fırına ve ortaya çıkan buharı sürekli olarak dışarıya atan pompa düzeneğine ihtiyaç vardır. Bu bakımdan vakum altında sinterleme bir parti sinterleme işlemidir. Vakum sinterleme düşük basınçta sinterlemedir. Çünkü işlem atmosferindeki tüm gaz moleküllerini gidermek, uzayda bile mümkün değildir. Basınç genellikle normal atmosfer basıncı civarındadır. Vakum sinterleme sırasında düşük oksijen basıncı, oksitin çözünmesine ve indirgenmesine yol açar.



**şekil9.3.** Fe-FeO denge şartlarında sinterleme sıcaklığı-oksijen kısmi basınç ilişkisi. Çizginin üstündeki koşullarda demir oksitlenmekte, altında ise oksit, demir ve oksijen buharına ayrılmaktadır

## C-POLİMER YAKMA

Sinterleme sıcaklığına ısıtma sırasında ilk işlem şekillendirmede kullanılan polimerin giderilmesidir. Eğer polimer fırının yüksek sıcaklık kısmına taşınırsa, safsızlıklar parçanın bileşimini, özelliklerini ve boyutlarını değiştirir.





Polimerden kaynaklanan karbon seviyesi artan sıcaklıkla sürekli dūşer. Polimerler genellikle ısıl olarak metan, etan, bütan, propan, karbon monoksit, karbon dioksit veya su gibi küçük moleküllere ayrışır. Bu ayrışma 150 °C gibi düşük sıcaklıkta başlar, 350-450 °C'de artar ve 550 °C civarında tamamlanır.

Bazı polimerler (özellikle selüloz gibi jel bağlayıcılar) oksijen kullanarak giderilmez ise grafitte dönüşürler ve safsızlık olarak kalır. Atmosfer, polimer için tepkime kimyasalları sağladığından dolayı polimer yakma işleminde önemlidir. Oksijen içeren gazlar (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) 600-800 °C aralığında karbon polimer safsızlıklarını giderir. Hareket halinde olan gazlar yanma ürünlerini süpürür.

Bazı malzemeler polimerdeki karbon ile tepkimeye girer ve karbon giderilemez. Bu durumlarda düşük bozunma sıcaklığına sahip polimer kullanılmalıdır.

Yavaş ısıtma polimeri gidermek için en iyi yoldur. Ham parçalar, fırının yüksek sıcaklık kısmına girmeden önce en azından 650 °C sıcaklığa ısıtılmalıdır.

## D-ISI KAYNAKLARI VE ISI TRANSFERİ

Elektrik ile ısıtma sinterleme fırınları için en çok kullanılan yöntemdir. Fakat bazı durumlarda, özellikle seramik sinterlemede gaz-yakıtlı fırınlar kullanılmaktadır. Elektrikle ısıtma elemanı işlem atmosferi ve maksimum sıcaklığa bağlı olarak seçilir. Yüksek sıcaklıklar için en çok kullanılan ısıtıcı elemanlar grafit, volfram, molibden, molibden disilisit ve silisyum karbürdür.

Grafit, düşük maliyetli olup vakum sinterleme için çok kullanılır. Grafit sinterleme sırasında atmosferdeki oksijen ile tepkimeye girerek indirgeyici karbon monoksit gazı oluşturur.

Silisyum karbür, hava ortamında kullanıldığında verimlidir, bu nedenle ısıtıcıların sinterleme atmosferi ile teması koruyucularla önlenir.

Molibden ve volframın hava ile teması engellenmelidir. Böylece, ısıya dayanıklı metal ısıtıcılı fırınlar iki kısımdan oluşabilir;

biri iş parçasını ve işlem atmosferini içerir, dış kısım ise ısıtıcıları korur.

**ÇİZELGE 9.4. Fırın Isıtıcı Elemanları ve Kullanımları**

<b>ısıtıcı eleman</b>	<b>en yüksek sıcaklık, °C</b>	<b>atmosfer</b>
Ni-20Cr	1100	oksitleyici, nötr, indirgeyici, vakum
FeCrAlY-tipi	1150	oksitleyici, indirgeyici, karbon yakıcı
(Fe22Cr-6Al)	1425	nötr, vakum
silisyum karbür (SiC)	1250	indirgeyici, nötr
	1600	oksitleyici
molibden disilisit (MoSi <sub>2</sub> )	1100	indirgeyici, vakum
	1600	nötr
	1700	oksitleyici
alüminyum molibden disilisit (Mo (AlSi) <sub>2</sub> )	1600	tüm atmosferler
platin (Pt)	1700	oksitleyici, nötr, vakum
molibden (Mo)	1700	indirgeyici, nötr, vakum

## E-İŞLEM ÖLÇÜMÜ VE KONTROLÜ

Kaliteli ürün elde etmek için çeşitli sinterleme işlem parametreleri dikkatle izlenir. En azından sıcaklık, atmosfer akış debisi ve atmosferin bileşimi izlenen parametreler arasındadır. Isıl çiftler, en çok bilinen sıcaklık ölçüm ve kontrol aygıtlarıdır. Bunlar, uç kısmında birleştirilmiş farklı bileşimdeki iki telden oluşur. Uç kısmın ısınması ile voltaj üretilir ve üretilen bu voltaj sıcaklık ile orantılıdır.

Diğer bir yol, optik emisyon spektra vasıtasıyla fırın içine bakılarak direk olarak parça sıcaklığını ölçen optik veya kızıl ötesi pirometrelerin kullanılmasıdır. Sinterleme sırasında afa atmosfer tepkimelerini kontrol etmek ve sıcaklık bölgelerini haritalamak mümkündür. Böylece ürünün bileşimi kontrol edilebilir. Uygun koşullar sağlanmak amacıyla bir yazılım ile gaz akış hızı, giriş noktaları ve gaz bileşimi ayarlanabilir. Bu fonksiyonu destekleyen sensörler, elektrik iletkenliği oksijen veya nem seviyesine bağlı olarak değişen alümina veya zirkonya hücreleri, karbon bileşenlerini tespit eden kızıl ötesi detektörler, hidrojen için ısıl iletken köprüleri veya nem için elektroliz hücreleri olabilir



## **F-ALTLIKLAR**

Sinterleme işlemleri çoğunlukla parçaların tepsi, plaka veya bant üzerine yerleştirilmesi ile yapılır. Destekler, sinterleme safhasında parçaların birbirine veya fırına kaynaklanmasını önler. Hassas parçaların sinterlemesinde parçanın şeklini korumaya yardımcı olmak amacıyla destekler kullanılır. Bu destekler; çelik, paslanmaz çelik, molibden, silika, grafit alümina ve diğer yüksek sıcaklık malzemelerinden imal edilir

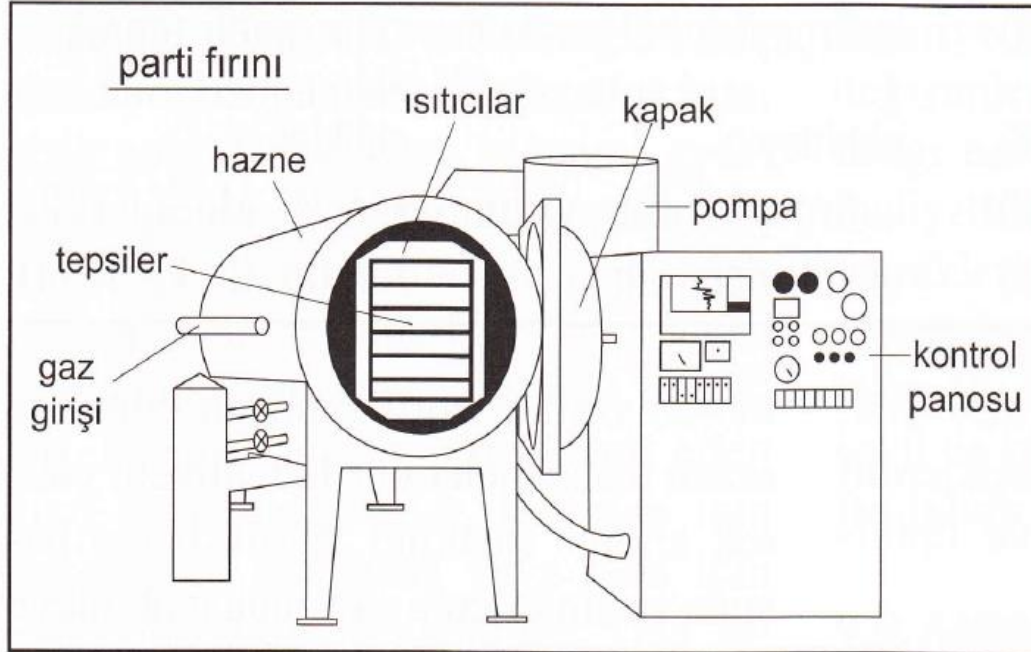
En dengeli altlık adayları CaO, TiN, HC, CeS ve HB2 gibi bileşiklerdir. Fakat bu bileşikler pahalı ve üretilmeleri zordur. Bu bakımdan alümina esaslı malzemeler daha çok kullanılır. Gözenek içeren altlıklar ısı kütleyi azalttığından enerji tasarrufuna yol açar.

## **G. FIRIN TASARIMI**

Sinterleme fırını, sinterleme döngüsünde sıcaklığı ve zamanı kontrol eder. İlaveten atmosferi tutar, yağlayıcı ve bağlayıcıların giderilmesini sağlayarak sinterleme sonrası ısı işlem imkanı yaratır.

## G.1.PARTİ FIRINLARI

Parti fırın sinterlenecek malzeme ile yüklenir ve sıcaklık döngüsü bir kaç saat uygulanır. Her bir döngü farklı programlanabildiği için parti fırınların kullanımı esnektir. Ayrıca, vakum sinterleme ve basınç-takviyeli sinterleme sadece parti fırınlarda yapılabilir. Genellikle, fırın cidarları çalışma bölgelerinin etrafındaki yansıtıcı ısı kalkanları ve dıştan su soğutma ile sürekli soğutulur. Hazne çapı büyüdükçe sinter yükü artmakta 500 kg'a kadar erişmektedir.



*Şekil 9.7. Parti sinterlemede parçalar soğuk fırına yüklenir. Kapak kapatıldıktan ve işlem atmosferi oluşturulduktan sonra parçalar sinterleme sıcaklığına ısıtılır.*

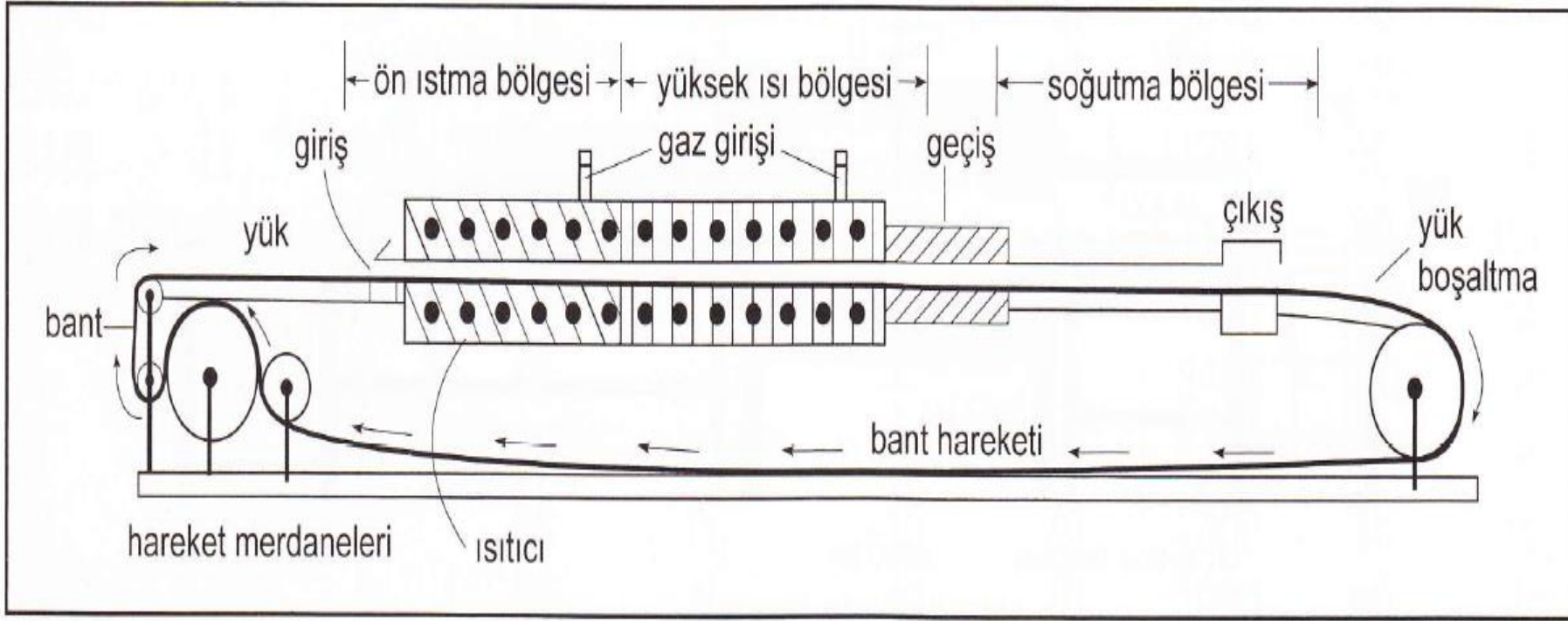
## G.2.SÜREKLİ FIRINLAR

Sürekli bir fırında, parçanın konumu zamana karşı taşıyıcı bant veya itici konveyörler kullanılarak ardışık bölgelerde kontrol edilir. Genellikle, konveyörler fırın kullanım sıcaklığını sınırlamaktadır, konveyörler tel örgüden imal edilir. Sürekli bir fırında ilk bölgeler polimer yakma ve kirletici giderme için kullanılır. Geçiş bölgesinden sonra yüksek sıcaklık bölgesinde parça sinterleme sıcaklığına çıkar. Yüksek sıcaklık bölgesinin uzunluğu sinterleme sıcaklığında uygun bekleme süresini sağlayacak kadardır. Soğutma, parçanın yüksek gaz akışına maruz kaldığı son bölgede olur. Gaz giriş ve çıkışlarının değişik bölgelere yerleştirilmesi ile her bir fırın bölgesi farklı atmosfere sahip olabilir.

## H. SİNERLEME DÖNGÜLERİ

Uygulamada toplam sinterleme işlemlerinin %70'i sıvı faz içerir. Teknik açıdan bakıldığında sıvı faz oluşturmak için en düşük bir sıcaklığın aşılması gereklidir. Ayrıca, sinterleme döngüleri parça kimyasal bileşimini ayarlamak, karışım tozlarını homojenleştirmek, boşlukları gidermek ve istenilen mikro yapıyı elde etmek için tasarımlanır.

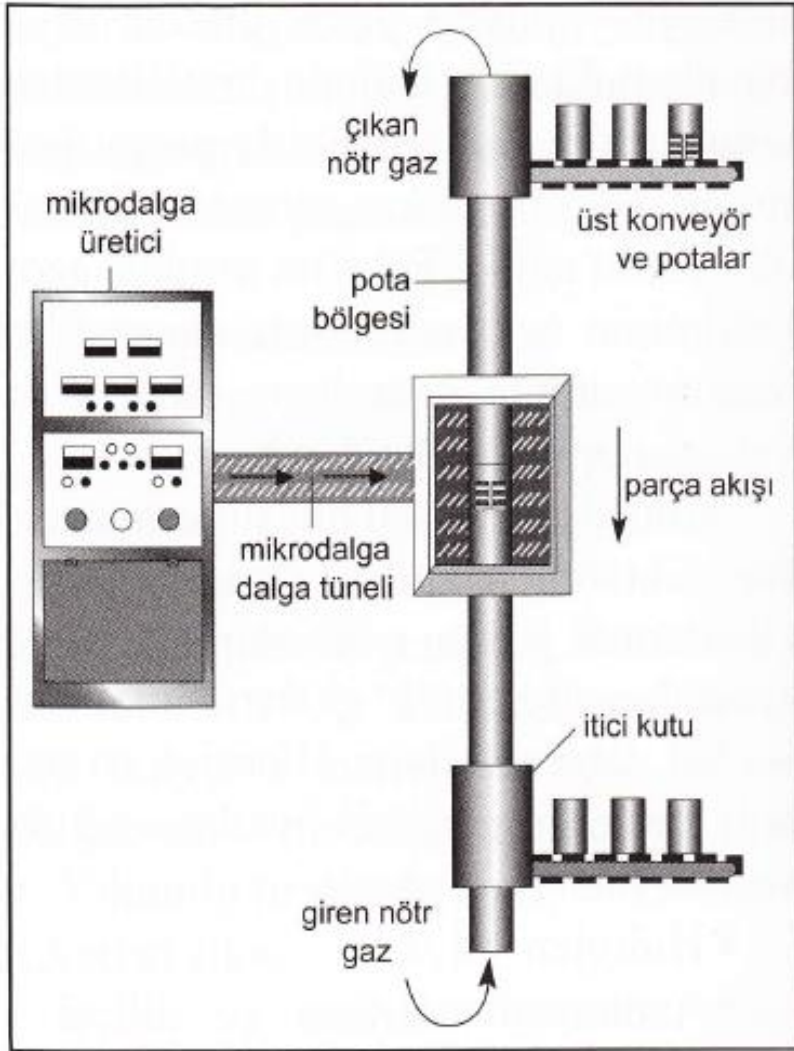
# Sinterleme Pratiği



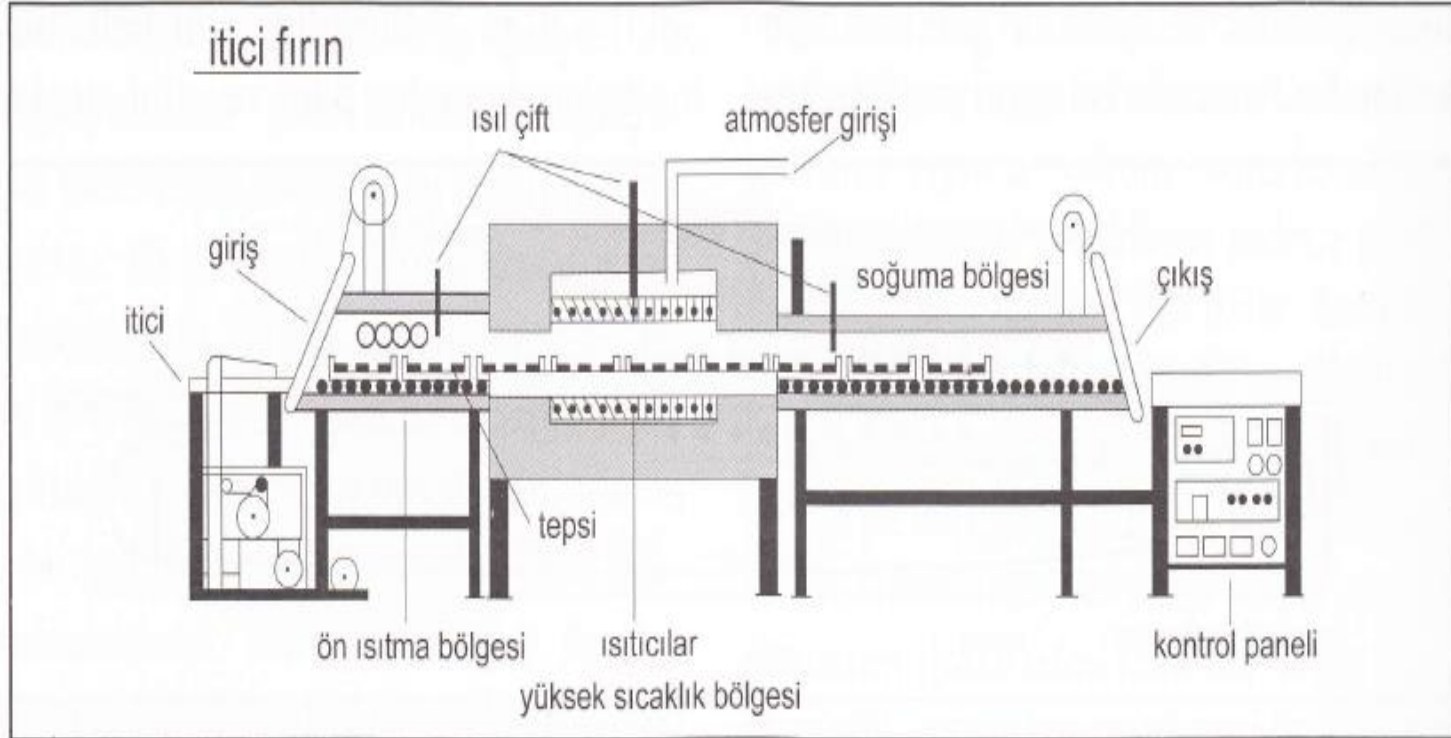
*Şekil 9.8. Örgü bant fırını, bant ömrünü uzun tutmak için üst sıcaklık düşük tutulduğu sürece, en verimli sürekli sinterleme fırınıdır. Parçalar bant üzerine yüklenir ve bant sürekli olarak fırın boyunca hareket ettirilir.*



# Sinterleme Pratiği



*Şekil 9.11. Mikrodalga sinterleme fırınının şematik gösterimi. Fırında tasarımı yapılan kaldıraç mekanizması ile parçalar peş peşe mikrodalga alanından geçerek sinterlenir (Mahlos Dennis'den alınan veriler esas alınmıştır).*



*Şekil 9.10. Sürekli itici fırında tepsi ler art arda dizilmiş olup ön ısıtma ve yüksek sıcaklık bölgelerinden itici vasıtası ile geçerler.*

## I. İŐLETME MALİYETLERİ

Sinterleme işleminin maliyeti pahalı sinterleme fırınları ve enerji, atmosfer, tamirat, işçilik gibi değişken maliyetleri içerir. Maliyet, kapasite ve sıcaklık arttıkça yükselir. Vakumlu fırınlarda maliyet iki veya üç katına çıkar. İşçilik ve enerjinin yanında sinterleme atmosferi de diğer önemli bir değişken maliyettir. Sinterleme ile parça üretimine yeni başlarken atmosfer dışarıdan temin edilir. Tüketim arttıkça azot üretiminin tesiste yapılmasına geçilir.

Vakum altında sinterleme için fırına vakum pompaları bağlanır. Atmosfer maliyeti bileşime ve tüketim miktarına bağlıdır.

Göreceli olarak, ekzotermik gaz en ucuz olanıdır. Buna karşılık endotermik gazların maliyeti iki kat daha pahalıdır. Hidrojen en pahalı gazdır.

A scanning electron microscope (SEM) image showing a dense field of spherical particles of various sizes. The particles are light gray against a dark background, with some showing surface texture and small protrusions. A bright green horizontal bar is overlaid on the image, containing the text 'Serbest Şekilli Üretim'.

# Serbest Şekilli Üretim



## TAKIMSIZ ÜRETİM KAVRAMI

- Toz teknolojileri her zaman fazla miktarda üretim üzerine yoğunlaşmıştır. Bu gibi durumlarda, aynı parçadan çok sayıda, hatta bazen yılda 1 milyon adet üretmek için dayanıklı takımlar imal edilir. Takım maliyeti çok sayıda parça üretimi ile ekonomik hale getirilir. Ancak, pek çok uygulamada sadece birkaç parça üretimi gerekir. Bu durum çoğu zaman sıkıntılara yol açar. Toz teknikleri özel malzemeler ve mikroyapılar ve üstün performans sağlamasına rağmen takım maliyeti uygulamayı ancak büyük miktarlardaki üretimlerle sınırlar.

## TAKIMSIZ ÜRETİM KAVRAMI

- Takım maliyeti engelini ortadan kaldırmak için bir grup üretim teknikleri ortaya çıkmıştır. Bunlar aşağıdaki değişik teknikleri içerir:
- **Çıkarıcı yöntemler:** Sinterleme öncesi büyük boyutlardaki ham parçadan talaş kaldırma,
- **İlave yöntemler:** İmalat bir bilgisayar ile kontrol edilir, istenilen ham şekle tozlar yapıştırılır ve ardından sinterlenir,
- **Doğrudan imalat yöntemleri:** Bir bilgisayar kontrollü lazer veya diğer enerji kaynağı yüksek sıcaklıkta doğrudan istenilen şekli oluşturur,
- **Püskürtmeli imalat yöntemleri:** Ergiyik damlacıkları veya yüksek hızlı, parçacıklar istenilen parçanın imalatı için kullanılır.

## TAKIMSIZ ÜRETİM KAVRAMI

Serbest şekilli imalat yöntemlerini destekleyen husus, imalatı yapılacak parçanın bilgisayardaki resmi ile imalat yönteminin eşleştirilebilmesidir. Çoğu durumda bilgisayardaki tasarım dijital olarak imalatı gerçekleştirecek makineye taşınır. Böylece gerçekten takımsız ve hatta kağıtsız imalat yapılır.

## HAM TALAŞ KALDIRMA

- Ham talaş kaldırma ihtiyaçtan ortaya çıkmış bir çıkarıcı tekniktir. Çoğu zaman bir geliştirme projesinin başlangıç aşamalarında sadece bir kaç parça gereklidir. Projenin ilerleyen aşamalarında tasarım muhtemelen değişeceği için takım maliyeti bir engeldir. Şayet takım maliyeti **5000** dolar ve üretilecek deneme sayısı **10** ise, numune başı takım gideri **500** dolar olacaktır. Bu durumda bir seçenek büyük boyutlu bir parçadan oyma yöntemi ile prototipi üretmektir.



## HAM TALAŞ KALDIRMA

Şayet yüksek hızlı kesici takım kullanılır ve küçük kesmeler yapılırsa, ham talaş kaldırma oldukça kolaydır. Takım işlenecek parçada çatlak oluşturmadan toz parçacıkları kaldırır. Ham parça zayıf olduğu için, işleme sırasında takımda herhangi bir aşınma meydana gelmez. Bununla beraber, talaş kaldırmada toz parçacıkları kesilmediği için, yüzey pürüzlülüğü toz tanecik boyutu ile sınırlıdır. Bundan dolayı ham işleme sadece toz tanecik boyutuna göre çok büyük yüzey geometrileri söz konusu olduğunda kullanılır.

## HAM TALAŞ KALDIRMA

Başlangıçta, ham talaş kaldırma prototip parçaların üretiminde kullanılmaktaydı. Bununla beraber, bazı uygulamalarda fikir olgunlaştı ve az miktarlarda parça üretiminde standart üretim haline geldi. Örnek: Metal kesiciler, şekillendirme kalıpları, delme kalıpları üretimi vs.

## KATMAN TEKNOLOJİLERİ

Tabakalar istiflendikleri zaman arzu edilen şekil ortaya çıkmaktadır, Bu yöntemin ilk uygulamalarından birisi olarak üç boyutlu bir nesnenin bilgisayarda dilimlenmesi işlemi gösterilebilir. Meydana gelen iki boyutlu dilimin profili yapışkan kağıttan lazerle kesilerek çıkarılır. Her takip eden bilgisayar dilimlemesi kağıt kalınlığı ile karşılaştırılmak üzere seçilir. Her kesimden sonra kağıt tabaka üç boyutlu model üzerine istif edilir. Bu işlem önerilen binaların mimari modelleri ve mühendislik tasarımında boyut, şekil ve uyma analizi bakımından başarılı olmuştur.

## KATMAN TEKNOLOJİLERİ

Daha sonraları katman teknolojisi, tabakalardan üç boyutlu cisimler yapmak için lazer ve u.v ışıkla sertleşen polimerlere yönelmiştir.

Metal ve seramik tozlardan katmanlar üretmek için platform oluşturmuştur. İşlem yollarının iki türü vardır:

- Toz tabakayı yaymak ve daha sonra iki boyutlu profile yapıştırmak
- İki boyutlu toz tabakayı oluşturmak ve daha sonra profili mevcut tabakaya uygun şekilde katmanlamak



## KATMAN TEKNOLOJİLERİ

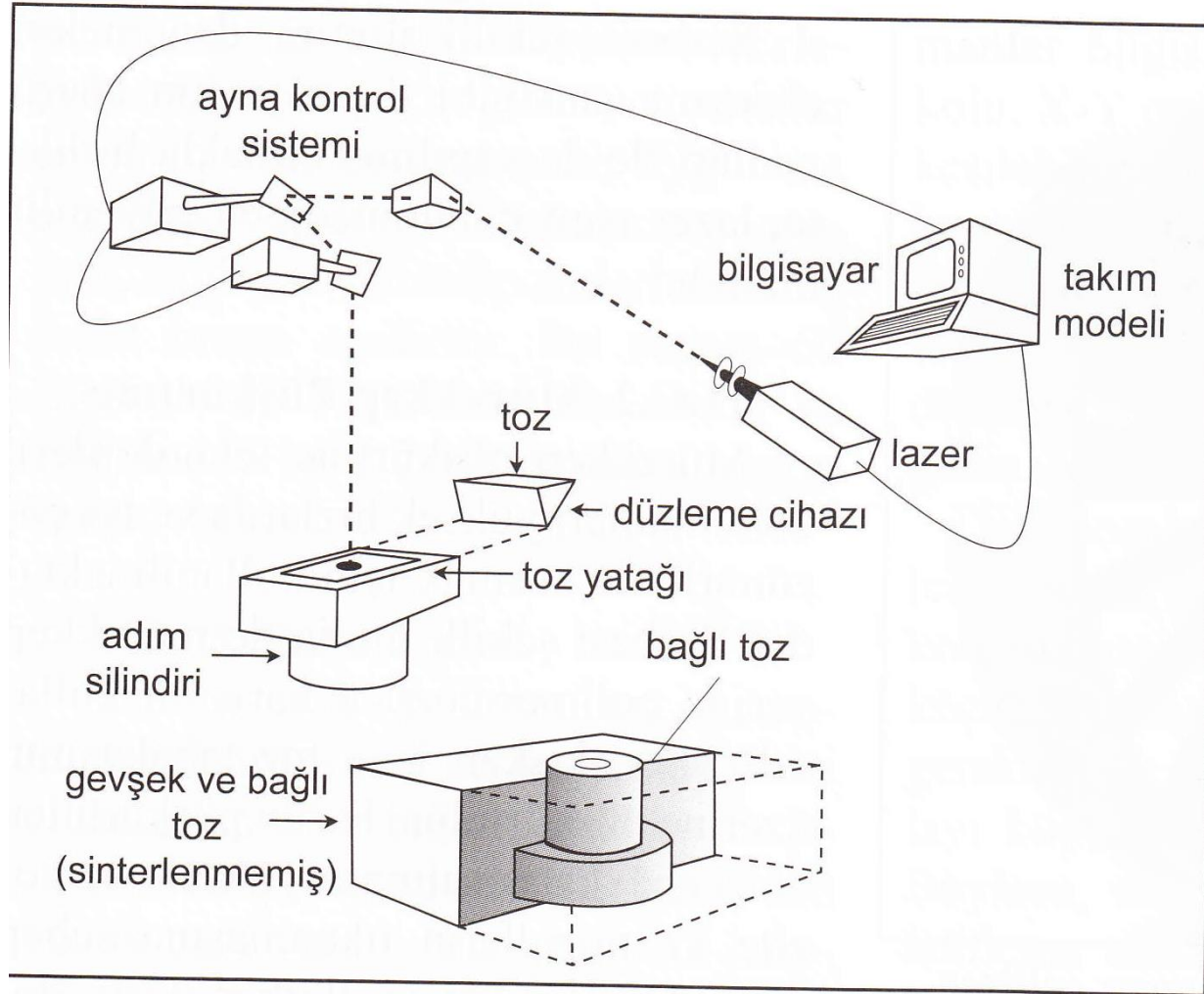
Her tabaka belli bir kalınlıkta olduğu için, bazı eğri yüzeyler merdiven basamakları şeklinde olabilir. Katmanlama işleminden sonra, şekillendirilmiş toz kütle bağlayıcılarından arındırılıp sinterlenir. Ham şekil sinterlemedeki çekme dikkate alınarak biraz büyük yapılır.

Başlıca Kullanım Alanları: Plastik enjeksiyon kalıpları prototipleri, roket motoru parçaları, sert metal petrol sondaj uçları, sanatsal şekillerin ve mücevherlerin üretimi

## KATMAN TEKNOLOJİLERİ

- **Lazer:** Üç boyutlu cisim polimer kaplanmış toz tabakalarının bir araya tutturulmasıyla şekillendirilir. Cisim içerisinde düşünülen herhangi bir dilimde, serbest toz-polimer karışımı lazer ile ısıtılır. Lazer gücü polimeri ergitecek şekilde ayarlanır, böylece ham kütleyi oluşturan parçacıklar arasında yapışkan bir bağ meydana gelir. Bağ oluşturulması gereken alanlara lazer ışını gönderilir. Lazer ışını gönderilmeyen alanlardaki tozlar ise yapışmamış halde serbest kalır. Daha sonra cisme bir sonraki dilime denk gelen toz tabakası serilir ve lazer yeni tabakayı aynı şekilde bağlar. Birbiri ardına yapılan tabakalarla cisme son şekli verilir.

# Serbest Şekilli Üretim



## KATMAN TEKNOLOJİLERİ

- **Mürekkep Püskürtme:** Dökümanları yüksek hızda ve iyi çözünürlükte basmak için kullanılır. Serbest şekilli üretimde mürekkep yerine polimer-çözücü karışımı kullanılır. Bu akışkan ince toz tabakasının üzerine püskürtülür. Tozun püskürtülen akışkana karıştırılması yüksek viskozite ve nozulların tıkanmasına sebep olur. Damlacıkların darbesinden dolayı serbest toz hareketleri oluşur ve parçada hassasiyet bozulur. Damlacık toz tabakası üzerine düştükten sonra, çözücü buharlaşarak polimeri terk eder ve polimer enjeksiyonla kalıplanmış ham kütledekine benzer şekilde parçacıklar arasında bağlayıcı görevi yapar. Mukavemet sağlamak için yeteri kadar bağlayıcı püskürtülmeli ve tabakalar birbirine sıkıca bağlanmayı sağlayacak kadar ince olmalıdır.



## KATMAN TEKNOLOJİLERİ

- **Ekstrüzyon:** Termoplastik polimer toz karışımının ekstrüzyonu iki boyutlu tabaka oluşturmanın bir başka yoludur. Bir şırıngaya benzeyen nozulun 0,12 mm'den küçük çapı vardır. Şırınga nozul hareket ettikçe, Liç boyutlu cismi oluşturacak olan polimer-toz kütlelerini istenilen yerlere biriktirir. Bir destek malzemesi boşlukları geçici olarak doldurmak için kullanılır. Bu işlem dirsek, askı ve diğer geometrik şekiller için gereklidir. Ekstrüzyon nozulunun yolu bilgisayar tarafından kontrol edilir. Böylece daha önceden bilgisayarda saklanmış resme benzer katı cisim oluşturulur. Ekstrüzyon nozulu çapı artarken üretim hızı da artar, ancak boyut hassasiyeti azalır. Birçok teknoloji benzer fikirlerle çalışır, ısıtılmış nozuldan ılık polimer-toz besleme stoğu ekstrüze edilir. Besleme stoğu enjeksiyon kalıplamada kullanılanlara benzerdir, böylece bağlayıcı giderme ve sinterleme çevrimleri de toz enjeksiyon kalıplama ile aynıdır.

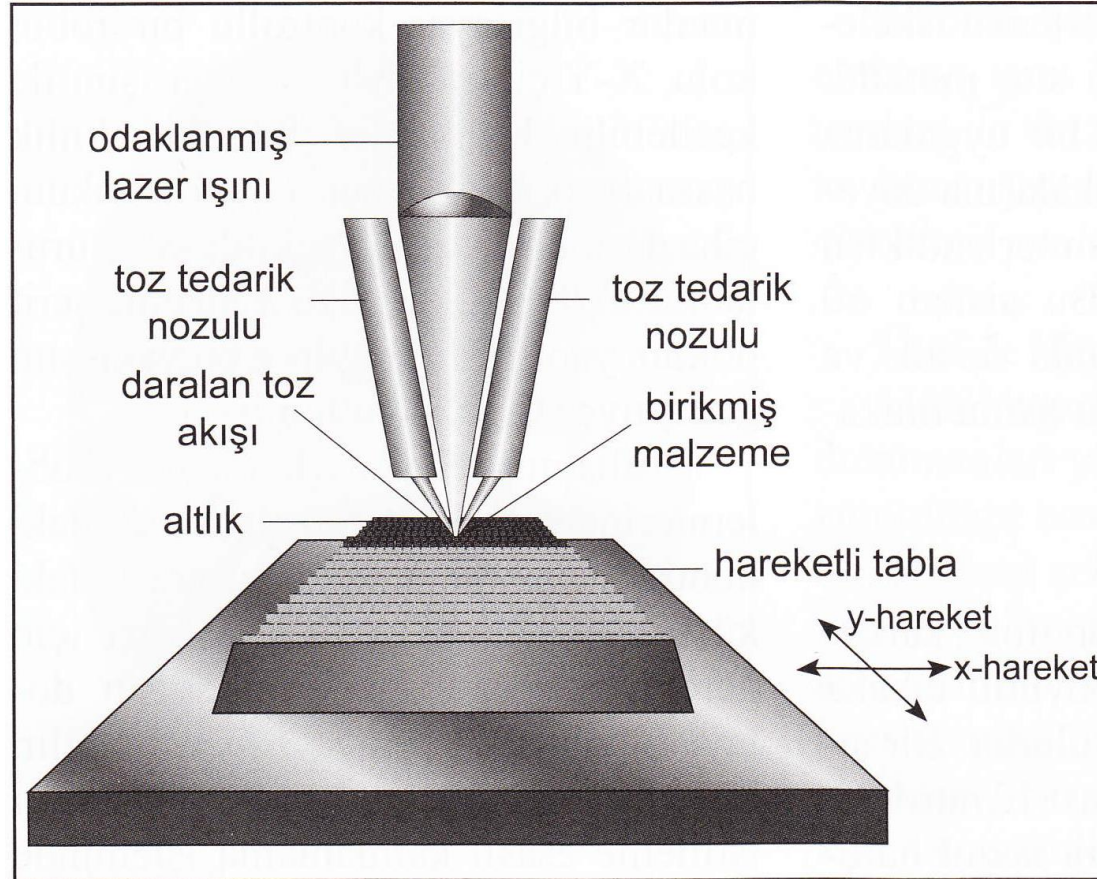
## KATMAN TEKNOLOJİLERİ

- **İstiflenmiş Tabakalar:** Katmanlama yaklaşımının bir seçeneği şerit döküm toz tabakalarından katmanlar kesmektir. Bu katmanlar daha sonra üçboyutlu cisim oluşturacak şekilde sırasıyla istiflenir. Katmanlar bilgisayar kontrollü bir robot kolu, X-Y çizici veya bir lazer ışını ile kesilebilir. Katmanlar yüksek kalınlık hassasiyeti ile geleneksel şerit döküm cihazlarında hızlı bir şekilde oluşturulabilir.
- İstiflenmiş tabakaların önemli problemlerinden birisi katmanlar arasındaki **konum hatasıdır**. Bazı şekillerde çok sayıdaki katmandan dolayı büyük çarpılmaya sebep olabilir. Böylece, önceden kesilmiş tabakaları istifleme esaslı katmanlama işleminde hassasiyet, üretim hızı arttıkça düşer.

## YÜKSEK GÜÇ LAZERİ

Yüksek güçlü lazer işlemlerinde odaklanmış bir ışına toz beslemesi yapılır, böylece ışının hemen yanında yarı katı bir havuz oluşturulur. Uygulamaların çoğunda, bol toz sağlamak için çoklu toz besleyicileri kullanılır. Son gelişmelerle, akışkan tekniği kullanılarak daha homojen toz dağılımı elde edilmektedir. Lazer ışının pozisyonu, tabla hareketinin bilgisayarla kontrolü ile ayarlanır.

# Serbest Şekilli Üretim





## YÜKSEK GÜÇ LAZERİ

Yüksek Güç Lazer işleminin üstünlüklerinden biriside çoklu toz besleyicilerden kaynaklanır. Farklı parçacıkları karıştırarak kompozit veya çözünmeyen alaşımlar elde edilir. Bunlara ilave olarak, yüksek soğutma hızları tane boyutunu küçülterek sinterlenmiş parçalarda mümkün olandan daha fazla mukavemet elde edilir.

Yüksek Güç Lazerlerini kullanarak takım üretiminde yeni tasarım seçenekleri de vardır. Mesela, geleneksel talaşlı imalatla üretimi mümkün olmayan soğutma kanalları bu uygulamayla üretilebilir.

## YÜKSEK GÜÇ LAZERİ

Lazer sonrası işlem yavaştır. Bir takım seti üretimi zamanının ortalama %40'ını son yüzey hazırlama aldığından, doğrudan lazerle üretilmiş kaba yüzeyler hızlanma sağlar. Ancak bir günde takım hazır olmaz.

Diğer uygulamalarından bahsedecek olursak;

- Otomotiv sanayi
- Savunma sanayi
- Uzay sanayi

bu alanlarda sınırlı sayıda üretimlerde kullanılırlar.

## PÜSKÜRTMELİ ŞEKİLLENDİRME

Püskürtme boyamaya benzer bir şekilde bir altlık üzerine parçacık veya damlacık biriktirme işlemidir. Biriktirme işlemi her seferinde bir parçacık ile ;

- ya bir kaplama
- ya serbest ince duvarlı bir cisim
- ya da bir kütle oluşturur.

## PÜSKÜRTMELİ ŞEKİLLENDİRME

Püskürtme şartları, çarpma sırasında yarı katı parçacıklar oluşturacak şekilde ayarlanır. İki aşırı uç vardır:

1. Çarpma anında ergiyik haldeki birikintiler
2. Çarpma anında katı haldeki birikintiler

Bunların ilki **ısıp püskürtme** ikincisi **soğuk püskürtme** olarak bilinir.



## PÜSKÜRTMELİ ŞEKİLLENDİRME

### *Püskürtmeli Biriktirme*

- Ön şeklin sıcak ve parçacıklarında **yarı katı** olduğu zaman altlığa en iyi yapışmayı gerçekleştirir.
- Gelen parçacıklar **ergiyik** olduğunda, sıçrama ve damlacık fişkırmasından dolayı işlemi verimsiz kılar.
- Gelen parçacıklar **katı** olduğunda, altlığa yapışmadan geriye sekerler.
- **En yüksek yapışma** verimliliği parçacıklar içindeki sıvının hacimsel olarak %30-%50 arasında gerçekleşir.
- %50 olduğu zaman ise **en yüksek yoğunluk** elde edilir.

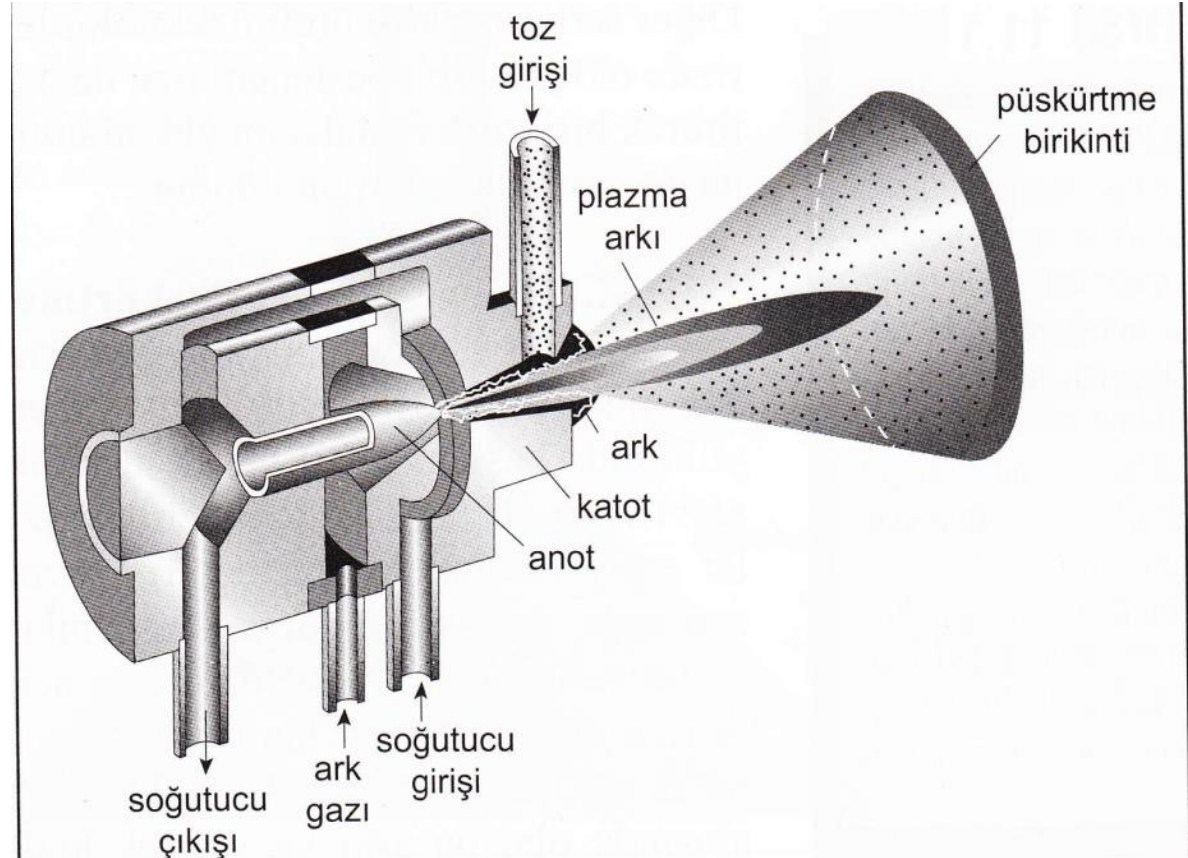
## PÜSKÜRTMELİ ŞEKİLLENDİRME

### 1. Isıl ve Plazma Püskürtme

- Kaplama oluşturmak için tozları ısı püskürtülmesi 1900'lerin erken yıllarında başlamıştır. Yüksek sıcaklık alevi veya plazma alevine akıtılan tozlar ergiyerek damlacık oluşturur. Aynı zamanda, gaz ortamında kalan damlacıklar hızlanarak püskürtülür ve hemen hemen tam yoğun bir kaplama oluşturacak şekilde birikirler. Isı kaynakları arasında plazma arkı ve yüksek hızlı oksijen-yakıt (hidrojen veya hidrokarbon)yanma arkları vardır. Alevden çıkış hızları genellikle 100 m/s'nin altındadır.Patlmalı alevlerde ise parçacık hızı 1000 m/s'den daha fazladır. Yoğun biriktirme oluşturmak için, parçacık hızlarına göre ergime seviyesi ayarlanır.

# Serbest Şekilli Üretim

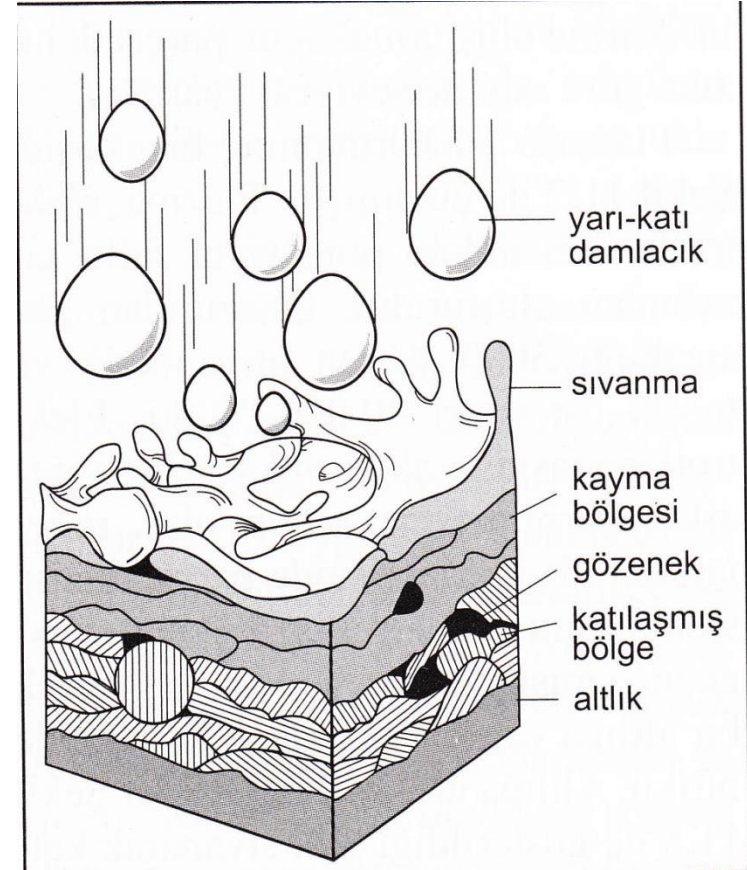
Plazma, elektrotlar arasındaki potansiyel farkı tarafından oluşturulur. Oluşturulan gaz sıcaklığı  $5000^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindedir ve teorik üst sınırı  $30.000^{\circ}\text{C}$  dir. Elektrotlar arasında akan yüksek hızlı gaz arkın çarpılmasına sebep olur, diğer taraftan da ark içerisinde parçacıkların taşınmasını sağlar. Plazma arkındaki geçiş sırasında parçacıklar ergiyerek bir altlığa yarı katı damlacıklar halinde birikir.



# Serbest Şekilli Üretim

Plazma arkındaki geçiş sırasında parçacıklar ergiyerek bir altlığa yarı katı damlacıklar halinde birikir. Altlığa ulaşan damlacıklar şekilde gösterildiği gibi sıvanarak katmanlı yapı oluşturur. Ergime entalpisi, ısı kapasitesi ve yoğunluğun artması ile bir malzemenin ergitilmesi de zorlaşır. Plazma arkı içindeki kısa bekleme zamanı göz önüne alınırsa, yeterli ısıtma için parçacık boyutunun küçük olması gereği anlaşılır.

Eğer damlacıklar uçuş sırasında katılaşırsa veya parçacıklar alev içinde ergimezse, altlığa çarpma sırasında geri sıçrar.





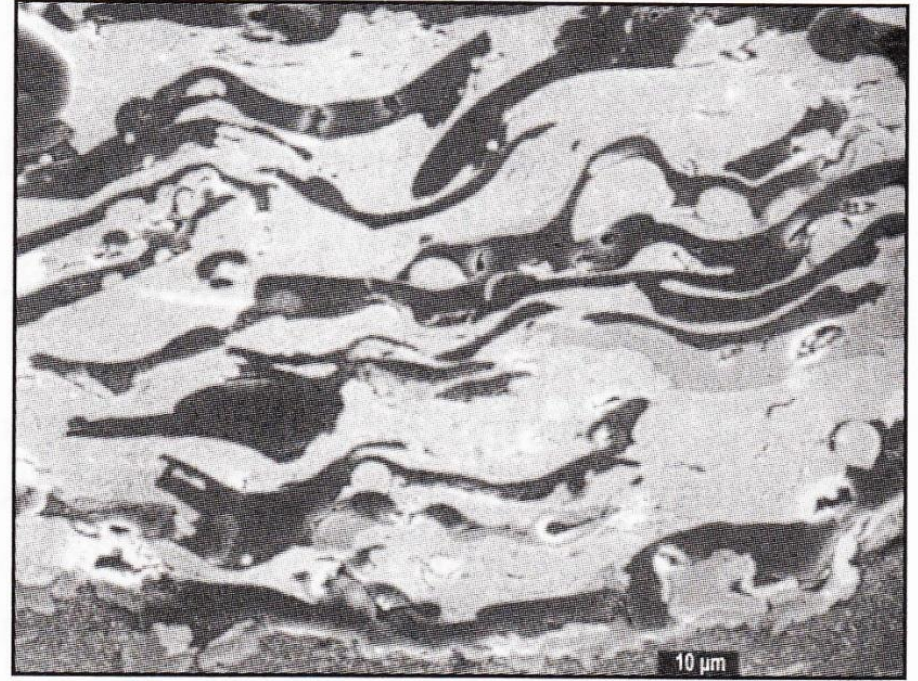
- Bununla beraber, parçacık boyutu çok küçükse aşırı ısınır ve buharlaşır. Kullanılabilir en büyük parçacık boyutu,  $D_L$ , malzeme ısıl yayılım katsayısı ( $\alpha$ ) ve plazma arkında bekleme zamanı,  $t_D$  yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ilişkilidir:

$$D_L = 3 (\alpha t_D)^{1/2}$$

- Ark içinde bekleme zaman  $10^{-4}$  s civarında olduğundan, çoğu malzeme için parçacık boyutunun üst sınırı  $100 \mu\text{m}$  civarındadır. Çoğu zaman  $40 \mu\text{m}$  ile  $80 \mu\text{m}$  arasındaki parçacıklar plazma püskürtme için uygundur.

# Serbest Şekilli Üretim

- Eğer işlem atmosfer basıncında yapılıyorsa, biriktirilen kütlelerin yoğunluğu, genellikle teorik yoğunluğun %85'i kadardır. Püskürtme işlemi vakum ortamında yapıldığı zaman, teorik yoğunluğun ,%99' una ulaşmak mümkündür.
- Biriktirilmiş bir mikro yapı örneği şekilde gösterilmiştir. Örnekte, nikel ve alümina tozları karışımı birlikte püskürtmüştür. Bu özel mikro yapıları sayesinde diğer üretim teknikleri ile elde edilemeyen özellikler bileşimi elde edilir. Bundan dolayı püskürtme teknolojileri jet motorları, güç türbinleri, korozyon ve aşınmaya dirençli uygulamalar için oldukça caziptir.

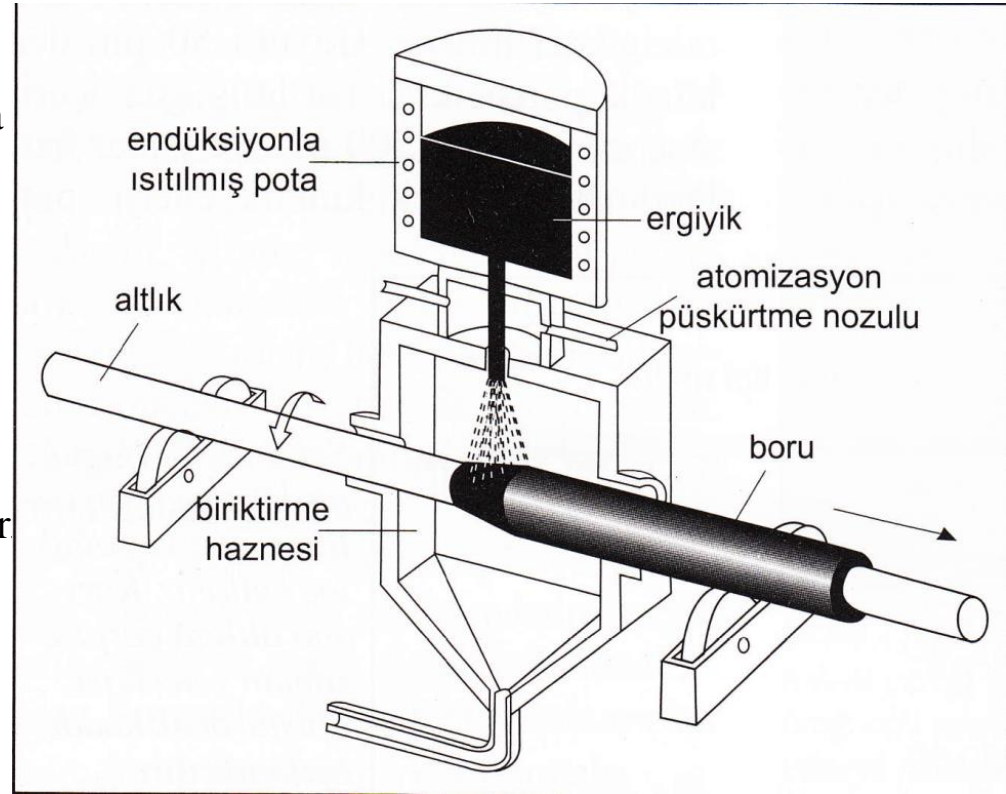


*Şekil 11.9. Nikel alümina toz karışımından plazma püskürtme ile biriktirilmiş kompozit mikroyapısının taramalı elektron mikrofotografı (fotoğraf: Karl Shaw).*

## Yarı - Katı Püskürtme

Püskürtme şekillendirmenin düşük hızlı bir çeşidi ergiyik metalle başlar ve bir altlık üzerine damlacıklar püskürtür. Bu tip püskürtme, ergiyik metalin atomizasyonuna ve oluşan damlacıkların atomizasyon nozuluna yakın bir yere yerleştirilmiş olan altlık üzerinde biriktirilmesine bağlıdır. Bir çeşidi asal gaz atomizasyonu ünitesi ile çalışırken, bir diğeri toz besleyicisi yerine ergiyik metal potası bulunan ısıl püskürtme gibidir. Şekil de ergiyik metal potası ve atomizasyon nozulu kullanımı gösterilmiştir. Burada, püskürtme altlık üzerine sıvanarak biriktirilmektedir.

Damlacıkların yarı katı halde hedefe ulaşacakları şartlardaki püskürtme faydalı kesme hareketine yol açarak parçacıklar arasındaki bağı geliştirir.



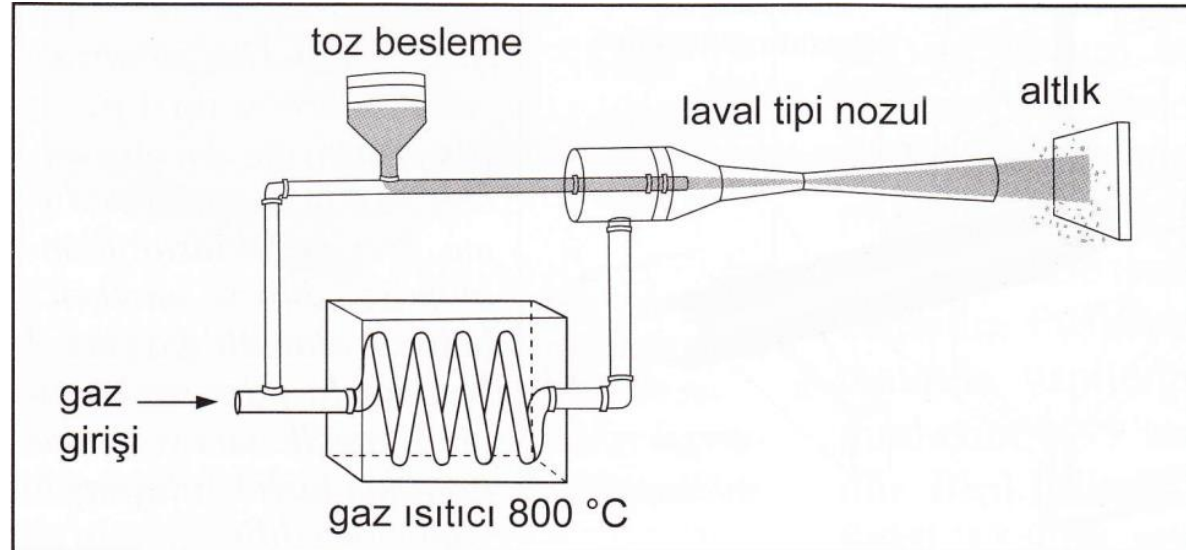
- Biriktirme sonunda soğuk altlık ısıyı hızla çeker. İyi şartlarda püskürtme yapıldığında, biriken kütlenin yoğunluğu %98 ve tane boyutu ise hızlı soğumadan dolayı küçüktür. Gerçekten de biriken kütle döküm veya dövmede mümkün olandan daha homojendir. Seramik takviye fazları püskürtme alevine ilave edilerek kompozitler oluşturulabilir. Bazı durumlarda ürün doğrudan kullanım için yeterince yoğunluğa sahipken, diğer durumlarda sıcak dövme, ekstrüzyon veya işleme gerektirir. Tipik malzeme oldukça alaşımlandırılmıştır. Buna bağlı olarak küçük damlacık hacmi ayrışmayı en aza indirir. Sadece basit şekiller püskürtme ile üretilebilir, çoğu üründe biriktirme sonrası talaşlı imalat gerekir
- Bu işlem hali hazırda demir , nikel , bakır ve alüminyum alaşımlarına uygulanmaktadır. Yeni püskürtme şekillendirme çeşitlerinde damlacıklarla atmosfer arasında bileşik oluşturacak tepkimeler meydana gelir. Mesela, demir-alüminyum alaşımının azot atmosferinde püskürtülmesi ile birikintide alüminyum nitrür çökeltisi dağılımı oluşur.



## Soğuk Püskürtme

Parçacık hızının çok yüksek olduğu durumlarda, çarpma sırasında parçacıkları yarı katı hale getirecek kadar sürtünme ile ısı oluşabilir. İşlem soğuk püskürtme olarak adlandırıldığı halde, gerçekte gazın ısıtılması gerekmektedir. Şekil de işlem şematik olarak gösterilmiştir. Boyutu 50 m'den küçük parçacıklar ısıtılmış gaz içerisinde akıtılır ve 1500 m/s'ye kadar hızlandırılır. Yüksek kinetik enerji, parçacıkların çarpışma sırasında anında ergimesine sebep olur.

Yüksek kinetik enerji, özel daralan-genişleyen laval nozulları kullanılarak 35 MPa'a kadar gaz basıncında oluşturulur. Ön ısıtılan gaz yüksek ısıl iletkenliklerinden dolayı genellikle hidrojen veya helyumdur. Parçacıkların şekil değiştirerek altlığa yapışmasını sağlamak için 800 C'ye kadar gaz sıcaklığı gereklidir. Yine de biriktirme verimi %70'ten azdır.



- Yarı katı biriktirme için gerekli sıcaklık-hız bileşimi malzeme özelliklerine bağlıdır. Çarpma sırasında parçacığın ergimesini oluşturan bir kritik hız ve parçacık boyutu vardır. Hız; parçacık ergime sıcaklığı, ısı kapasitesi ve malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olarak artar. Buna bağlı olarak, soğuk püskürtme kritik hızı malzemeye göre değişir, fakat genelde 500 m/s'den fazladır. Fazla gaz tüketiminden dolayı soğuk püskürtme teknolojileri pahalıdır. Aynı zamanda, yüksek parçacık hızları nozulu çabucak aşındırdığından birkaç günde bir değiştirme gereklidir.

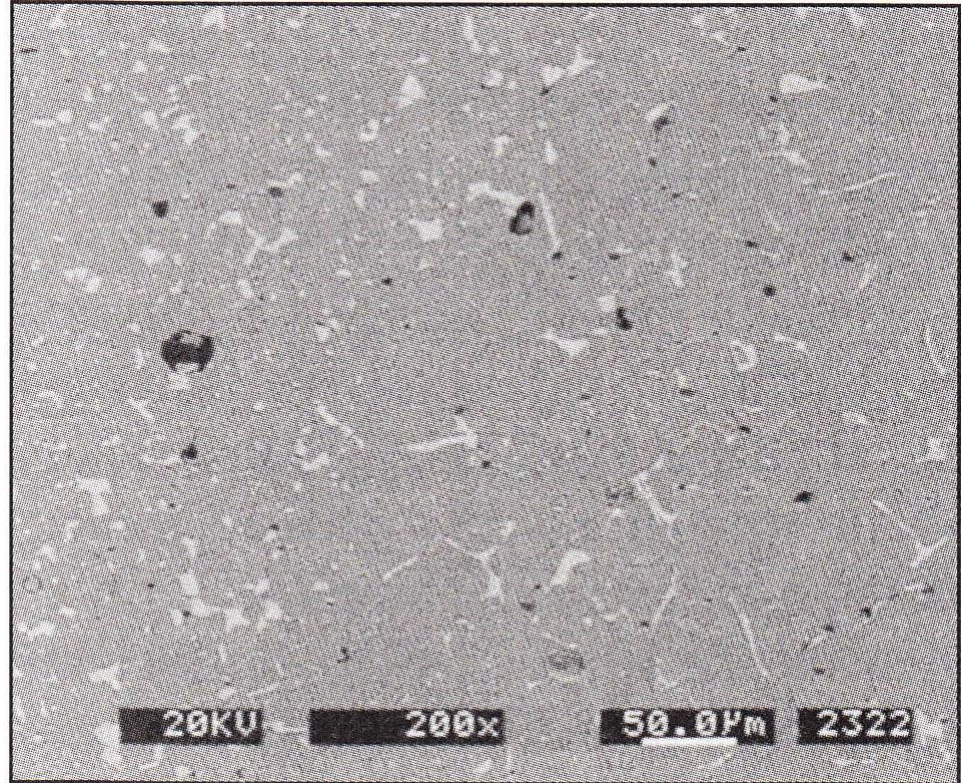
## Birleştirilmiş Cisimler

- Katmanlama teknolojilerine benzer şekilde, üç boyutlu basit parçalar(dikdörtgen, kare ve silindir) karmaşık gövdeler yapmak için birleştirilir yada istiflenir. Montaj için klasik yol parçaları sinterlemeden sonra birleştirmektir. Diğer yandan, ham parçaları sinterleme öncesi birleştirmek mümkündür. Bu şekildeki ham montaj üç yaklaşım kullanılarak yapılır:
- İlk parçayı kalıplamak ve bu ilk parçayı ikinci parçanın kalıplanmasında ek parça olarak kullanmak,
- Sırasıyla iki besleme stokunu bir kalıp boşluğuna kalıplamak.
- Bağlayıcı giderme ve sinterleme işleminden önce, iki ayrı kalıplanmış parçayı ham halde montajlamak.

# Serbest Şekilli Üretim

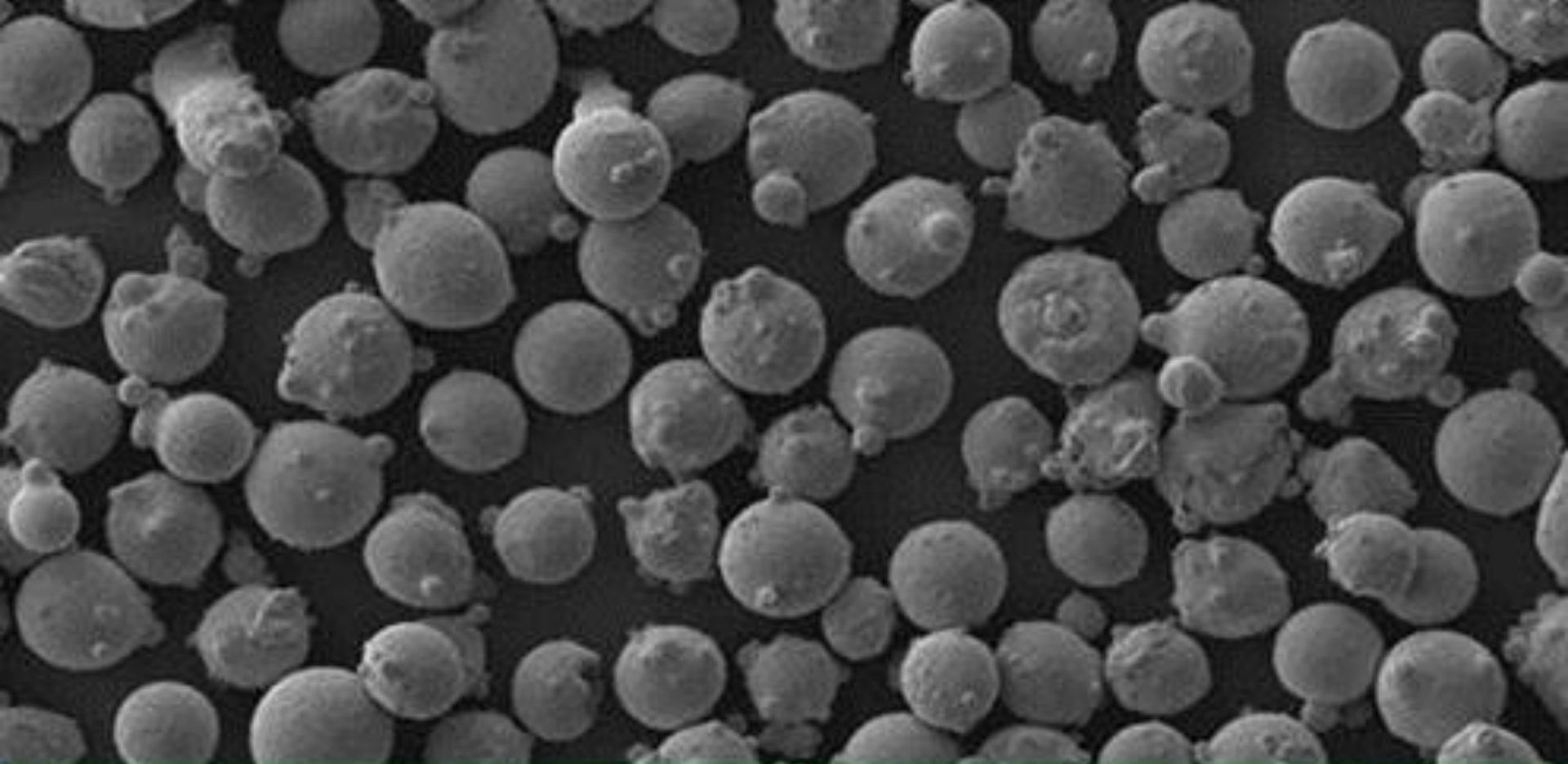
Basit ham montaj yaklaşımında iki parça aynı malzemeden presleme veya toz enjeksiyon kalıplarına ile üretilir. Bunlar az miktarda bağlayıcı veya çözücü kullanılarak birbirine yapıştırılır ve sinterlenir . Her iki parça da aynı malzemeden üretildiği zaman, sinterlemedeki uygun boyutsal değişim sayesinde sağlam bağ oluşur.

- Parçalar farklı malzemelerden üretildiği zaman ara yüzey kusurlarından kaçınmak için, parçacık boyutu, ısıtma hızı ve diğer faktörlerin ayarlanması gerekir. Şekildeki mikroyapı fotoğrafında,ham montajdan sinterleme ile elde edilmiş mükemmel bağ göstermektedir.





- Pahalı olan malzeme sadece gerektiği yerde kullanıldığı için, iki malzemedен oluşturulan parçalarda maliyette azalma vardır. Bir matkap ucunu örnek alalım. Uç kesmeyi sağlarken sap sadece güç aktarır. Tüm matkabı sert metalden yapmak yerine ucu WC-Co' dan ve sapı çelikten yapmak daha ucuzdur. Birleştirme kalıplamadan sonra fakat sinterlemeden önce yapıldığı için işlem ham montaj olarak adlandırılır.



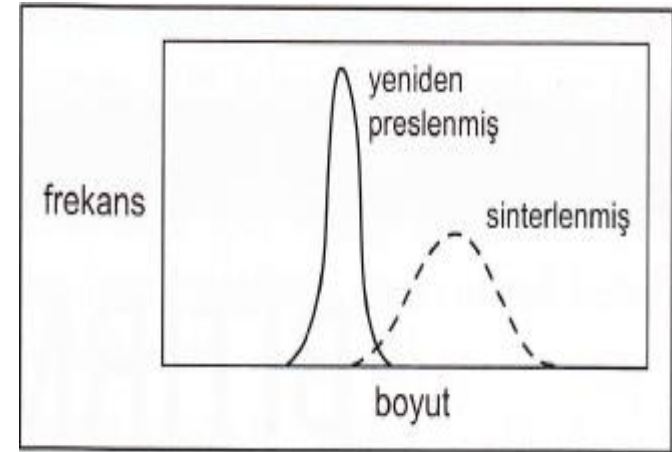
# Bitirme İşlemleri

# Bitirme İşlemleri

Parça üretimi, sinterleme veya yoğunlaştırma işlemi ile sona ermez, çünkü ürün şartlarını karşılamak için genellikle ek işlemlerin yapılması gerekir. Bitirme işlemlerinin başarılı bir şekilde yapılması, amaçlanan çalışma koşulları için parçaya yeni biçim vererek değer kazandırır. Bu yaygın bir üretim özelliği ve sinterlenmiş malzemelerde önemli bir uzmanlık konusudur. Bitirme işlemleri delik delme, vida açma, bileşenlerin montajı, boyut ayarlama için yeniden presleme, kaba yüzeyleri düzgünleştirme, çapakların alınması, karbürleme yoluyla yüzeyi sertleştirme, ısıl işlem yoluyla mukavemetlendirme, yorulma ömrünü iyileştirmek için yüzeyi bilyalı dövme ve korozyon önleyici kaplama şeklindedir. Bitmiş malzemeler çoğu durumda döküm-dövme malzemelere benzer özellik gösterir. Ancak, kalıntı gözenekler özellikleri değiştirir ve sorun oluşturur.

## Yeniden Presleme, Damgalama ve Seçici Yoğunlaştırma

Sinterleme sonrası mekanik deformasyon işlemleri yeniden presleme , ölçülendirme, damgalama ve seçici (yüzey) yoğunlaştırma olarak bilinir. Bu yöntemler sıcak presleme, dövme veya ekstruzyon gibi klasik yoğunlaştırma basamaklarından daha az plastik deformasyon içerir. Çift presleme ve çift sinterleme (DPDS) parçanın iki çevrimden geçip, yüksek hassasiyetle birlikte daha yüksek yoğunluğa ulaştığı durumdur. DPDS çevriminde yoğunluk kazanımı %2 - 3'tür, fakat mukavemet kazancı %20 olabilir. Aynı zamanda boyutta önemli değişiklik olmaz .



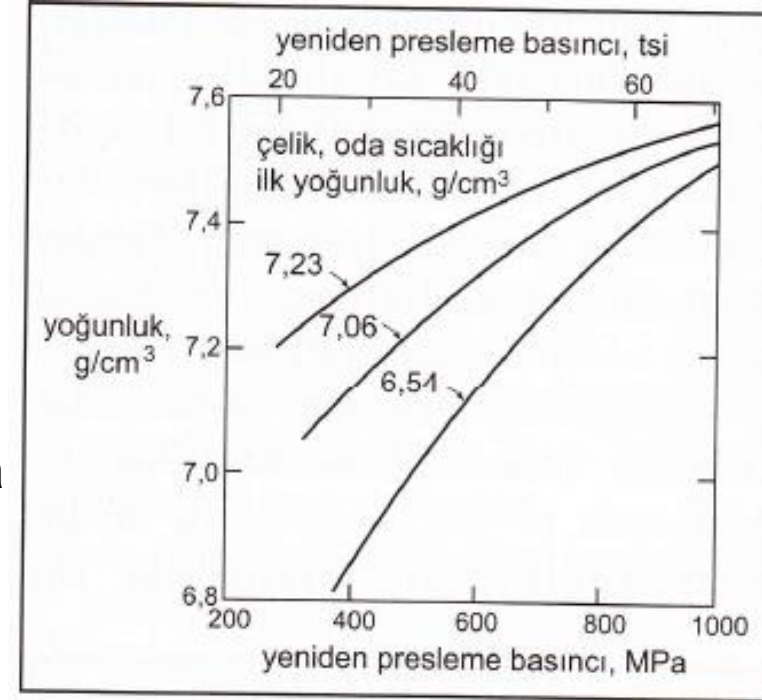
*Şekil 12.1. Yeniden presleme parçanın boyutunu azaltır ve daha önemlisi burada şematik olarak gösterildiği gibi boyutların düzgünlüğü artırır.*



# Bitirme İşlemleri

**Yeniden presleme**, büyük şekil değişiklikleri olmadan son boyutları ve yoğunluğu ayarlamak için yapılan yeniden düzenleme işlemidir. Sinterlenmiş parça, kapalı bir kalıp içine yerleştirilir ve yüksek gerinim hızlarında küçük gerinimlere tabi tutulur. Presleme basıncı ilk sıkıştırma basıncından fazladır. Yeniden sıkıştırma preslerinin çoğu 30-2500 kN (3-250 ton) aralığındadır ve 5 - 200 vuruş/dakika hızında çalışırlar.

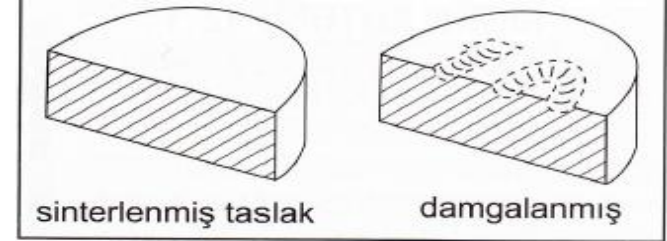
**Boyutlandırma**, son ürün boyutlarını ayarlamak için kullanılan düşük gerinim seçeneğidir. Yaygın kullanımına örnek olarak boyut özellikleri ile uyumlu burç yapmak için hassas bir delik çapı elde etmek verilebilir. Boyutlandırmanın kullanılması, üretim basamaklarını artırmasına rağmen, oldukça yüksek doğrulukta son boyutlara ve düzgün yüzeylere ulaşmak için etkili bir yoldur.



**Şekil 12.2.** Üç farklı yoğunluktaki sinterlenmiş çelik parçalar için yoğunluğun yeniden presleme basıncı ile değişimi.

**Damgalama**, sinterlenmiş taslak parçada yüzey baskıları oluşturur. Damgalama terimi, madeni paraların ve madalyonların üretimindeki tarihi kullanımdan gelmektedir. Yandaki şekil, damgalama ile oluşturulmuş yüzey baskısını göstermektedir. Tanıma numaraları veya markalama, damgalamanın ilk kullanılışıdır. Fakat günümüzde lazer markalama daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Sinterlenmiş malzemelerin damgalanması için üç önemli husus bulunmaktadır:

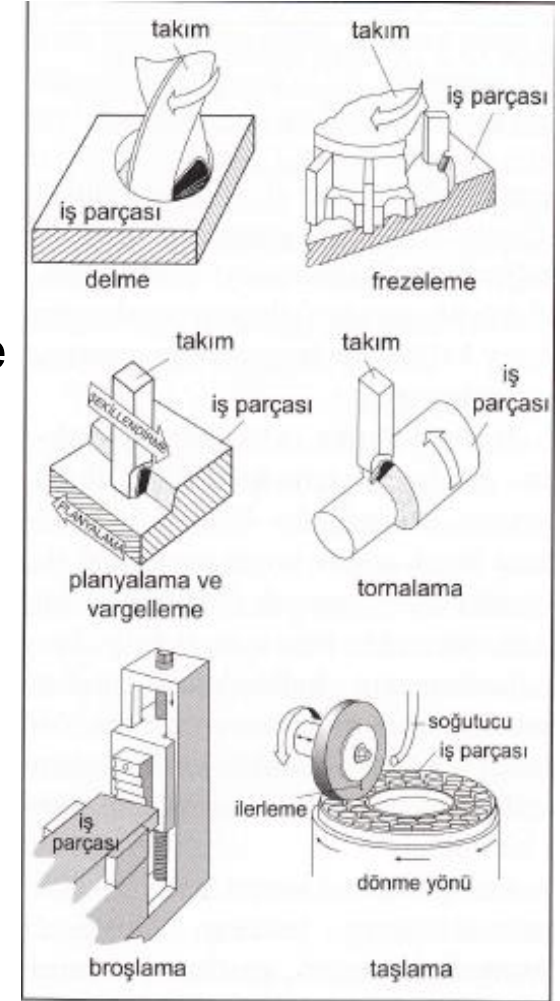
- ❖ Sinterlenmiş malzeme sünek olmalıdır.
- ❖ Takım yağlanmalı ve hassas şekilde ayarlanmalıdır.
- ❖ Parça gözenekli olmalıdır .



*Şekil 12.3. Yüzey damgalamasından dolayı oluşan bölgesel deformasyonun görünümü, iş parçası olarak tanımlanan sinterlenmiş taslakta oluşmuş baskı; preslenmiş ve sinterlenmiş tozdan oluşan metal para örneği.*

## Talaşlı İmalat ve Taşlama

Talaşlı imalat ve taşlama, orijinal şekillendirmede yapılması zor olan vida açma, oyuk, yiv ve özel görünümler oluşturmak için kullanılır. Ayrıca sinterleme sonrası taşlama veya talaşlı imalat ile boyut sapması azaltılır ve yüzey kalitesi iyileştirilir. Bu yüzey düzeltme işlemleri yüksek hız düşük ilerleme ile talaş kaldırılarak gerçekleştirilir. Bazı yaygın durumlar şekilde gösterilmektedir. Bunlar döküm-dövme malzemelere uygulanan talaşlı imalat basamakları ile aynıdır. Genellikle pahalı olmasından dolayı talaşlı imalat işlemlerinden kaçınılır.



Şekil 12.4. Parçanın delinmesi, frezelenmesi, planyalanması, vargellenmesi veya tornalanması ile talaş kaldırıldığı yaygın talaşlı imalat uygulamalarından bazı örnekler.



# Bitirme İşlemleri

Sol altta şekilde gösterildiği gibi, son yüzey kalitesi arttıkça talaşlı imalat zamanı ve maliyetler baskın faktör olur. Bir diğer faktör Şekil 12.6'da gösterildiği gibi kesici takım ömrünün gözeneklilikle değişimidir. Takım ömrü Gözenekliliğin çok yüksek veya çok düşük olduğu durumdakiler en yüksek seviyededir. Orta seviye yoğunluklarda, parçanın düşük ısı iletkenliği kesici takımın erozyonuna yol açtığından dolayı daha fazla takım hasarı oluşmaktadır.



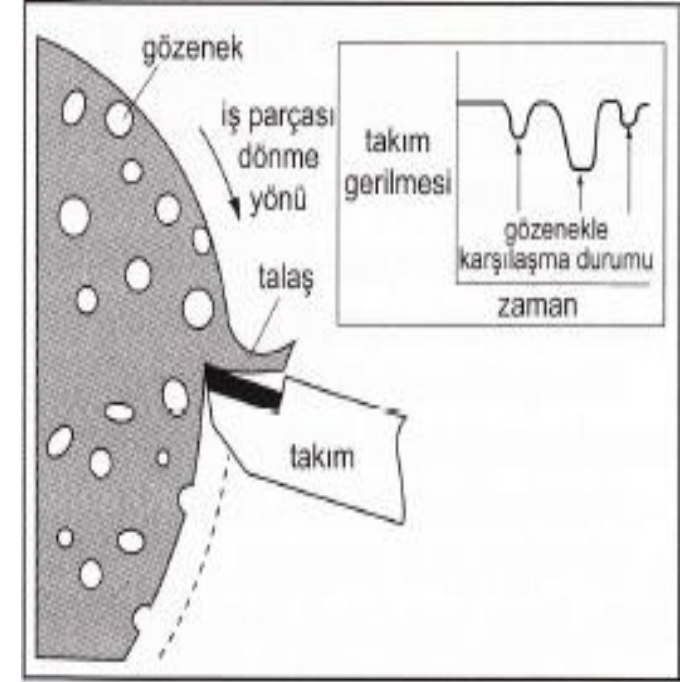
**Şekil 12.5.** Göreceli talaşlı imalat maliyetinin son yüzey kalitesine göre değişimi. Son yüzey kalitesi arttıkça talaşlı imalat maliyeti hızla artmaktadır. Böylece etkin maliyetli sinterlenmiş malzemeler için aralık oluşmaktadır.



**Şekil 12.6.** Kesici takım ömrünün parça yoğunluğu ile değişimi. Yüksek yoğunluklu parçalarda takım ömrü iyileşir. Bunun sebebi, gözenek azlığından dolayı, takım yorulması ve ısınmasının en aza inmesindedir. Düşük yoğunluklu parça zayıftır ve yorulma ile kesici takım ısınması sorunu olmasına rağmen, düşük parça dayanımından dolayı takım ömründe iyileşme görülür.



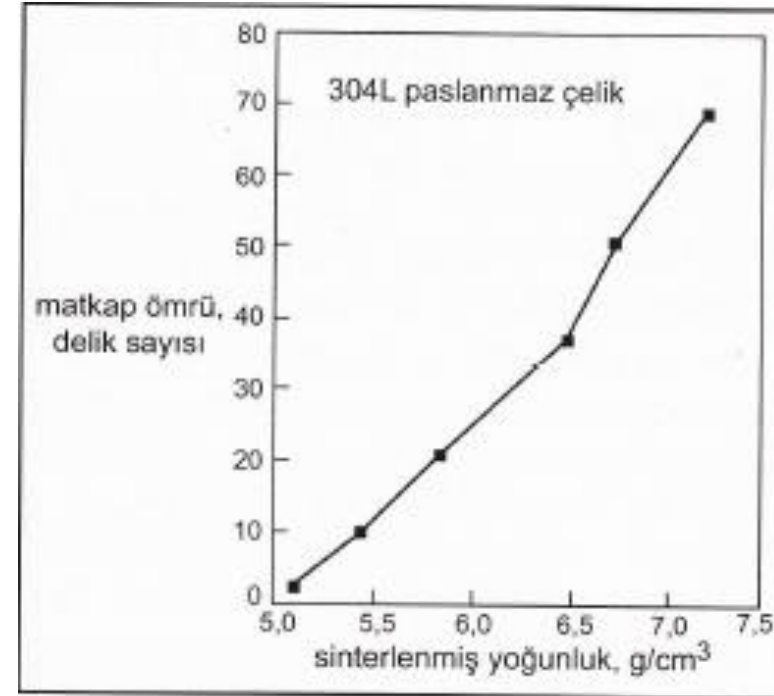
Buna ilave olarak, Şekilde gösterildiği gibi kesme yolu gözenekler tarafından kesildiğinden, kesici takım ucundaki gerilme tekrarlıdır. Buna göre, gözenekli bir malzemenin kesiminde kesici takım yorulma hasarına uğrar. Bu problem, talaşlı İmalat öncesinde gözeneklere düşük ergime noktalı bir metal emdirilmesi yoluyla en aza indirilebilir. Örnek, çelik bir parça üzerinde işlenecek yüzeye bakır emdirilmesi gibi, %20 gözenek ihtiva eden bir malzemeye talaşlı imalat öncesi sıvı metal emdirilmesi durumunda kesici takım ömrü 100 kat artar.



*Şekil 12.7. Gözenekli sinterlenmiş parçanın tornalanması esnasında, gözeneklerle karşılaşıldığında takımında sehim ve çevrimsel değişken yükler oluşur. Gözeneklerden dolayı oluşan bu değişim yorulma yoluyla takım ömrünün azalmasına yol açar.*

# Bitirme İşlemleri

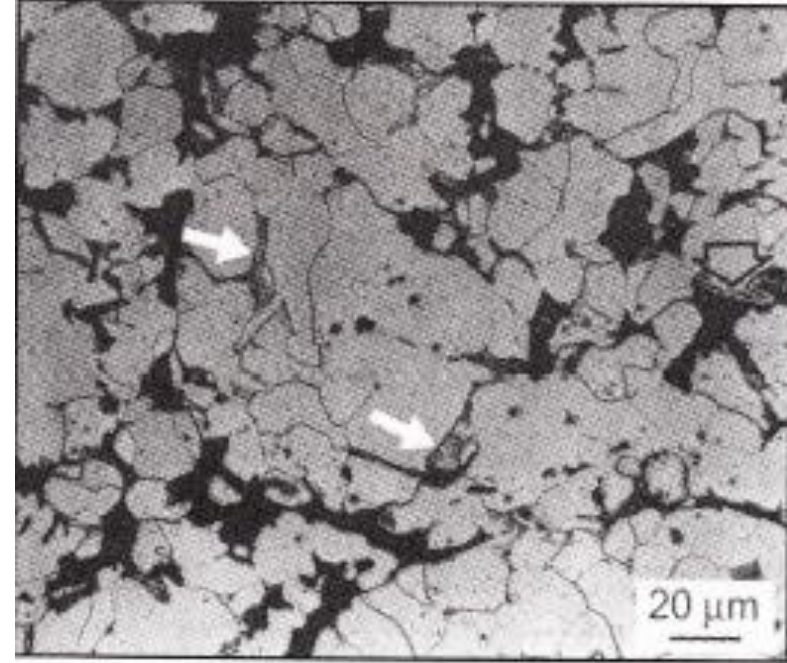
**Yoğunluğun** talaşlı imalat üzerinde karmaşık etkisi vardır. İşlenebilirlik; takım ömrü, kesme hızı, kesme kuvveti, veya talaş alma hızı testleri kullanarak ölçülür. Örnek olarak yandaki şekil, sinterlenmiş paslanmaz çelik için sinterleme yoğunluğuna bağlı olarak matkap ucu körelmeden açılan delik sayılarını göstermektedir. Bu yoğunluk aralığında delme ömrü yoğunluk yükseldikçe artar. Gözenek doldurma ve işlenebilirlik katkıları (mangan sülfür, bor nitrür, tellür, kurşun, kalay, molibden bileşikleri ve polimerler) işleme kuvvetlerini azaltmak ve verimliliği artırmak için kullanılır. Yüksek sertlikteki malzemeler en pahalı olanlarıdır. Bundan dolayı genellikle performans ve maliyet arasında denge sağlanır. Kısa ömürlü kesici takımlarda takımı değiştirmek ve ayarlamak için gerekli zamandan dolayı önemli bir maliyet oluşur. Bu sebeple, takım değiştirme maliyetinin hem doğrudan (yeni takım) hem de dolaylı (ayarlama) yanı vardır.



*Şekil 12.8. Sinterlenmiş 304L paslanmaz çelik için hasardan önce oluşturulan delik sayısına göre delme ömrünün belirlenmesi. Bu grafik zayıf malzemenin daha zor işlendiğini göstermektedir.*

# Bitirme İşlemleri

Talaşlı imalat işlemlerinin çoğunda **yağlayıcılar** kullanılmaktadırlar. Ancak yağlayıcı gözeneklerde kalıyorsa, kirliliğin mümkün olduğunca en aza indirilmesi için dikkat edilmesi gereklidir. Özellikle parça ısı işleme tabi tutulacaksa, talaşlı imalattan sonra temizleme işlemi gerektirir. Bazı parçalarda, işlenebilirliği iyileştirici katkılar ilk toz karışımına eklenebilir. Yandaki şekilde MnS ilave edilmiş bir çeliğin metalografik görüntüsü verilmektedir. Talaşlı imalat süresince, mangan sülfür kesici takımı kaplar ve yağlama etkisi yaparak takım ömrünü artırır.



*Şekil 12.9. İşlenebilirliğini artırmak için yapısına MnS ilave edilen sinterlenmiş Fe-2Ni-0,5C alaşımının metalografik kesiti. MnS parçacıkları okla gösterilmektedir. Bunlar kesici takıma yağlama etkisi yapmaktadır (fotoğraf, Deepak Madan).*

# Bitirme İşlemleri

**Alaşımlama ve ısıtma işlemi**, malzemenin işlenebilirliğini iyileştirir. Çok sert ve çok yumuşak malzemelerin işlenmeleri çok zordur. Bazı durumlarda son talaş alma işlemini en aza indirmek için ham veya ön sinterlenmiş parçayla kaba işlemek mümkündür. Fakat en iyi boyut hassasiyeti, parçanın ısıtma işleminden sonra işlenmesi ile elde edilir. Talaşlı imalat yüzeye bağlantılı gözenekleri deforme eder. Filtre gibi gözeneklerin yararlı olduğu uygulamalarda, gözenekler sonradan elektrodağlama ile açılır.

**Taşlama**, sert ve gevrek malzemelerde küçük boyut düzeltmeleri için uygundur. İşlenebilirlik terimine benzer şekilde taşlanabilirlik; taşlama süresince kaldırılan talaş hacminin yüzey mesafesi ve dik kuvvete oranıdır. Taşlama, dar toleransları elde etmek için önemlidir. Örnek olarak sert metaller belirlenen boyutun çok az üzerinde sinterlenir ve daha sonra taşlanır. Maliyet yüksektir, ancak son hassasiyet için bu gereklidir. Gerçekten, sıvı faz sinterlenmiş WC-Co bileşimlerinin çoğu için toplam imalat maliyetinin %40'ı sinterlemeden sonra yapılan taşlama işleminden kaynaklanır.



## Isıl İşlem

Isıl işlemler sinterlemeden sonra fazları, mikro yapıyı ve alaşım elementlerinin dağılımını düzenleme amaçlı yapılır. Bir ısıl işlemin şartları aşağıdakileri içerir:

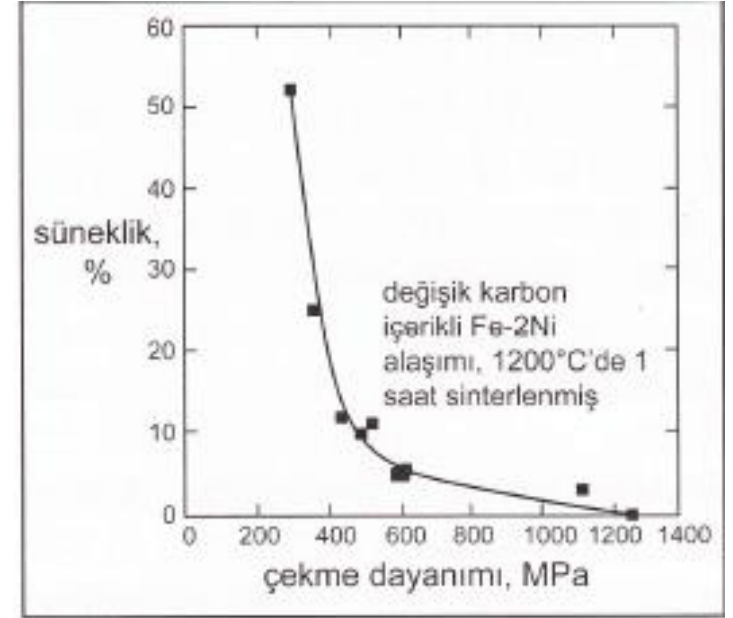
- ❖ Isıtma hızı (bu genellikle kritik değildir)
- ❖ Tutma sıcaklığı ve süresi
- ❖ Soğuma hızı ve atmosferi veya soğutma için kullanılan sıvı
- ❖ Soğuma safhasında ara bekleme sıcaklıkları ve süreleri
- ❖ Yeniden ısıtma sıcaklıkları ve süreleri
- ❖ Son soğuma hızı ve ortamı

Metallerin yaklaşık olarak üçte ikisi sinterlemeden sonra ısıl işleme tabi tutulur:

- ❖ Sinterlenmiş çelikler çözündürülür, hızlı soğutulur ve menevişlenir.
- ❖ Sinterlenmiş alüminyum alaşımları çökelti sertleşmesine tabi tutulur.
- ❖ Titanyum alaşımları kristal çeşitlerinin karışımını oluşturmak için ısıl işleme tabi tutulur.
- ❖ Takım çelikleri yüksek sertlik elde etmek için ısıl işleme tabi tutulur.
- ❖ İntermetalikler sık sık düzenli yapı oluşumu için ısıl işlem gerektirir.
- ❖ Şekil hafızalı alaşımlar istenilen şekil için ısıl uygulamaya ihtiyaç duyar.

# Bitirme İşlemleri

Dayanım ve sertlik kazançları ısıtılmanın en önemli göstergeleridir. Örnek olarak, sinterlenmiş bir çeliğin dayanımını sinterleme sonrası ısıtılma iki veya üç katına çıkar, ancak önemli miktarda süneklilik kaybı oluşur. Yandaki şekil demir-nikel çeliği için dayanımın süneklilikle değişimini göstermektedir. Isıtılma adımları döküm ve dövme malzemeler için iyi belirlenmiş olmakla beraber sinterlenmiş malzemelerde kalıntı gözeneklerden dolayı geliştirilmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Isıtılma işlemleri, genellikle farklı fazları veya kristal yapıları düzenler ve özellikler üzerine etkisi en iyi demir esaslı alaşımlarda anlaşılır.



Şekil 12.11. 1200°C'de 1 saat süreyle sinterlenmiş Fe-2Ni alaşımı için menevişleme sıcaklığının dayanım ve süneklilik üzerine etkisi. Genel olarak dayanım süneklilikle ters ilişki içerisindedir (veriler, Haorong Zhang ve S.T.Lin).

# Bitirme İşlemleri

Yüzey sertleştirme, aşınma dayanımını iyileştirir.

En iyi yüzey sertleştirme, sinterleme ve talaşlı imalat işlemleri tamamlandıktan sonra yapılır.

Karbon, bor, azot, alüminyum veya krom gibi atomlar koruma amaçlı olarak buhar, iyon veya çeşitli tepkimeler ile yüzeye ilave edilir.

Örnek olarak, yandaki şekilde bir saatlik vakum karbürlemesinden sonra sinterlenmiş çeliğin

yüzeyinden itibaren sertliğin derinlikle

değişimini göstermektedir. Açık gözeneklerin

olması döküm-dövme malzemelere kıyasla

karbon nüfuz derinliğini artırır. Gözenekliliğin

azalmasına bağlı olarak yüksek sertlik

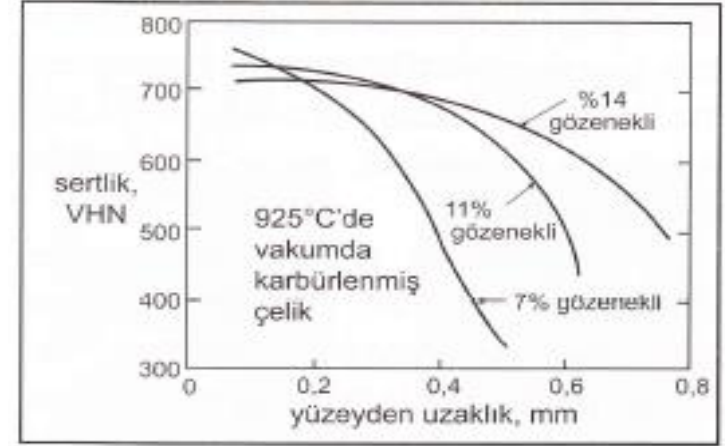
derinliğinde azalma görülür, ancak

gözenekler dayanımı azalttığından, ana

malzeme daha dayanımlı olur. Dolayısıyla ,

gözeneklilik karışık bir etkiye sahiptir. Çünkü karbürleme derinliğini artırırken,

toplam dayanımı ve sertleşebilirliği azaltır. Karbürleşme derinliği, tutma süresinin karekökü ile doğru orantılıdır, ancak gözeneklilikle artmaktadır.



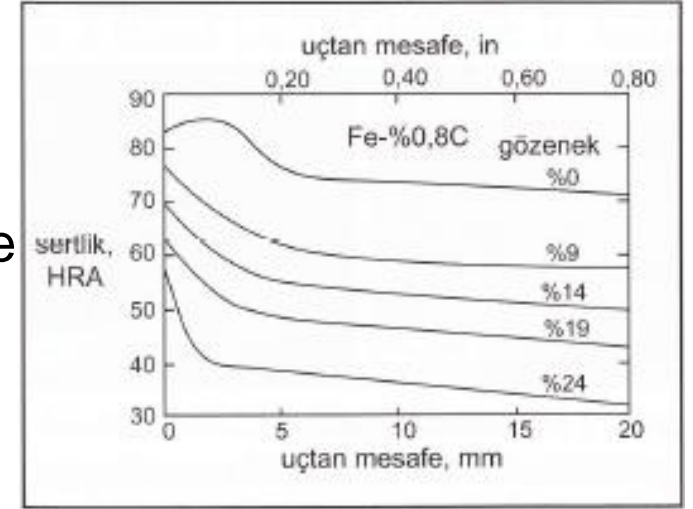
*Şekil 12.13. 925°C'de vakum karbürleme işlemine tabi tutulmuş üç sinterlenmiş çelik için, sertliğin (Vickers sertliği) yüzey derinliğe göre değişimi. Açık gözenek ağının yüksek geçirgenliğinden dolayı, gözenek miktarı arttıkça karbon nüfuzyeti artar. Yaklaşık olarak %8 gözenek miktarının altında, karbürleme işlemi büyük oranda katı hal difüzyonu şeklindedir.*

**Çarpılma**, ısıtma işleminin istenmeyen etkisidir. Gerilmeler sıcaklık gradyanları, yerçekimi, yoğunluk ve kesit kalınlığı değişimlerinden kaynaklanır ve bunların hepsi malzemede çarpılmaya yol açar. İşlem süresince, sıcak bölgeler daha yumuşaktır ve aynı parçada daha rijit soğuk bölgelerden kaynaklanan ısıtma gerilmelerinden dolayı deforme olurlar. Yüksek karbon seviyeleri veya kalın kesitler boyutsal kontrolü zorlaştırır. Hızlı ısıtma ve hızlı soğutma sorunları artırır. Diğer yandan, yavaş çevrimler çarpılmayı azaltır ancak daha düşük mekanik özelliklere yol açar. Bundan dolayı, sinterlenmiş malzemeye alaşım elementi ilavesinin önemli bir rolü de çarpılmayı azaltmaya yardımcı olmak için gerekli olan soğuma hızını yavaşlatmaktır.



# Bitirme İşlemleri

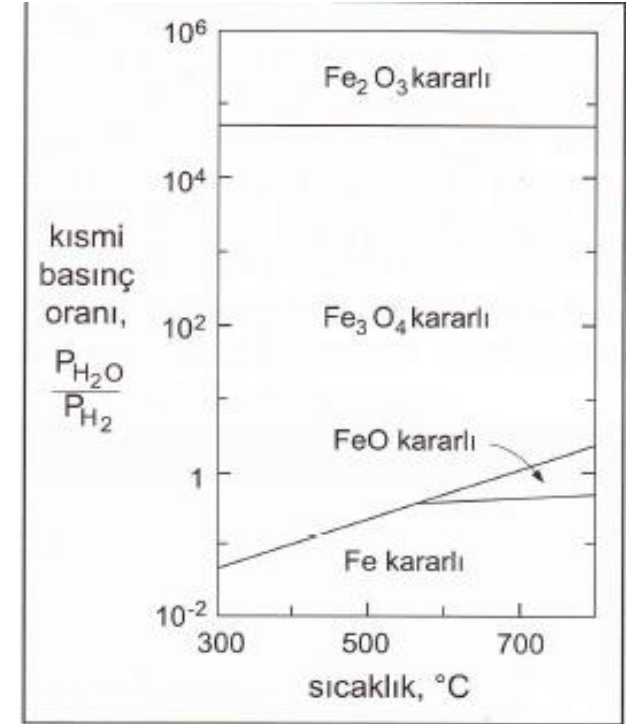
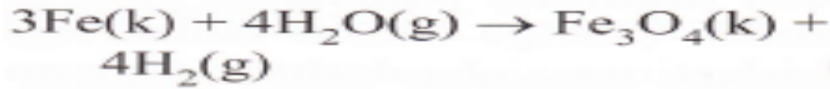
Kalın kesite yüksek sertlik ısıl işlemini yapabilme yeteneği, sertleşebilirlik parametresi olarak tanımlanır. Yüksek sertleşebilirlik, kalın kesitte yüksek sertlik elde etmek için daha düşük soğuma hızlarının kullanılabilmesine imkan tanır. Şekilde gösterildiği gibi gözenekler sertleşebilirliği azaltır. Şekilde farklı miktarlarda gözenek ihtiva eden uçtan su verilmiş silindirik deney çubuklarında derinliğe bağlı olarak sertlik değişimi görülmektedir. Gözenekler ısı iletkenliği azaltarak yüksek dayanımlı mikroyapı oluşmasını engeller.



*Şekil 12.15. Sinterlenmiş bir çelikte farklı gözenek seviyeleri için sertleşebilirlik, Jominy uçtan-suverme sertlik izlerinden (Rockwell A ölçeği) tayini. Daha düşük gözeneklilik daha iyi ısı iletimi ve beraberinde daha büyük sertlik derinliği sağlar.*

# Bitirme İşlemleri

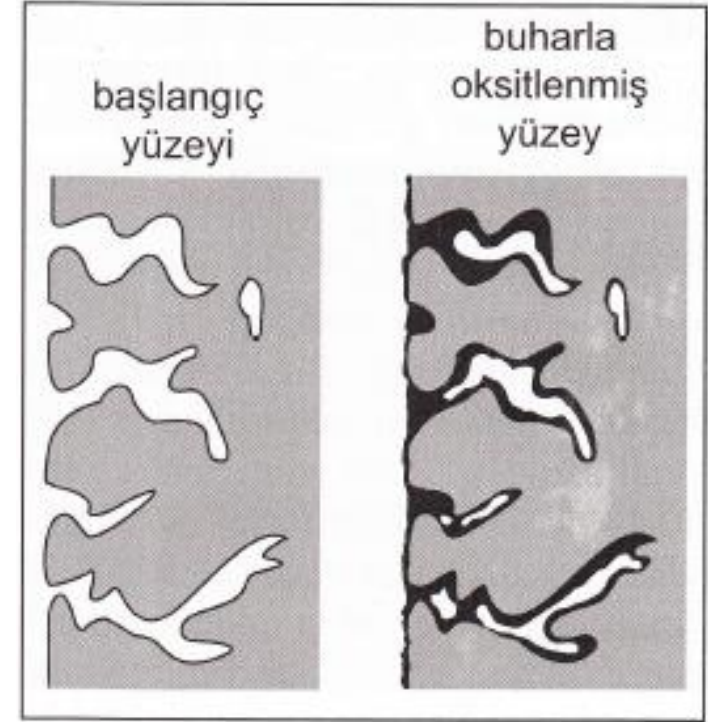
Isıl işlem sırasında işlem atmosferi malzemenin oksitlenmesini önlemelidir. Genellikle karbon ve azot ; parçaya, işlem atmosferine metan, karbon monoksit veya amonyağın karıştırılması yoluyla ilave edilir. Buhar esaslı oksitlenmeyi içeren bazı özel işlemler gözenekli çeliklere uygulanabilir. Şekilde görüldüğü gibi, oksitlenme tepkimesini hızlandıracak hidrojen atmosferi içerisindeki sıcaklık ve su (H<sub>2</sub>O veya buhar) basıncı ayarlanarak kararlı Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> tabakası oluşturulur.



**Şekil 12.16.**  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 'in sıcaklık ve buharın kısmi basıncının hidrojeninkine oranı şeklinde verilen atmosfer su içeriğine göre kararlı olduğu durumlar gösterilmektedir. iyileştirilmiş aşınma ve korozyon dayanımı için  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yüzey gözeneklerini dolduran güçlü ve koruyucu bir tabaka oluşturur.

# Bitirme İşlemleri

Hidrojenden kaynaklanan olası patlamalar yüzünden bu tip işlemler havasız ortamda yapılmalıdır. Demir oksit, parça yüzeyinde güçlü bir kaplama oluşturur ve Şekilde gösterildiği gibi yüzeye yakın gözenekleri kapatır. Normal olarak buharda ısıtma ile birlikte % 0,2 boyutsal artış gerçekleşir. Yüzeye yapışan oksit, paslanmayı önler ve aşınma dayanımını artırır.



*Şekil 12.17. Yüzey gözeneklerinin buhar oksitleme işlemi ile kapanışının kesit görünümü. Giren buhar, yapıda  $Fe_3O_4$  oluşturur ve demirden daha çok hacim işgal ederek yüzey gözeneklerini doldurur.*

## D-) Birleştirme ve Montaj

Sinterleme için özel bir montaj seçeneği, ham parçaları birleştirilerek, sinterleme esnasında yayınının gerçekleştirilmesiyle bağ oluşumunun sağlanmasıdır. Küçük tozlar sinterlemede daha fazla aktiviteye sahip olduklarından, doğal olarak daha yüksek birleşme dayanımları sağlar. Küçük tozlar sinterlemede daha fazla aktiviteye sahip olduklarından, doğal olarak daha yüksek birleşme dayanımları sağlar. Bu nedenle, enjeksiyon kalıplanmış yapılarda sinterleme ile birleştirme çok başarılıdır. Birleştirme işlemlerinin tamamı toz metalurjisi ile üretilen malzemelere de uygulanabilir. Genellikle merdiven-basamak şekilli bağlantılar, en başarılı olanıdır.



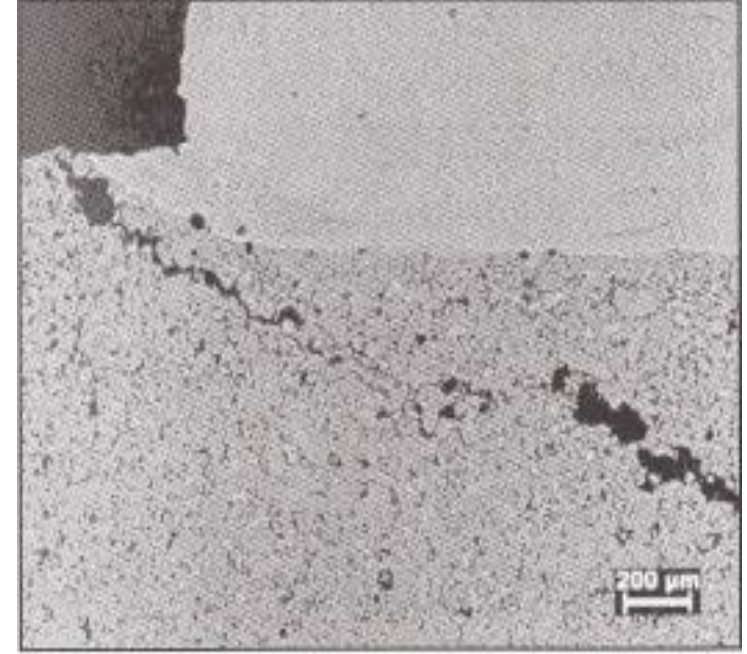
## Gözenekli malzemeleri birleştirme özel dikkat gerektirir.

Gözenekler, ısıl iletkenliği azaltır ve birleştirilen alandaki kaynak malzemesi veya sert lehim uzaklaştırır. Sert lehim, yayılım kaynağı ve yapıştırma ile sağlanan bağların hepsi diğer birleştirme tekniklerinden daha zayıftır. Elektron ışını ve lazer kaynağı ise daha güçlüdür, ancak bu yöntemler gözenekli parçalarda çarpımalara yol açar. Birleştirme üzerinde güçlü gözenek etkisi aşağıdaki gibidir:

- ❖ Gözenek miktarının %8'in altında olduğu durumlarda sinterlenmiş ve döküm-dövme malzemelerin birleştirme işlemleri arasında büyük farklılık görülmez.
- ❖ Gözenek miktarının % 8-20 arasında olması durumunda, kaynak ve sert lehim teknikleri kullanılabilir Ancak gözeneklerin bağ yapıcı malzemeyi çekmesini önlemek için ilave dolgu malzemesi kullanılmalıdır.
- ❖ Gözenek miktarının % 20'nin üzerinde olması durumunda, sert lehim ve kaynak gibi ergiyik metal birleştirme teknikleri çarpımalara yol açtığı için kullanılmamalıdır.

# Bitirme İşlemleri

Ergime içeren tüm birleştirme tekniklerinde, ısıdan etkilenen dayanımı azalmış bölge (ITAB) çarpılma, çatlama veya hızlı korozyona yol açar. Bu kaynak bölgeleri genelde sinterlenmiş malzemeye oranla daha düşük dayanıma sahiptir. Örnek, demir-nikel çeliğindeki kaynak dayanımı ana malzemeden % 5 oranında daha düşüktür. Fakat diğer alaşımlar için bu azalma %50 kadar olabilmektedir. Gerilmeden kaynaklanan çatlama, toz metalurjisi ile üretilen malzemelerin birleştirilmesinde yaygın bir sorundur. Bu durum yandaki şekilde sinterlenmiş otomobil egzoz flanşları ile egzoz borusu arasındaki kaynağa yakın bölgede görülmektedir. Bu durumda, gerilmeler sinterlenmiş malzeme dayanımını aşmaktadır.



*Şekil 12.20. Otomobil egzoz flanşındaki sinterlenmiş paslanmaz çelikte kaynak hasarı örneği. Üstteki kaynak dikişinin soğuma esnasında çok daralması, sinterlenmiş metali çekmiş ve çatlak oluşturmuştur (Fotograf Louis Campell'den).*

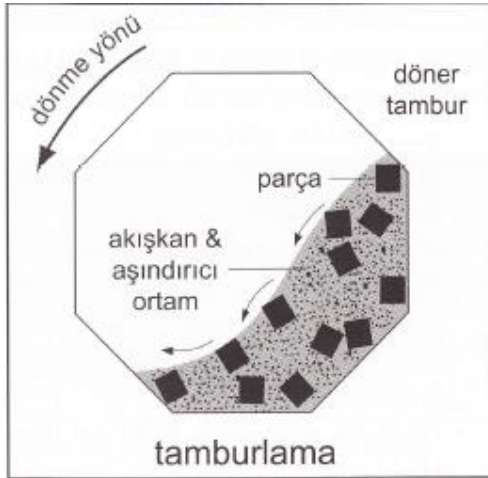
## Kaplamalar, Yüzey İşlemleri

Sinterleme sonrası fonksiyonu artırmak veya ürünü estetik açıdan iyileştirmek için oldukça fazla sayıda yüzey işlemi uygulanır. Bunlardan en önemlileri, metal parçalara elektro kaplama ve sert metal kesici takımlar üzerine buhar birikimli kaplamalardır. Buhar birikimleri esas itibarı ile kimyasal (uçucu kimyasallarla tepkimeler) veya fiziksel (buharlaştırılmış malzemeler) esaslıdır.

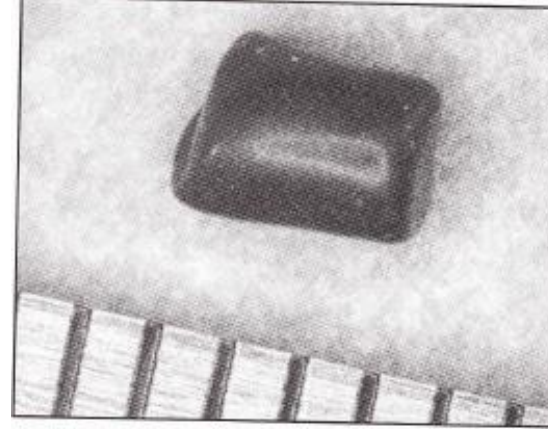
Elektrokaplamalar genellikle birkaç mikrometre kalınlığında olur ve kimyasal veya fiziksel buhar birikimine oranla daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Kimyasal buhar veya fiziksel buhar birikimi daha incedir ve sıcak yüzeylere uygulanır (1000 °C 'ye kadar). Muhtemelen en iyi bilinen kaplama, kesici takımlar üzerine uygulanan altın renkli, kararlı titanyum nitrür fiziksel buhar birikimi işlemidir.

# Bitirme İşlemleri

**Parlatma** ile ilgili olarak seramik öğütme ortamı, özellikle keskin kenarları ve yüzey düzensizliklerini gidermek için yaygın bir çözümdür. Bu işlem parçayı, üstteki şekilde gösterildiği gibi tamburlama veya titreşime tabi tutarak gerçekleştirilir. Küçük sert aşındırıcı ortam örneği alttaki şekilde gösterilmektedir. Bunlar, tozların ekstruzyonu ile oluşturulmuş, sinterlenmiş ve daha sonra kesilmiş WC-Co peletidir. Böyle bir ortamı, tek çevrimde ayrışma ve mekanik aşınmayı birlikte sağlamak amacıyla bir aşındırıcı (alümina) ve kimyasalın (seyreltik asit) birleştirildiği etkin parlatma işleminde kullanmak en iyi durumdur. Bu, kimyasal mekanik parlatma diye adlandırılır. Tamburlama işleminde korozyon önleyiciler ilave edilebilir.



**Şekil 12.21.** Sinterlenmiş parçaların aşındırıcı taşıyan bir akışkan içerisinde tamburlanması, keskin kenarlar ve yüzey çapaklarını kaldırmak için kullanılan yaygın bir yöntemdir.



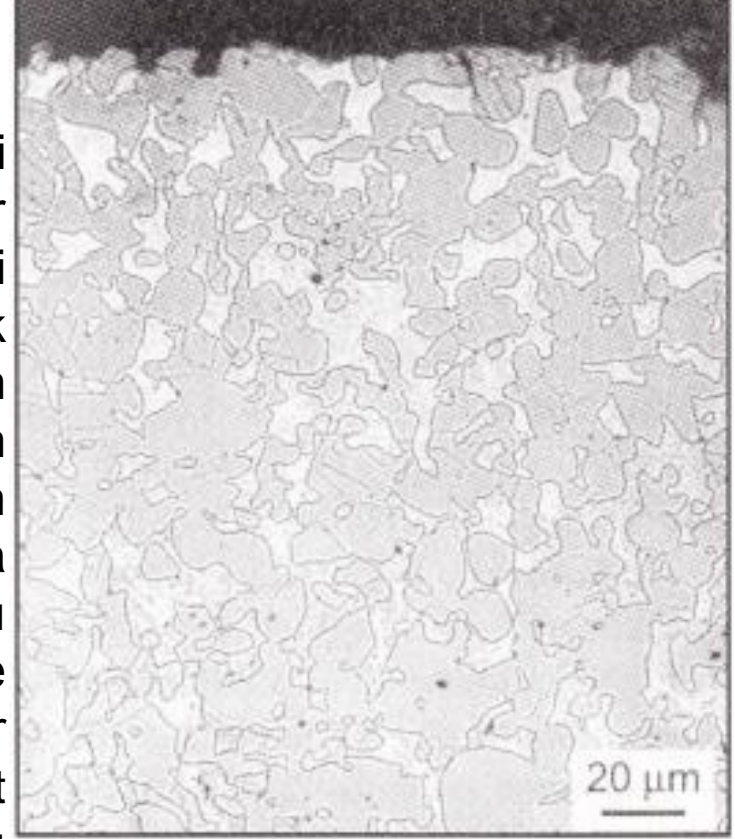
**Şekil 12.22.** Sinterlenmiş malzemelerin kimyasal-mekanik parlatılmasında kullanılan küçük, sert aşındırıcı; Uzunluğu yaklaşık olarak 3 mm'dir (Louis Campbell'in izni ile).



Kaplamalar, aşınma veya korozyon direncini artırmak için kullanılır. Kaplamalar boyalardan, sert yüzey katmanlarına kadar bir seri işlemi içerir. Kaplama teknikleri mekanik ve elektrokimyasal metotları kapsar. Parça yüzeyinde mekanik kaplama, parçanın çinko tozu ve cam boncuktan oluşan karışımda tamburlanması ile çinkonun parça yüzeyine soğuk kaynaklanması şeklinde oluşur. Elektrokaplama, yaklaşık % 93'ün üzerinde yoğunluğa sahip parçalara uygulanır. Korozyon direnci için tipik kaplamalar; krom, nikel, bakır, çinko, gümüş veya kadmiyum esaslıdır. Şayet elektrokaplama çözeltisi açık yüzey gözeneklerine girmişse, sonradan korozyon sorunları oluşabilir. Bundan dolayı, elektrokaplama sonrası yıkama, elektro kaplamanın altındaki kabarcıklar gibi daha sonradan oluşacak korozyon sorunlarından kaçınmak için önemlidir. Kaplanmış katmanın altına herhangi bir kimyasalın girmesini önlemek için gözenekleri bir polimerle doldurmak bir seçenektir.

# Bitirme İşlemleri

Emdirme ve infiltrasyon, yüzey gözeneklerini kapatma teknikleridir. **Emdirme** işleminde bir polimer kullanılır ve bu yolla korozyon direnci iyileştirilmesine rağmen mekanik özelliklerde çok az değişiklik olur. Emdirme, parçayı hafif ısıttıktan sonra boşaltılmış gözeneklere reçinenin basılması suretiyle gerçekleştirilir. Isı, akışkan viskozitesini düşürür ve böylece akışkan daha derin gözeneklere girebilir. Fakat çok fazla ısı reçineyi erken kürleyecektir. Gözeneklerde reçine polimerleştirilir veya çapraz bağlanır. Diğer seçenek ise gözenekleri cam suyu (doymuş silikat çözeltisi) ile doldurmak ve çözeltiden camı çökeltmektir.



*Şekil 12.23. Bakır infiltrasyonu esnasında hızlı soğutulmuş bir numunenin metalografik kesit görünümü (Jean Stewart'ın izni ile).*

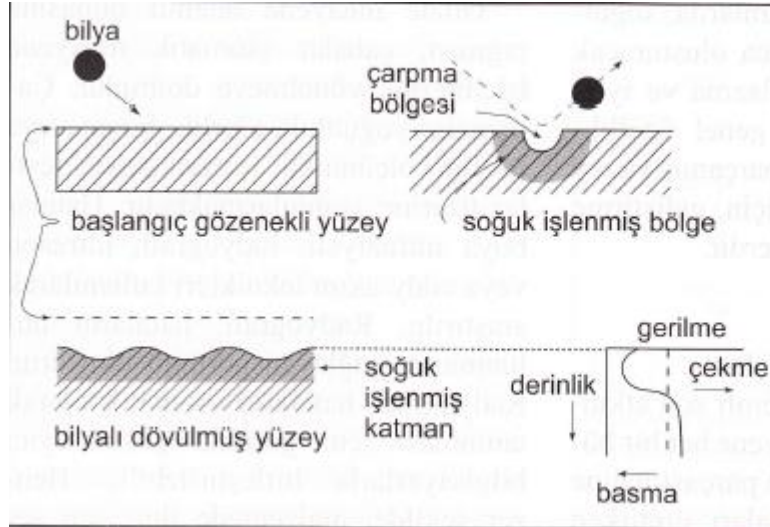
**Infiltrasyon**, genellikle sinterlemeden sonra ayrı bir basamak olarak yapılır, fakat bazı durumlarda sinterleme çevrimiyle birleştirilir. Gözenekleri doldurmak için sıvı metal kullanılır ve bu işlem mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirebilir. Yandaki şekil, gözenekleri doldurulmuş malzemenin mikroyapısını göstermektedir. Soğutma esnasında sıvı katılaşarak çift fazlı kompozit oluşturur.



*Şekil 12.23. Bakır infiltrasyonu esnasında hızlı soğutulmuş bir numunenin metalografik kesit görünümü (Jean Stewart'ın izni ile).*

# Bitirme İşlemleri

**Anodik oksidasyon**, sıklıkla kararlı oksitler oluşturan malzemelere uygulanır. Bu malzemeler alüminyum, titanyum, zirkonyum veya krom ihtiva eder. Amaç parçaya estetik veya tanıma amaçlı renk vermektir. Anodik oksitlenmiş yüzey, banyodan oksit katmanının mikro gözeneklerinde renklendirici olarak renklenir. Parçanın **yorulma ömrünü** iyileştirmenin en önemli yollarından biri bilyalı dövmedir. Yüzeyde basma kuvvetleri, parçanın küçük çaplı bilyalarla (veya son zamanlarda lazer darbeleriyle) bombardıman edilmesi ile elde edilir. Şekilde gösterildiği gibi, bilya küçük izler bırakarak yüzeyi yoğunlaştırır ve basma gerilmesi oluşturur. Bu gerilme yorulma hasarını büyük oranda geciktirir, çünkü gözenekli malzemelerde yorulma kırılması genellikle yüzey gözeneklerinden başlar.



**Şekil 12.25.** Bilyalı dövme, parça yüzeyine yüksek hızda çarpan bilyalarla oluşturulan tekrarlı darbeleri içerir. Darbeler, parçanın yorulma ömrünü uzatan kalıntı basma gerilmeleri içeren soğuk işlenmiş bölgeler oluşturur.

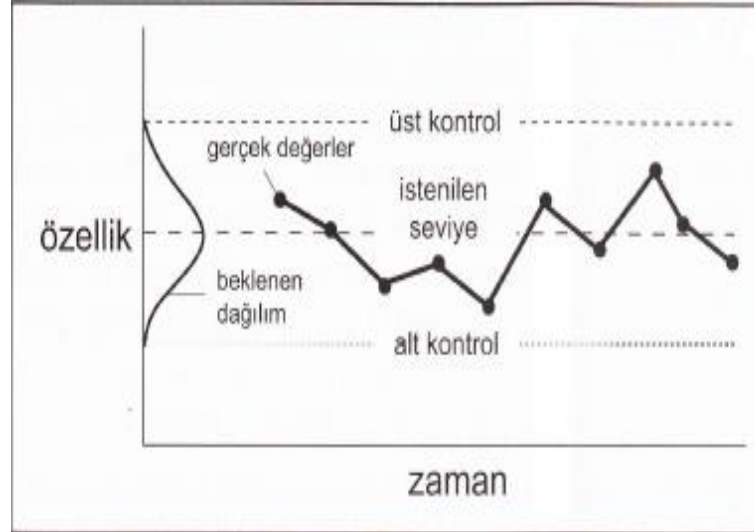


**Perdahlama**, yüzey deformasyonunu oluşturmak için yüksek kesme hadde kuvvetinin uygulanmasını kapsar. Perdahlama bazen boyutları düzeltmek ve özellikle deliklerde kullanılır. Bu işlem dişli çarklarda yuvarlanma temaslı yorulma ömrünü iyileştirme için de kullanılır ve % 40 yük artışına imkan tanır. Perdahlamanın, büyük bir çevrim yerine birkaç küçük deformasyon çevrimi ile uygulanması daha etkilidir.

**Lazer sırlama**, korozyon direncini iyileştirmek için kullanılan bir diğer yüzey işlemidir. Lazer ışını, alaşımı bölgesel ergitmek için parça yüzeyine uygulanır. Ergiyik yüzeyi altındaki malzeme kütlesi ısıtılmadığından, ergiyik hızlı bir şekilde soğur ve yüzey sırası oluşturur. Bazı durumlarda, soğutma işlemi amorf kaplama oluşturacak kadar hızlıdır.

## Muayene

Amaç hataları üretirken yakalamaktır. Bu amaç için önemli bir yöntem, istatistiksel işlem kontrolüdür (SPC) ve ara üretim basamaklarında standart şartlardan sapmaları belirlemek için kullanılır. Alttaki şekil, üretim basamağıyla ilişkili normal boyutsal sapmaları ve SPC grafiklerinin zamana göre değişiklikleri izlemek için nasıl kullanılacağını göstermektedir. Amaç kontrol aralığını geçen parçaların yeniden işlenme veya reddedilmelerini en aza indirmektir. Herhangi bir işlemde bazı değişiklikler olabilir, fakat SPC sürekli olarak sapmaları belirler ve kabul edilebilir bir aralıkta işlemin sürdürülmesini sağlamaktadır.



Şekil 12.26. Parça kalitesi üzerine etkiyen sistematik faktörler olup olmadığını belirlemek için ortalama özelliğin zamana göre ifade edildiği istatistiksel işlem kontrol (SPC) grafiği örneği. Değerlerin saçılımında zamana bağlı artış olmadığından emin olmak için eşlik eden bir grafikte değerlerin aralığı gösterilir.

Gözle muayene önemli olmasına rağmen, çabalar otomatik muayene işlemlerine yönelmeye doğrudur. Hatalar boya nüfuziyeti, radyografi, ultrason veya eddy akım teknikleri kullanılarak araştırılır.

Radyografi, hataların bulunmasını sağlayan görüntü oluşturur. Hataların otomatik olarak tanınması için görüntü çözümleyici bilgisayarlarla birleştirilebilir. Benzer şekilde, malzemedeki ilerleyen ses dalgaları çatlaklar tarafından saçılır.

Ultrasonik ve yankılayıcı titreşim muayene teknikleri, gözenek etkilerinin az olduğu yüksek yoğunluklu malzemelere uygulanabilir. Salınımlı manyetik alan tarafından oluşturulan eddy akımları çatlakları geçemez ve tahribatsız muayene için başka bir sinyal meydana getirir. Bilgisayarlı tomografi (CAT taraması), gama ışını azalması, ultrason görüntüleme ve taramalı akustik mikroskopunu içeren yeni teknikler geliştirilmektedir.