



Çeşitli Toz Sıkıştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Emre Kurt¹, Fatih Aydemir², Batuhan Evren³,

^{1*} Tırsan Treyler San. Ve Tic A.Ş, Sakarya,Turkey, (ORCID: 0000-0001-6017-1694), emre.kurt@kaessbohrer.com

^{2*} Tırsan Treyler San. Ve Tic A.Ş, Sakarya,Turkey, (ORCID: 0000-0002-0597-1047), fatih.aydemir@kaessbohrer.com

^{3*} Tırsan Treyler San. Ve Tic A.Ş, Sakarya,Turkey, (ORCID: 0000-0002-7038-4818), batuhan.evren@tirsan.com

(1st International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences ICENSOS 2022, December 20 - 23, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1219539)

ATIF/REFERENCE: Kurt, E., Aydemir, F., Evren, B., (2022). Çeşitli Toz Sıkıştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (45), 100-106.

Öz

Toz metalürjisi metal veya seramik malzeme tozlarının üretilmesi, bu tozların şekillendirilmesi ve sinterlenme aşamaları ile iş parçası eldesine imkân veren bir yöntemdir. Toz metalürjisi yöntemi otomotiv sektörü başta olmak üzere pek çok alanda kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlere nazaran düşük hammadde kaybı, düşük birim üretim maliyeti (yüksek sayıda iş parçası üretimi halinde) gibi avantajlar sağlamaktadır. Toz metalürjisi yöntemi karmaşık geometriye sahip, yüksek ergime sıcaklığına sahip iş parçaları, geleneksel yöntemlerle alaşımlayamayacak malzemelerin üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Tozların sıkıştırılması toz metalürjisinin önemli bir alanını teşkil eder. Bu makalede geleneksel toz sıkıştırma yöntemleri; Tek yönlü presleme, çift yönlü presleme, soğuk izostatik sıkıştırma, sıcak izostatik sıkıştırma, toz dövme, toz enjeksiyon, toz ekstrüzyon, toz haddeleme, çamur (slip) döküm ve şerit döküm yöntemleri anlatılmış ve bu yöntemlerin bir karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toz metalürjisi, Toz sıkıştırma, Toz haddeleme, Şerit döküm, Toz dövme, Toz ekstrüzyon

Comparasion of Various Powder Forming Methods

Abstract

Powder metallurgy is method which is able to process work piece by following the phase of metal and ceramic powder production, powder forming, and sintering. The powder metallurgy is used in many ares especially in automotive industry. Powders metallurgy provides advantages if comparing with conventiounous methods such as: low loss of raw material and low unit of production cost (in processing of scores process work). Powder metallurgy is able to process of process works which has complex geometry or high melting temperature. Also material can process with powder metallurgy method which can not alloy with conventional techniques. Powder forming constitutes an important area in powder metallurgy. In this paper, conventional powder forming methods such as: single action pressing, double action pressing, hot isostatic pressing, cold isostatic pressing, powder forging, powder injection moulding, powder extrusion, powder rolling, slip casting, tape casting methods are expressed and compared.

Keywords: Powder metallurgy, Powder forming, Powder Rolling, Casting tape, Powder forget, Powder extrusion

¹ Sorumlu Yazar: emre.kurt@kaessbohrer.com

1. Giriş

Toz metalurjisi modern tekniklerden farklı olarak ilk çağlarda kalıplama veya dekoratif malzemelerin üretiminde kullanılsa da ancak 18. YY sonlarında metallerin sinterlenmesi, platin tozların üretilmesi ile modern olarak üretim metotları arasında adını duyurmaya başlamıştır. Toz metalurjisine ait ilk örneklerle M.Ö 3000’lerde karşılaşılmaktadır. Mısırlılar bazı aletlerin üretiminde toz ve parçacıklar kullanmışlar. Tozları döverek şekillendirmişlerdir. Modern olarak toz metalurjisi 18. YY sonlarında kendini duyurmuştur. İlk olarak platin madeni toz halinde işlenmiştir. Toz metalurjisinde 19 yy. da karmaşık şekilli parçaların üretimi ve sinterlemesi yapılmaya başlanmıştır. Toz metalurjisi ekstrüzyon yöntemi ile lamba filamanlarının üretimi ile 19 yy.’da ticari anlamda kullanılmaya başlanmıştır. Toz metalurjisi için önemli bir adım ise 20 yy. başlarında üretilen kendinden yağlamalı yataklardır. Daha sonra filtrasyon teknikleri, gözenekli yapılar gibi üretimler ile toz metalurjisi hızlı bir ilerleme gerçekleştirmiştir. 1940-1950 yılları arası dönemde kendinden yağlamalı yataklar oldukça yaygınlaşmıştır. İkinci Dünya savaşı sonrasında havacılık ve nükleer teknoloji alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. 1950-1960 arası dönemde dövme tekniği ile iş parçalarının üretimi gerçekleştirilebilmiştir. Bu gelişim tam yoğunluk ile sıkıştırma işlemlerinin başlangıcını simgelemektedir. 1970’lerde yüksek yoğunluğa sahip olan iş parçaları ticari anlamda üretilmeye başlanmıştır (Kempton, H. R, 1993, Lindkop. P ve ark 1986). Günümüzde toz metalurjisi başta otomotiv sektörü olmak üzere nükleer, havacılık, seramik üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır.

2. Toz Sıkıştırma Yöntemleri

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilecek ürünlerde sinterleme aşamasında geçilebilmesi için tozlara kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar bir yoğunluk kazandırılması gerekir. Bu durum toz sıkıştırma yöntemlerini akla getirmektedir. Toz sıkıştırma yöntemlerini basit olarak basınçlı ve basınçsız yöntemler olmak üzere iki grupta inceleyebiliriz.

2.1. Basınçlı Teknikler

Basınçlı teknikler toz metalurjisinde kullanılan en yaygın yöntem grubudur. Tozların şekillendirilmesinde sistem içinde basınçtan faydalanır. Her malzeme çeşidinin farklı bir sıkıştırma basınç aralığı vardır. Farklı malzeme türleri için basınç değerleri Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 2.1 Toz malzemelerin sıkıştırma basınçları (Boothroyd ve ark 2010).

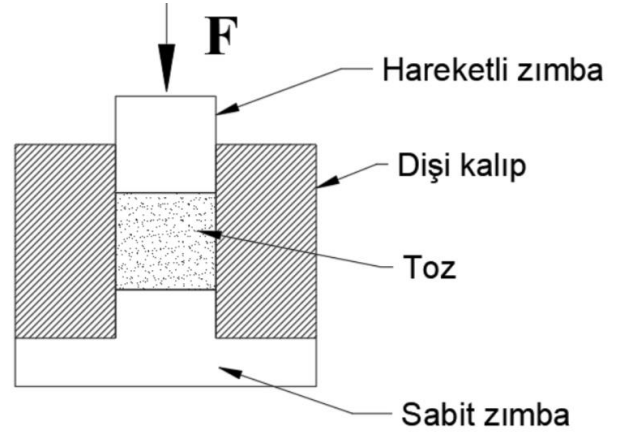
Malzeme	MPa
Alüminyum	69-276
Pirinç	414-687
Karbon	138-165
Alumina	110-138
Ferritler	110-165
Demir (düşük yoğunluk)	345-414
Demir (orta yoğunluk)	414-552
Demir (yüksek yoğunluk)	483-827
Tungsten	69-138
Tantal	69-138

2.1.1. Kalıpta pres ile sıkıştırma

Kalıpta sıkıştırma, toz şekillendirmede basınçlı teknikler arasında en yaygın kullanılanıdır. Kalıbın içinde tozlara belli miktarda basınç uygulandığında partiküller birbiri üzerinde kayar ve şekil değiştirilerek daha yoğun hale gelirler. Bu işlemten sonra parça kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar bir mukavemet kazanmış olur. Bu yöntemin diğer bir görevi de istenilen gözeneklilik miktarını vermektir. Kalıpta sıkıştırma yöntemlerini, tek yönlü sıkıştırma ve çift yönlü sıkıştırma olarak iki ayrı grupta inceleyebiliriz (Dikici, B. 2010).

2.1.1.1. Tek yönlü presleme

Tek yönlü sıkıştırma, bir kalıbın içine tozun dolması akabinde mekanik veya hidrolik pres kullanılarak tozun şekillendirilmesi işlemidir. Bu yöntemde alt zımba sabit, üst zımba ise hareketlidir. Tek yönlü sıkıştırmada dikey yönlü bir deformasyon uygulanır. Bu yöntemde uygulanan yük iş parçasına homojen olarak dağılamamaktadır. Dolayısıyla iş parçasındaki yoğunluk hareketli zımbaya doğru giderek azalmaktadır. Yoğunluktaki bu azalma iş parçasının kalınlık/uzunluk oranına bağlıdır. Yüksek kalınlığa sahip olmayan disk, rondela gibi parçaların bu yöntemle üretilme sorun teşkil etmemektedir. Ancak kalınlığı yüksek parçalarda yoğunluk homojen dağılmadığından problem oluşmaktadır (Sarıtış 1995). Tek yönlü sıkıştırma türünün bir avantajı ise kalıp tipi basittir ve maliyet açısından oldukça avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte iş parçasını kalıptan çıkarmak diğer yöntemlere bir miktar daha zordur. İş parçasının kalıptan çıkarılması için iki temel yöntem uygulanır. İlk yöntemde kalıp sabittir, alt zımba yükselerek iş parçasını kalıp boşluğundan dışarı gönderir. Diğer yöntemde ise alt zımba sabittir kalıp aşağı çekilerek iş parçası kalıp dışına alınır (Alpugan, Z 1981).



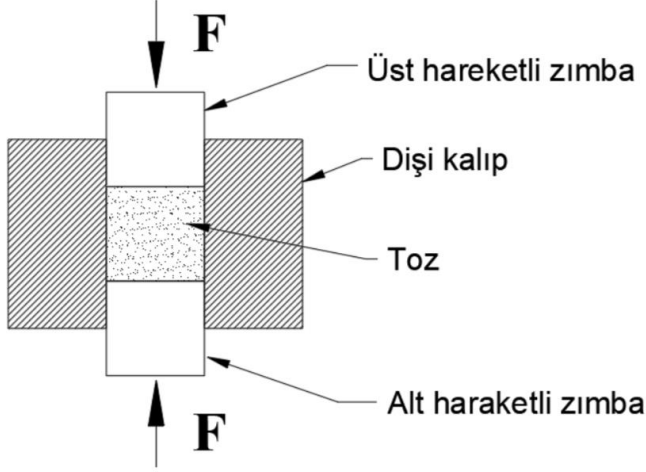
Şekil 2.1.1 Tek yönlü presleme Kalıbı (Özay Ç 2004).

2.1.1.2. Çift yönlü presleme

Tek yönlü sıkıştırmada kalınlığı yüksek iş parçaları için yoğunluk dağılımı problemi oluşmaktadır. Çift yönlü sıkışma prensibi ise alt üst zımbanın aynı anda sıkıştırmaya katılmasını ve daha iyi bir yoğunluk eldesini amaçlamaktadır. Bu şekilde kalıp içinde boydan boya dengeli bir yoğunluk eldesi mümkün hale

getirilebilir. Bu yöntem sıkıştırılacak iş parçalarının dikey kesitlerinin kademeli olması durumunda çok kullanışlı değildir. Parçanın kalıptan çıkarılmasının geometrisine bağlı olmakla birlikte

zordur (Herman, S 1978). Çift yönlü sıkıştırmada, alt ve üst zimbaların ikisi birden hareketlidir. Bu nedenle özel bir tip kalıp gerektirir. Bu kalıplar tozların hassasiyet ile kalıba yerleşmesine, sıkıştırılmasına ve çıkarılmasına uygun olmalıdır. Bu sıkıştırma türünde kalıp maliyeti tek yönlü sıkıştırmaya göre daha fazladır (Özay Ç. 2004).



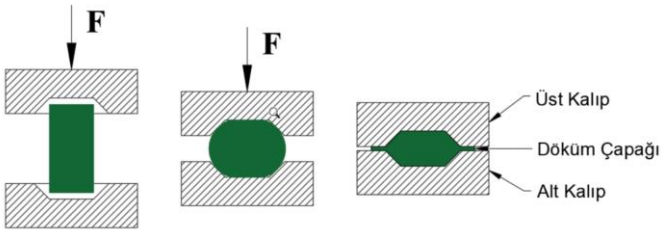
Şekil 2.1.2 Çift yönlü presleme Kalıbı (Özay Ç. 2004).

2.1.1.3. İlk presleme

Toz metalürjisi uygulamalarında tek yönlü veya çift yönlü presleme aşamaları genellikle oda sıcaklığında uygulanmaktadır. Son dönemde, sinterleme sıcaklığı altında ve oda sıcaklığı üzerinde olan ortamlarda iş parçası üretimleri gerçekleştirilmektedir. Sıkıştırma sıcaklığının yüksek olması kalıp sürtünmelerinin azalması sebebiyle daha düşük sıkıştırma basınçlarında, oda sıcaklığı ile karşılaştırıldığında daha yüksek yoğunluk elde edilmesi sebebiyle ilk presleme önemini korumaktadır.

2.1.1.4. Toz dövme

Toz dökme teknolojisi karmaşık şekillerde yüksek yoğunluk eldesi sağlayabilmesinden dolayı önemlidir. Bu yöntemde ön şekillendirilmiş tozlar harmanlanır ve bir kalıp içine yerleştirilir. Kalıp içinde pres yardımıyla toz dövülerek iş parçasına yoğunluk kazandırılmış olur.

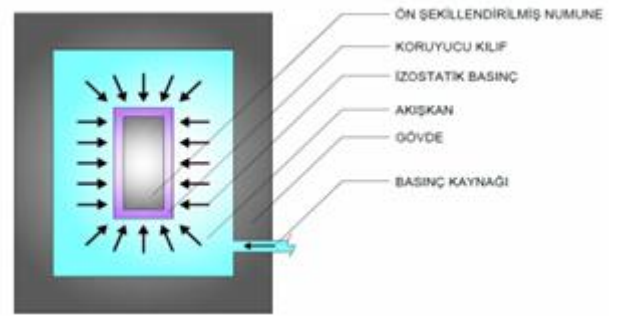


Şekil 2.1.3 Toz dövme Mekanizması (Wu Q. 2010).

2.1.2. İzostatik Şekillendirme

Ön şekillendirmeye uğramış bir iş parçası veya bir toz kütesine, hacmi boyunca eşit şekilde basınç uygulanması ile gerçekleştirilen bir yöntemdir. Bu yöntem presleme yöntemleri ile homojen olarak sıkıştırılmayacak iş parçalarının üretimine etkili bir çözüm sunar. Sıkıştırma işlemi izostatik bir ortamda gerçekleşmektedir. Bu şekilde homojen bir dağılım eldesi mümkün hale gelir (Henderson ve ark 2020). Bu yöntem için e-ISSN: 2148-2683

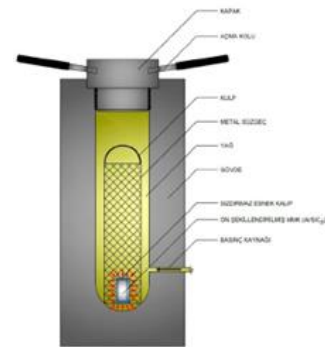
kullanılan kalıp türü bir miktar elastik olmalıdır. Genel olarak kalıp, üretim süreçleri göz önüne alınarak, lastik, poliüretan, lateks veya polisilikon gibi malzeme türlerinden seçilir. Kalıp tasarımında dikkat edilmesi gereken diğer konular ise; kalıp toz yoğunlaşmasını karşılayabilecek ölçüde büyük olmalı, kalıbın gözeneklere girememesi adına kalıbın sert ve dayanıklı polimerlerden seçilmesi gerekir. (German M, R. 2005). İzostatik preslemenin en temel avantajı, sisteminde sürtünme barındırmamasıdır. Sürtünmenin olmaması nedeniyle pres ve kalıp arasında kalıcı gerilmeler oluşmaz. Ayrıca herhangi bir yağlayıcı veya bağlacı ihtiyacı önler. Sürtünmenin olmamasının diğer bir avantajı ise daha fazla yoğunluk eldesinin mümkün hale gelmesidir. Bu yöntem ile sıkıştırılan parçalarda yoğunluk gradyanları diğer yöntemlere göre daha küçüktür. Böylece Sintermede küçülmesi sırasında çarpılma olmaz Bu sebeple; sert metaller, seramikler, paslanmaz çeliklerin sıkıştırılmasında kullanılabilir (Toplan N. 2015).



Şekil 2.1.4 İzostatik Presleme (Aritman İ. 2014).

2.1.2.1. Soğuk izostatik şekillendirme

Soğuk izostatik şekillendirme yönteminde; ıslak kalıplama ve kuru kalıplama olmak üzere iki farklı üretim yöntemi öne çıkmaz. Islak kalıplama tekniğinde, kalıp doldurulur ve sızdırmazlığı sağlanır akabinde bir sıvı haznesine yerleştirilir. Hidrolik bir sistem aracılığı ile esnek kalıba basınç uygulanır. Sürekli bir yöntem değildir. Sıkıştırılma yapıldıktan sonra kalıp sıvı içinden alınır ve iş parçası kalıptan çıkarılır. Kuru kalıplamada ise esnek kalıp basınç haznesine monte durumdadır. Esnek kalıp hazne dışına alınmaz. İki uçta yer alan tapalar ile toz doldurulur ve sıkıştırma sonra iş parçası kalıptan alınır

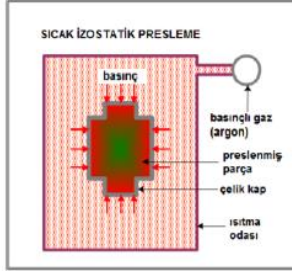


Şekil 2.1.5 Soğuk İzostatik Presleme (Aritman 2014).

2.1.2.2. Sıcak izostatik şekillendirme

Sıcak izostatik sıkıştırma yöntem olarak soğuk izostatik sıkıştırma yöntemine oldukça benzemektedir. Sıcak izostatik sıkıştırma yönteminde kap ısıtılır ve daha yüksek yoğunluk eldesi mümkün hale gelir. Diğer bir deyiş ile sinterleme, sıkıştırma aşamasına bu yöntem sayesinde dahil edilebilir. Soğuk izostatik

sıkıştırma yönteminde kap içinde, kalıp yüzeyinde basınç uygulamak amacıyla sıvılar kullanılırken, sıcak izostatik sıkıştırmada inert gazlar kullanılmaktadır (Wu Q 2010).

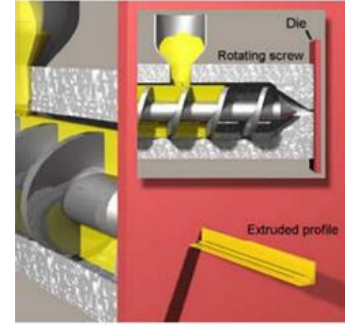


Şekil 2.1.6 Sıcak izostatik Presleme (SubsTech 2017).

Seramik malzemelerde uygun bir sıkıştırma ve yüksek sıcaklık altında uzun süre yapılırsa dahi relatif yoğunluk 80%-90% civarında kalmaktadır. Sinterleme işleminde tam yoğunluk eldesi ancak difüzyon hızının yüksek olduğu ergime noktasına yakın sıcaklık değerlerinde mümkün olmaktadır. Ancak seramikler çok yüksek ergime sıcaklıklarına sahiptirler bu nedenle klasik yöntemler çok yüksek maliyet ve teknik açıdan problem oluşturmasından dolayı mümkün olmamaktadır. Seramik malzemelerde yüksek yoğunluk eldesi sıcak izostatik şekillendirme ile mümkün hale gelmektedir. Sıcak izostatik sıkıştırma yönteminde yoğunluk, toz malzemenin hareketi ile gerçekleşmektedir. Bu durum daha düşük sıcaklıkta ve daha kısa sürede yüksek bir yoğunluk eldesine imkân verir. Sıcak izostatik sıkıştırma günden güne daha önemli ve kullanışlı hale gelmektedir. Günümüzde takım çelikleri, nükleer yakıt, titanyum alaşımlar, refrakter malzemeler, seramik kompozitler ve süper alaşımların üretiminde kullanılabilir (Saritaş- 1995).

2.1.3. Ekstrüzyon

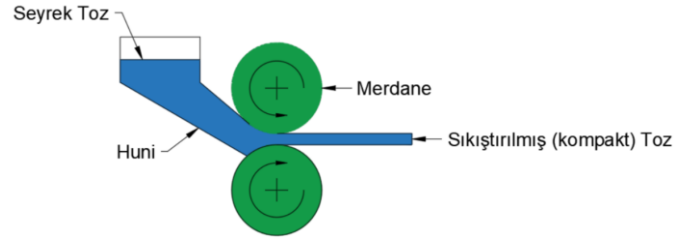
Ekstrüzyon ile sıkıştırma yöntemi, metal tozlarının şekillendirilmesinde kullanılabilen yöntemlerden biridir. Metal tozları kapalı bir kap içine konular ve kabın havası vakumlanır. Tozlar ısıtılarak ekstrüzyon yoluyla iş parçaları üretilir. Bu yöntemle üretilen iş parçalarında yüksek yoğunluk elde edilmektedir. Tozlar ısıtılır ise sinterlemeye gerek olmaz. Takım çeliklerinin üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Ekstrüzyon tekniği diğer basınçlı toz şekillendirme teknikleri ile kıyaslandığında üretim hızı açısından önemli avantajlara sahip olan bir teknik olup boru veya katalitik dönüştürücülerde kullanılan gözenekli seramik yapılar gibi iki boyutlu parçaların istenilen ebatlarda (boylarda) ekonomik olarak şekillendirilmesine imkan sağlayan bir yöntemdir. Bununla birlikte yüksek miktarlarda polimerik esaslı bağlayıcı kullanılıyor olması nedeniyle elde edilen ham parçaların sinter öncesinde ön ısıl işlemlerle uzaklaştırılıyor olması maliyet ve ek işlemler açısından bir dezavantaj oluşturmaktadır (Özay Ç. 2004).



Şekil 2.1.7 Toz ekstrüzyon (Özay Ç. 2004).

2.1.4. Toz haddeleme

Haddeleme işlemi silindir çiftleri arasında toz geçirerek sıkıştırma işlemidir. Haddeleme yöntemi Şekil 8'de verilmektedir. Haddeleme işleminde izlenen iki yöntem bulunmaktadır. İlk yöntemde tozlar silindir çiftlerine düşey olarak beslenir. İkincisinde ise tozlar yatay olarak beslenir ve şekillendirme gerçekleşir. Haddeleme işlemi sürekli bir yöntemdir. Bu yöntemle elde edilen parçalarda yüksek yoğunluk görülmektedir (Skotnikova, K ve ark. 2014).



Şekil 2.1.8 Toz Haddeleme (Skotnikova, K ve ark. 2014).

2.1.5. Toz haddeleme

Enjeksiyon ile toz sıkıştırma yönteminin temel prensibi, toz ile bağlayıcı karışımın bağlayıcının ergime sıcaklığı altında ısıtılması ve basınç ile kalıba yerleştirilerek şekillendirilmesidir. Soğutma sonrası bağlayıcı malzemeden uzaklaştırılır ve iş parçası sinterlemeye hazır hale gelir. Bu yöntem genel olarak seramik ve metal malzemeler için kullanılabilir. Bilinen yöntemlerle kalıplanamayan boşluklu parçalar, et kalınlığı 0,6-5mm aralığında olan tozlar enjeksiyonla kalıplanabilir. Enjeksiyonla toz sıkıştırma yöntemi karmaşık şekilli iş parçalarının sıkıştırılmasına imkân vermektedir (Toplan N. 2015).

2.2. Basınçsız Teknikler

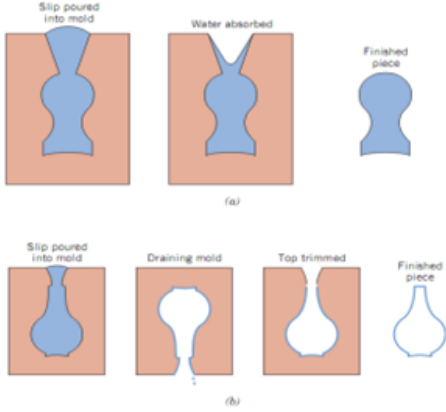
Toz sıkıştırma yöntemlerinde genel olarak basınç altında çalışan yöntemler geliştirilmesine rağmen özellikle seramik üretimi için kullanılan bazı basınçsız yöntemlerde bulunmaktadır. Bu yöntemlerin ortak özelliği iş parçasına kendi ağırlığını taşıyacak kadar yoğunluk verme işlemi için basınç yerine bağlayıcı kullanılmasıdır.

2.2.1.1. Çamur (slip) döküm

Çamur döküm seramiklerin şekillendirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. İnce seramik tozlarının %25-30 oranında bir çözücü ile karıştırılarak çamur haline getirilir ve kalıp içine dökülür. Çamur içindeki çözücü alçı kalıpta yer alan gözenekler tarafından emilerek çözücü kalıptan alınır. Bir sonraki aşama şekillendirilmiş iş parçasının kalıptan alınmasıdır. Çamur döküm

yöntemi diğer şekillendirme yöntemleri ile üretilemeyen karmaşık geometrilerin üretimine olanak sağlar.

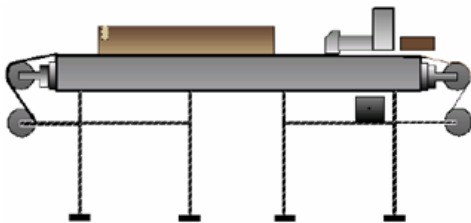
Yaş döküm, birkaç aşamada gerçekleşir. Bu nedenle üretim hızı yavaştır. Bu nedenle seri üretime uygun değildir. Bu yöntemi hızlandırmak için basınç uygulanabilir. Böylece sistem basınçlı yaş döküm adını alır. Basınçla şekillenen çamur daha az su içerdiğinden kuruma işlemi daha kısa sürer (Çalışkan F. 2016).



Şekil 2.2.1 Çamur (Slip) Döküm (Çalışkan F. 2016).

2.2.1.2. Şerit döküm

Seramiğin sac halinde incecik ve düz bir şekilde üretilebildiği bir yöntemdir. Şerit dökümde ilk aşama uygun bir çamurun hazırlanmasıdır. Çamur bağlayıcı ve toz karışımı ve pekiştirici ilave edilerek hazırlanır. Çamur doktor bıçağının altından hareket ederek şerit oluşturur. Döküm esnasında çamur bir cam altlığın üzerine yerleştirilir. Doktor bıçağı plakası hareket ettirilerek şerit kalınlığı ayarlanabilir. Döküm sonrasında cam ısıtılır ve malzemeden ayrılması sağlanır. Daha sonra kesme işlemi gerçekleştirilir ve şeritler kurutulur. Daha sonra sinterleme gerçekleştirilir (Hayahi T 1991, Schuetz ve ark 1997). Şerit döküm yöntemin uygulanabilmesi için bazı ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemler; hareketli konveyör, kurutma sistemi, ısıtıcı sistem, döküm makinesi. Bu yöntem 0.01-1 mm kalınlığında elektronik paketler, elektronik devre altlıkları ve kapasitörlerin üretiminde kullanılabilir. Şerit döküm yöntemi yalnızca iki boyutlu parça üretimine imkân sağlar. Yüzey parlaklığı kontrolü zordur. Yüzeyde pürüzler oluşabilir.



Şekil 2.2.2 Şerit Döküm Yöntemi (Lindkop. P ve ark 1986).

3. Toz Sıkıştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Toz metalürjisi yöntemi birçok uygulama alanına sahiptir. Bu nedenle farklı özellikler içeren malzeme türleri için farklı sıkıştırma türlerinin ihtiyacı irdelenmesi gereken bir konu haline gelmiştir. İkinci bölümde bahsedilen toz sıkıştırma yöntemlerinin, bu bölümde, yatırım maliyeti, kalıp maliyeti, yoğunluk, üretim hızı, uygulanabilirliği materyal türü, üretim boyutu gibi parametreler altında karşılaştırılması sunulacaktır. Tek yönlü presleme, üretim hızı, yatırım ve kalıp maliyeti açısından oldukça avantajlıdır. Tek yönlü preslemede sadece iki boyutlu parçalar üretilebilir ve iş parçasından eşit bir yoğunluk ince parça haricinde sağlanamaz. Çift yönlü preslemede ise üretim hızı yüksek, elde edilen yoğunluk tek yönlü preslemeye göre daha yüksek olmakla birlikte kalıp ve yatırım maliyetleri tek yönlü preslemeye nazaran bir miktar daha fazladır. Ayrıca tek yönlü presleme gibi sadece iki boyutlu iş parçalarına uygulanabilir. Tek ve çift yönlü preslemeye alternatif olarak ılık presleme hakkında konuşabiliriz. Yöntem olarak iki presleme türünden farkı ılık presleme sıcaklığı oda sıcaklığından yüksek, sinterleme sıcaklığından düşük seçilir. Böylece sinterleme süresinin kısılması hedeflenmiştir. İzostatik presleme, karmaşık şekilli parçaların, yüksek yoğunluk ile üretiminde kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu yöntemde kalıp ve yatırım maliyetleri yüksektir ve sürekli bir yöntem değildir. İzostatik presleme soğuk ve sıcak olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İzostatik presleme soğuk ve sıcak olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sıkıştırma, sinterleme sıcaklığının altında yapıldığında soğuk, sinterleme sıcaklığında olursa sıcak izostatik şekillendirme olarak isimlendirilmektedir. Sıcak izostatik şekillendirmenin soğuk izostatik şekillendirmeden üstünlüğü, sıkıştırma sonra sinterleme gereksiniminin olmamasıdır. Ekstrüzyon yöntemi genel olarak iki boyutlu boru veya katalitik malzemelerin üretiminde kullanılır. Üretim hızı açısından oldukça avantaj sağlamaktadır. Sürekli bir yöntemdir. Ekstrüzyon yöntemi kalıp maliyeti açısından olumsuzlar barındırmaktadır. Yatırım maliyeti ise çok yüksek değildir. Toz enjeksiyon yöntemi ise geleneksel yöntemler ile kalıplanamayan karmaşık şekilli veya çok küçük boyutlu karmaşık şekilli iş parçalarının üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde toz bağlayıcı yardımıyla hamur haline getirilir ve kalıba yerleştirilir. Sürekli bir yöntem değildir. En büyük dezavantajı bağlayıcıların iş parçasından uzaklaştırılması maliyetlidir. Toz haddeleme yöntemi ise metal tozlarının bir dizi silindir arasından beslenerek şekillendirilmesidir. Bu yöntem iki boyutlu iş parçalarının üretiminde etkili bir yöntemdir. Toz haddeleme ile sıkıştırılan iş parçalarından yüksek yoğunluk eldesi mümkündür. Çamur (slip) döküm karmaşık şekilli seramik malzemelerin üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde çok ince boyutlara sahip seramik tozları bağlayıcı ilavesi ile çamur haline getirilir ve kalıba yerleştirilir. Yatırım ve kalıp maliyetleri düşüktür. Sürekli bir yöntem olmayan çamur döküm yönteminde sıkıştırma sonrası bağlayıcı ilave katkıların iş parçasından uzaklaştırılması gerekmektedir. Şerit döküm ise iki boyutlu seramik tozlarının sıkıştırılmasında kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde de çamur döküm yöntemindeki gibi tozlar çamur haline getirilir. Bu nedenle şerit döküm yönteminde iş parçasında sıkıştırma sonra kurutma işlemi gereklidir. Şerit döküm yönteminde, çamur döküme oranla daha fazla yoğunluk eldesi mümkündür.

Tablo 4.1 Toz sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması

	Kalıp Maliyeti	Yoğunluk	Üretim hızı	Ek işlem	Malzeme	Boyut	Yatırım Maliyeti
Tek Yönlü Pres	Düşük	Düşük	Hızlı	Yok	Metal	2-D	Düşük
Çift Yönlü Pres	Orta	Orta	Hızlı	Yok	Metal	2-D	Orta
Soğuk izostatik Şekillendirme	Yüksek	Yüksek	Yavaş	Yok	Metal, Seramik	3-D	Yüksek
Sıcak izostatik Şekillendirme	Yüksek	Yüksek	Yavaş	Yok	Metal, Seramik	3-D	Yüksek
Çamur Döküm	Düşük	Orta	Yavaş	Kurutma,	Seramik	3-D	Düşük
Şerit Döküm	Düşük	Yüksek	Yavaş	Kurutma	Seramik	2-D	Düşük
Ekstrüzyon	Yüksek	Yüksek	Hızlı	Kesme	Metal, Seramik	2-D	Orta
Enjeksiyon	Düşük	Yüksek	Yavaş	Kurutma	Metal, Seramik	3-D	Orta
Toz Haddeme	Düşük	Yüksek	Hızlı	Kesme	Metal	2-D	Orta

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Toz metalurjisi yöntemi geleneksel üretim yöntemlerine alternatif bir yöntemdir. Toz metalurjisi tozların üretilmesi, sıkıştırılması ve sinterlenmesi aşamalarından oluşmaktadır. Uygun bir üretim planı oluşturabilmek için toz sıkıştırma mekanizmalarının tanınması ve uygun yöntemi belirlenmesi gereklidir. Bu makaleden Tek yönlü presleme, çift yönlü presleme, soğuk izostatik sıkıştırma, sıcak izostatik sıkıştırma, toz dövme, toz enjeksiyon, toz ekstrüzyon, toz haddeme, çamur (slip) döküm ve şerit döküm yöntemleri detaylı olarak anlatılmış ve bu yöntemlerin karşılaştırması sunulmuştur.

Kaynakça

- Alpugan, Z. (1981). T/M'de Presleme Tekniği ve Nükleer Yakıt Üretimine Uygulaması. *Tübitak*.
- Aritman, İ. (2014). Soğuk İzostatik Presleme ile Üretilen Al/SiCp Metal Matrisli Kompozitlerde Faktör Etkileşimlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi ve Karakterizasyon Çalışmaları. *Yüksek Lisans Tezi*. Ege Üniversitesi.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Winston, K. (2010). Design for Powder Metal Processing. *Product Design for Manufacture and Assembly* (s. 11).
- Çalışkan, F. (2016). Seramiklerin Şekillendirilmesi. *Ders Notları*. Sakarya Üniversitesi.
- Dikici, B. (2010). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Nikel Titanyum Alaşımlarının Üretimi, Yüksek Lisans Tezi*. İTÜ.

- German, M. R. (2005). Powder Metallurgy Particulate Materials Processing. *Metal Powder Industries Federation*, (s. 528). New Jersey.
- Hayashi, T. (1991). Surface Chemistry of Ceramic Shaping Processes. *FC Annual Report for Overseas Readers* (s. 16-36). Japan Fine Ceramic Association.
- Henderson, R. J., Chandler, H. W., Akisanya, A. R., Barber, H., & Moriarty, B. (July 2020). Finite Element Modeling of Cold Isostatic Pressing. *Journal of the European Ceramic Society*, (s. Volume 20, 1121-1128). doi:https://doi.org/10.1016/S0955-2219(99)00280-0.
- Herman, S. (1978). Sintering an Economical Process for the Manufacture of Metallic Precision Parts. *Mannesman Konferans Notları*. Almanya.
- Kempton, H. R. (1993). History of Powder Metallurgy. *Metals Handbook, Volume 7* (s. 14-20). içinde U.S.A.
- Lindkop, P., & Arbstedt, P. (1986). Iron Powder Manufacturing Technigues: A Brief Review. *Powder Metallurgy, Volume 29, Number 1*. içinde doi:https://doi.org/10.1179/pom.1986.29.1.14.
- Mistler, R. E., & Twinname, E. R. (2000). Tape Casting, Theory and Practice. *American Ceramic Society*. Westerville, OH.
- Novak, P., Benediktova, D., Mestek, S., Tsepeleva, A., & Kopecek, J. (10 January 2023). Aluminum alloys with natural ratio of alloying elements manufactured by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compunds*, (s. Volume 931). doi:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167440.

- Özay, Ç. (2004). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Cu-C-Al₂SiO₅ Kompozitinin Abrisiv Aşınma Dayanımının Araştırılması.
- Prof. J. S. Colton. (2011). Manufacturing Processes and Equipment.
- Rojas-Diaz, L., Verano-Jimenez, L., Munoz-Garcia, E., Esguerra-Arce, J., & Esguerra-Arce, A. (15 January 2020). Production and characterization of aluminum powder derived from mechanical saw chips and its processing through powder metallurgy. *Powder Technology*, (s. vOLUME 360, 301-311).
- Sarıtaş, S. (1995). Powder Metallurgy Processed Materials. *Metallurgy and Materials* (s. 437-445). içinde Gazi Üniversitesi.
- SubsTech ,Isostatic Pressing of Metallic Powders. (2017, 12 11). http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=isostatic_pressing_of_metallic_powders.
- Schuetz, J. E., Khoury, I. A., & Di Chiara, R. A. (1997). Water-Based Binder for Tape Casting. *Ceramic Industry* (s. 42-44). içinde
- Skotnikova, K., Kursá, M., & Szurman, I. (2015). *Powder Metallurgy*. Technical University of Ostrava.
- Toplan, N. (2015). Pekiştirme ve Presleme Teknikleri. *Ders Notları*. Sakarya Üniversitesi.
- Wu, Q., Li, C., & Tang, H. (15 September 2010). Surface Characterization and Growth Mechanism of Laminated Ti₃SiC₂ Crystals Fabricated by Hot Isostatic Pressing. *Applied Surface Science, Volume 256*, 6986-6990. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.05.012>