

# Metal ve Seramik Tozlarının Patlayıcı Yardımıyla Sıkıştırılması: Tekniğin Uygulamalarına Genel Bir Bakış

Orhan Gülcan<sup>1</sup>

## ÖZ

Metal ve seramik tozlarının patlayıcı yardımıyla sıkıştırılması tekniği, patlayıcının patlatılması neticesinde, birkaç mikrosaniye içinde oluşan yüksek şok dalgası basıncının, tozların sıkıştırılmasında kullanılması esasına dayanır. Patlayıcı yardımıyla sıkıştırma tekniği, özellikle tungsten (W) gibi malzemeler için, bazı fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılabilir tek yöntemdir. Bu çalışmada, patlayıcı yardımıyla sıkıştırma yöntemi hakkında detaylı bilgiler verilecek olup, literatürde yapılan çalışmalar incelenecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Patlayıcı, uçan plaka, şok dalgası, metal tozu

## Explosive Compaction of Metal and Ceramic Powders: A Review of the Application of the Technique

### ABSTRACT

Explosive compaction of metal and ceramic powders is based on the fact of using high shock wave pressure formed in a few microseconds after the explosion of the detonator in the compaction of powders. Explosive compaction technique is the only method, especially for materials like tungsten (W), for improving some physical and mechanical properties. In this study, detail information about explosive compaction method will be given and studies done in literature will be investigated

**Keywords:** Explosive, flyer plate, shock pressure, metal powder

---

Geliş/Received : 25.12.2017

Kabul/Accepted : 08.10.2018

<sup>1</sup> Dr., Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. - ogulcan1981@gmail.com

## 1. GİRİŞ

Metal ve seramik tozlarının yüksek hızda, patlayıcı yardımıyla sıkıştırılması tekniği, özellikle seramik gibi sıkıştırılması çok zor olan tozların sıkıştırılarak yoğunluklarının artırılması işlemi için kullanılmaktadır [1]. Bu teknikte, patlayıcının patlaması neticesinde oluşan şok dalgaları metal veya seramik tozlarını sıkıştırarak, disk, plaka, silindir, boru veya koni şeklinde parçaların oluşmasını sağlar [2].

Birçok toz sıkıştırma tekniğinde, elde edilen parçanın yoğunluk ve mukavemet değeri istenilen seviyede değildir. Bundan dolayı üretilen parçalara sinterleme uygulanarak yoğunluk ve mukavemet değerleri artırılır. Patlayıcı yardımıyla sıkıştırma yönteminde ise ilave bir sinterleme işlemine gerek kalmadan, parça istenilen yoğunlukta üretilebilir [3].

Patlayıcı yardımıyla sıkıştırma tekniği, özellikle tungsten gibi malzemeler için, bazı fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılabilir tek yöntemdir. Bu yöntemin diğer konvansiyonel yöntemlere göre en önemli avantajlarından birisi, bağlayıcı gibi ilave maddelere ihtiyaç duymadan mikrosaniye mertebesinde sürelerde yoğun parçaların üretilmesine imkân vermesidir [4].

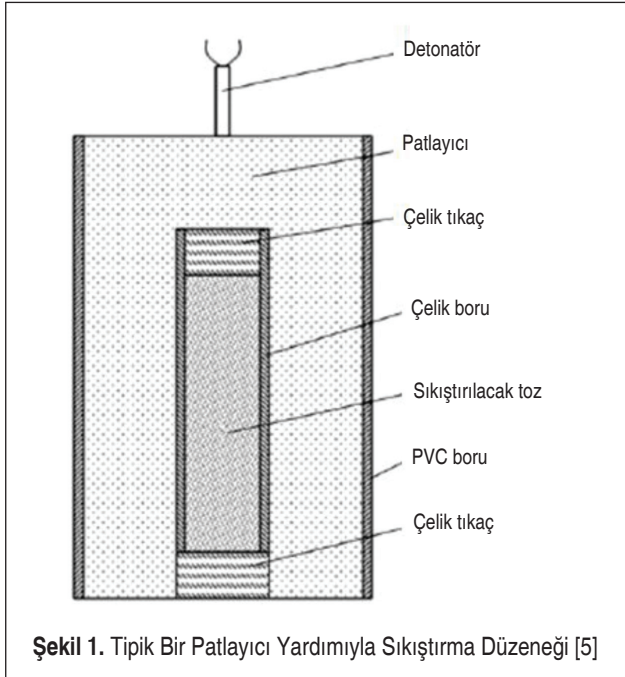
## 2. PATLAYICI YARDIMIYLA SIKIŞTIRMA DÜZENEGİ VE MEKANİZMASI

### 2.1 Tekniğin Özellikleri

Şekil 1’de tipik bir patlayıcı yardımıyla sıkıştırma düzeneği gösterilmiştir.

Patlayıcı yardımıyla sıkıştırma yönteminde, şok dalgası tozların içerisinde yayılırken, toz tanecikleri birbirine çok yüksek hızlarda çarpır, bunun neticesinde taneciklerin yüzeyinde yüksek sıcaklık, toz yatağında ise yüksek basınç oluşur. Yüksek basınç altında, toz tanecikleri daha ufak parçalara kırılarak birbirleri arasındaki boşlukları doldurur ve yüksek sıcaklık altında da birbirlerine yapışır [6]. Şok dalgası toz taneciklerine çarptığında, plastik deformasyon ve tanecikler arası sürtünme mekanizmaları sayesinde toz tanecikleri sıkışır [7].

Patlayıcının patlaması neticesinde oluşan şok dalgası, malzemenin sonik hızının yaklaşık %50’si kadar bir hızla ilerler [8]. Elde edilen şok basıncı ise 90 GPa’ya kadar çıkabilmektedir [9]. Bu sayede örneğin yüksek saflıktaki titanyum (Ti) tozlarının yüksek hızda sıkıştırılması neticesinde %98’den daha yüksek yoğunluk değerleri elde edilebilmektedir [10]. Yüksek hızda sıkıştırma neticesinde yüksek yoğunlukta 5 kg’dan daha ağır toz metal parçalar elde edilebilmektedir. Tozların sıkıştırılma süresi ise 20 ms’den daha azdır. [11].



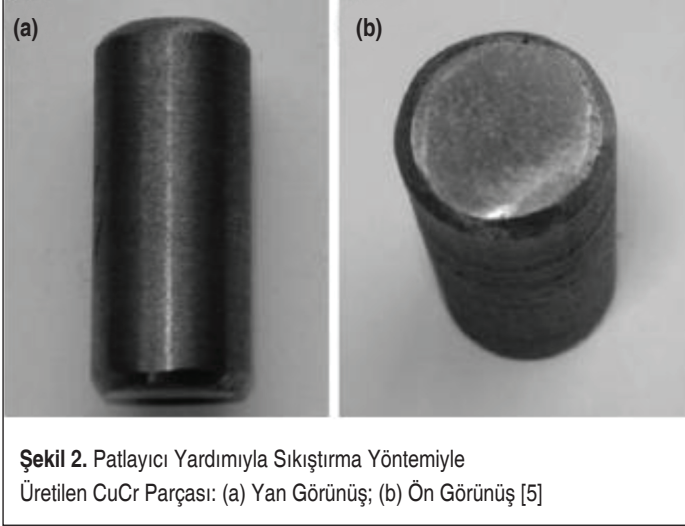
Şekil 1. Tipik Bir Patlayıcı Yardımıyla Sıkıştırma Düzeneği [5]

## 2.2 Tekniğin Çeşitleri

Patlayıcı yardımıyla sıkıştırma tekniği, patlayıcının patlatılması neticesinde, birkaç mikrosaniye içinde oluşan yüksek şok dalgası basıncının kullanılması esasına dayanır. Bu amaçla iki farklı yöntem kullanılır: direkt yöntem ve indirekt yöntem. [3].

Direkt yöntemde, tozlar silindirik metal bir kutunun (genellikle 0,1 cm kalınlıkta tavlanmış çelik) içerisine dökülür ve en yüksek ham yoğunluğu elde etmek için metal kutu elle sallanır. Kutu, tozla doldurulduktan sonra her iki ucu tıkaçlarla kapatılır. Daha sonra bu silindirik kutu başka bir silindirik kutunun içine, merkezleyecek şekilde yerleştirilir ve iki kutu arasında kalan boşluğa patlayıcı madde yerleştirilir (Şekil 1). Detonatörün ateşlenmesi neticesinde patlayan patlayıcının oluşturduğu dalga, silindirin aksel yönünde ilerleyerek tozların sıkışmasını ve bunun sonucunda da tozların birbirlerine yapışmasını sağlar. Oluşan dalganın basıncı ve süresi, elde edilecek parçanın nihai yoğunluğunu belirler [12].

Zheng vd direkt yöntem kullanarak Bakır (Cu) ve Krom (Cr) tozlarını sıkıştırmışlardır. 0,8 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa, 3112 m/s patlama hızına, 2 GPa patlama basıncına ve 20 mm kalınlığa sahip patlayıcıların kullanıldığı çalışmada, %96'nın üzerinde göreceli yoğunluk değeri elde edilmiştir. Cr taneciklerinin Cu matrisinin içinde düzgün bir şekilde dağılım gösterdiği belirtilmiştir (Şekil 2) [5].

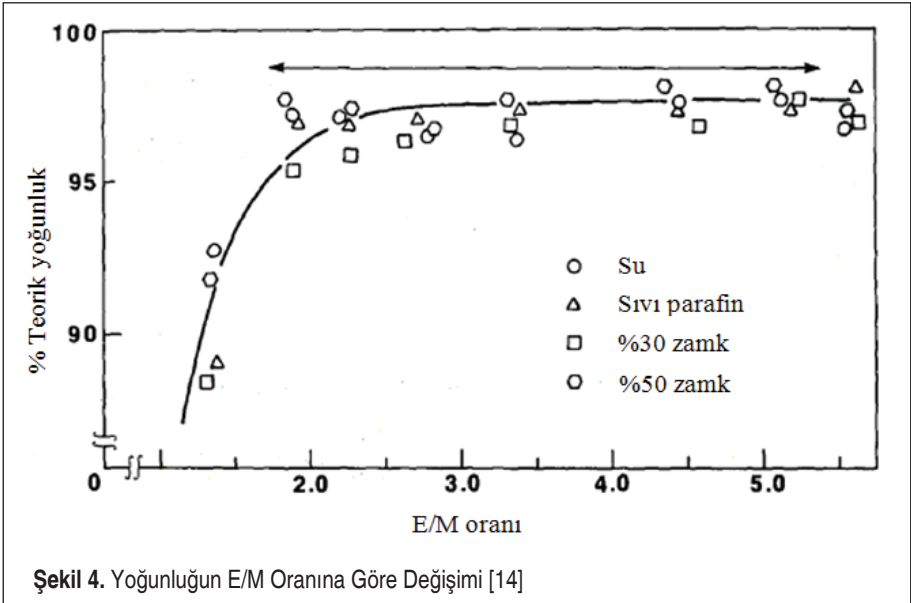
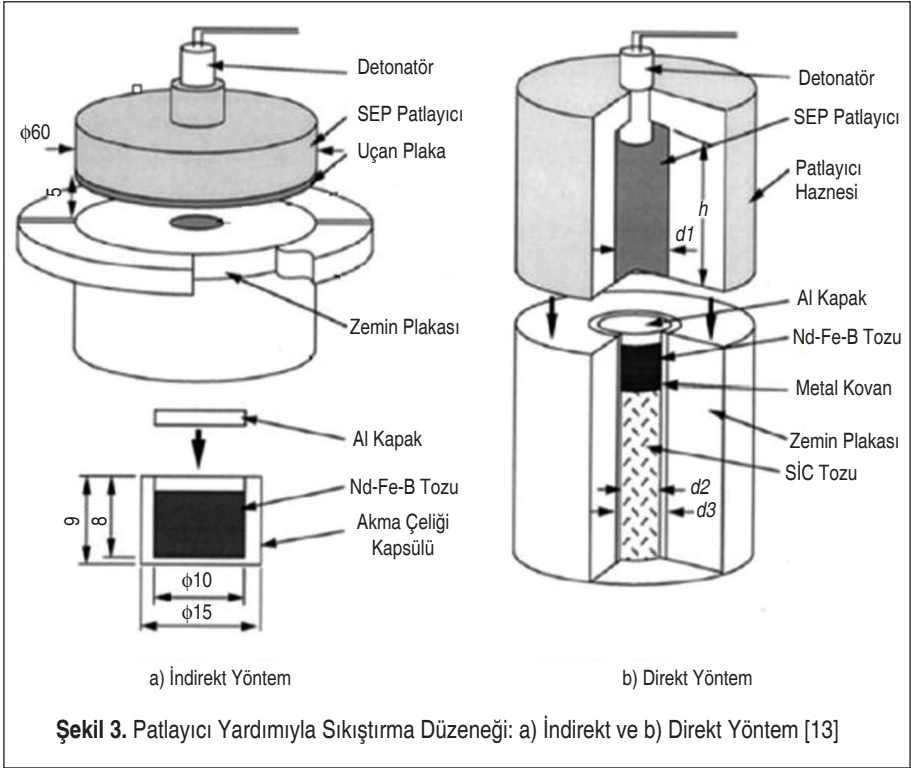


İndirekt yöntemde ise patlayıcı ile metal tozları arasına bir ara ortam yerleştirilerek, patlama neticesinde elde edilen şok basıncının ara ortam sayesinde tozlara transfer edilmesi sağlanır (Şekil 3).

Ando vd [13]  $Nd_{13}Fe_{77}Co_5B_5$  tozlarını patlayıcı yardımıyla sıkıştırmışlardır. İki farklı sıkıştırma yönteminin denendiği (Şekil 3) çalışmada, uçan plaka yönteminden elde edilen numunelerde, yansıyan şok dalgalarından dolayı çatlaklar oluştuğu, direkt yöntemde ise herhangi bir çatlığa rastlanmadığı belirtilmiştir.

İndirekt yöntemde ara ortam önem arz etmektedir. Zohoor ve Mehdipoor ara ortam olarak suyun kullanılmasının, üretilen parçanın mekanik özellikleri üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında, patlama hızı 8193 m/s olan C4 patlayıcı kullanmışlardır. Yazarlar, ara ortam olarak suyun kullanıldığı durumda, her hangi bir ara ortam kullanılmadığı duruma göre, daha yüksek sertlikte (570 Vickers) ve daha yoğun ( $18,5 \text{ g/cm}^3$ ) parçalar elde etmişlerdir [4].

Chiba vd [14]  $44 \mu\text{m}$ 'den daha küçük Ti tozlarının patlayıcı yardımıyla sıkıştırılmasında farklı ara ortamlar kullanmışlardır. Bunun için içi Ti tozu dolu tüpü, başka bir tüpün içine yerleştirmişler ve iki tüpün arasını sırasıyla su, sıvı parafin ve zambak kullanmışlardır. Farklı E/M oranları için (patlayıcı kütlesi / toz ve tüpün kütlesi) elde edilen deney sonuçlarına göre, %95 teorik yoğunluk elde edilebilmiştir (Şekil 4).



### 2.3 Tekniğin Avantaj ve Dezavantajları

Tozların yüksek hızda sıkıştırılması, teknolojik olarak şu durumlarda faydalıdır:

- Her bir toz taneciğinin normal yöntemlerle sıkıştırılmayacak kadar yüksek mukavemete sahip olması durumunda,
- Sıkıştırma sonrasında yapılan sinterleme işleminin, tozun özelliklerinde istenmeyen değişimlere sebep olduğu durumlarda,
- Normal sıkıştırma sonucunda elde edilen parçada çok fazla çatlakın olması ve bundan dolayı parçanın kırılmaya karşı dayanıksız olması durumlarında [15].

Patlayıcı yardımıyla sıkıştırmanın düşük işleme süresi ve düşük maliyet gibi avantajlarının yanı sıra [16], yansıyan dalgalar sebebiyle parçada oluşan çatlaklar [17] ve çok hassas parçaların elde edilememesi [14] gibi dezavantajları vardır.

### 2.4 Teknikte Kullanılan Patlayıcılar

Patlayıcı yardımıyla sıkıştırma tekniğinde farklı türlerde patlayıcılar kullanılabilir. Bunların en sık kullanılanları ve özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Patlayıcı Yardımıyla Sıkıştırmada Kullanılan Bazı Patlayıcılar ve Özellikleri [18]

Patlayıcı adı	Patlama hızı (m/s)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
Amonyum Nitrat	5270	1.30
Üre nitrat	4700	1.59
TNT	6900	1.60
RDX	8750	1.76

## 3. PATLAYICI YARDIMIYLA SIKIŞTIRMA ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 3.1 Etki Eden Faktörler Üzerine Yapılan Çalışmalar

Patlayıcı yardımıyla sıkıştırma tekniğinde, patlayıcı miktarı, patlayıcı çeşidi, toz miktarı, toz konulan kabın boyutu ve basınç gibi parametreler elde edilen parçanın mekanik özellikleri üzerinde ciddi etkilere sahiptir. Literatürde bu parametrelerin etkisi üzerine farklı çalışmalar yapılmıştır.

Sivakumar vd [19] 2124 Alüminyum (Al) ve hacimce %20 silikon karbürü (SiC) patlayıcı yardımıyla sıkıştırmışlardır. Patlayıcı kalınlığının etkisinin incelendiği çalışmada, 15 mm patlayıcı kalınlığında en yüksek yoğunluğun elde edildiği, bu kalınlıktan daha fazla patlayıcı kullanıldığında, oluşan yüksek basınçtan dolayı çok fazla gözenek ve çatlak oluştuğu bundan dolayı da yoğunluğun azaldığı belirtilmiştir.



Cambronerio vd [12] patlayıcı yardımı ile T42 ve M311 yüksek hız çeliği tozlarını sıkıştırmışlardır. Yoğunluğun üzerinde patlayıcı ağırlığı, toz ağırlığı, tozun konulduğu kabın boyutu ve toz kalınlığının etkilerinin incelendiği çalışmada, bütün koşullarda %98'in üzerinde teorik yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Patlayıcı ağırlığının toz ağırlığına oranı azaltılarak ve tozun konulduğu kabın boyutu artırılarak sıkıştırma oranı değiştirilmiştir. Fakat bu değişiklikler, elde edilen ürünün yoğunluğu üzerinde ciddi bir etki yapmamıştır.

Zheng vd [20] Cu (74µm) ve  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$  (100 nm) tozlarını C-4 patlayıcılar kullanarak sıkıştırmışlardır. Çelik bir tüpün içine konulan karışım tozları patlayıcı yardımı ile sıkıştırmadan önce mekanik olarak %60 teorik yoğunluğuna kadar sıkıştırılmıştır. Daha sonra 800 °C'de 30 dk sinterlenen tozlar, patlayıcı yardımıyla sıkıştırılmıştır. Patlama basıncı arttıkça (2, 4 ve 6 GPa) elde edilen parçanın yoğunluk ve sertliğinin arttığını, bunun sebebinin ise basınç arttıkça tozlara daha fazla deformasyon enerjisinin iletildiğini ve bu sayede daha az gözenek oluştuğunu ve taneciklerin birbirlerine daha kuvvetli bağlandıklarını belirtmişlerdir.

Li vd [18]  $\text{ZrB}_2$ -SiC seramiklerin patlayıcı yardımıyla sıkıştırılmasında patlayıcı tipi ve patlayıcı kütesinin etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, elde edilen parçanın yoğunluğunun %93,37'ye çıktığını belirtmişlerdir. Patlayıcı kütlesi arttıkça yoğunluğun arttığının belirtildiği çalışmada, sırasıyla RDX, amonyum nitrat, TNT ve üre nitrat kullanılarak en fazla yoğunluğa sahip parçaların elde edildiği belirtilmiştir.

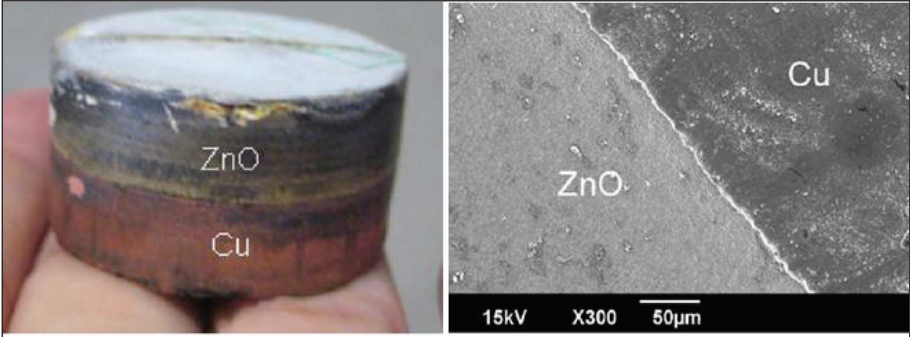
Karimi vd [21] 5 µm tanecik büyüklüğüne sahip  $\text{TiB}_2$  tozlarını patlayıcı yardımı ile sıkıştırmışlardır. 8193 m/s patlama hızına sahip HMX patlayıcının kullanıldığı çalışmada, 2550 HV sertlikte, %98 teorik yoğunlukta parçalar elde edilmiştir. Yazarlar ayrıca patlayıcı miktarı arttıkça, mikrosertlik, yoğunluk ve azami basıncın da arttığını belirtmişlerdir.

### 3.2 Farklı Metal Tozları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Patlayıcı yardımıyla sıkıştırma tekniğinde, konvansiyonel yöntemlerle sıkıştırılması çok zor veya imkânsız olan birçok toz çeşidi başarılı bir şekilde sıkıştırılabilmektedir. Literatür incelendiğinde farklı toz çeşitlerinin bu amaçla kullanıldığı görülmektedir.

Kim vd [22] çinko oksit (ZnO) ve Cu tozlarını patlayıcı yardımıyla sıkıştırmışlardır (Şekil 5). 10 GPa şok basıncının kullanıldığı deneylerde, çatlak olmayan ve %99 yoğunluğa sahip, 250-280 Hv sertlikte parçalar elde edilmiştir. Bu değerler ticari olarak sinterlenmiş ZnO'nun değerlerinden (%95,7 yoğunluk, 200–220 Hv sertlik) çok daha yüksektir.

Farinha vd [23] nano boyutu Cu tozlarını patlayıcı yardımıyla sıkıştırmışlar ve 100 nm boyuttan küçük parçalar elde etmişlerdir. Benzer şekilde Mamalis ve Gioftsidis



Şekil 5. Deney Sonucunda Elde Edilen ZnO-Cu Parça ve Birleşim Çizgisi [22]

125 µm'den daha küçük boyutlardaki küresel Cu tozlarını patlayıcı yardımıyla başarılı bir şekilde sıkıştırmışlardır [24].

Cu tozlarının farklı tozlarla karışımı da yine patlayıcı yardımıyla sıkıştırılıp, kompozit parçalar elde edilmiştir. Godibadze vd [25] Cu-W ve Cu-C tozlarını patlayıcı yardımıyla sıkıştırmış ve yüksek yoğunluğa ve üstün elektrik iletkenliğe sahip parçalar elde etmişlerdir. Zhou ve Chen, W-Cu tozlarını 3 dakikadan daha az bir sürede 700–1000 °C'ye kadar ısıtmış ve ardından 3-4 GPa basınçta sıkıştırmışlardır. Her hangi bir sinterleme aktivatörünün kullanılmadığı çalışmada %96,3'e kadar çıkan yüksek yoğunluk değerleri elde edilmiştir [26]. Aynı yazarlar, çok düşük şok basıncı (~1 GPa) kullanarak, Cu kaplamalı W tozlarını sıkıştırmışlardır. Yazarlar, %98'den büyük yoğunluğa sahip parçaların bu yöntemle başarılı bir şekilde üretilebildiğini belirtmişlerdir [27].

Hegazy, Cu tozları ve polipropilen granüllerini amonyum nitrat ve TNT karışımı kullanılarak patlayıcı yardımıyla sıkıştırmıştır. 3,2 GPa basınçta %94 yoğunluk elde edilirken, 5,6 GPa'da %98,7 yoğunluk değeri elde edilmiştir. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarına göre, taneciklerin merkezlerinde 208+5 HV mikrosertlik çıkarken, tanecikler arası sınırlarda 223+3 HV mikrosertlik değerleri ile karşılaşılmıştır. Dolayısıyla tanecikler arası sınırlardaki mikrosertlik değerleri, taneciklerin yüzeyinden daha fazladır. Bunun muhtemel sebebinin, bu sınırların çok hızlı bir şekilde ergiyip soğuması olduğu belirtilmiştir [3].

Patlayıcı yardımıyla sıkıştırma yönteminde amorf malzemelerin sıkıştırılabilirliği de denenmiştir. Bu amaçla Cline ve Hopper  $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$  [28], Morris ise Metglas 2826 ( $Nb_{40}Fe_{40}P_{14}B_6$ ) [29] amorf alaşım tozlarını sıkıştırmışlardır. Kasiraj vd [30] Markomet 1064 amorf alaşım ( $Ni_{55,8}Mo_{25,7}Cr_{9,7}B_{8,8}$ ) tozlarını patlayıcı yardımıyla sıkıştırmış ve yüksek bir yoğunluk değeri elde etmek için en az 5 GPa patlama basıncına ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Murr vd [31] Metglas® 2605S-2 ( $Fe_{78}B_{13}Si_9$ ) amorf





tozları patlayıcı yardımıyla başarılı bir şekilde sıkıştırmışlardır. Shao vd [32] kobalt amorf alaşımını ( $\text{Co}_{70}\text{Fe}_2\text{Mn}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ ) 11 GPa'da sıkıştırmışlar ve %99,7'ye kadar çıkarılan teorik yoğunluğa sahip parçalar elde etmişlerdir. Chiba vd [33]  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$  ve  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ /(Nikel (Ni) veya Kobalt (Co)) manyetik tozlarını patlayıcı yardımıyla silindirik kutularda sıkıştırmışlardır. Elde edilen parçaların merkezinde delik ve/veya çatlaklar oluşmuştur.

Ni, Ti, Al, Bor karbür ( $\text{B}_4\text{C}$ ) gibi farklı tozlar da bu yöntemle başarılı bir şekilde sıkıştırılabilmektedir. Tomoshige vd [16] titanyum, odunkömürü ve bor karbür tozlarını patlayıcı yardımıyla sıkıştırarak TiC/TiB<sub>2</sub> parçalar elde etmişlerdir. C/Ti oranının artmasıyla, elde edilen parçanın yoğunluğunun 4,72 Mg/m<sup>3</sup>'e, sertliğinin ise 32 GPa'ya kadar çıktığı belirtilmiştir.

Emelchenko vd [34] 56 nm ortalama tanecik büyüklüğüne sahip Ni tozlarını 3 GPa'dan büyük basınçta sıkıştırarak 100 nm tanecik büyüklüğüne sahip gözeneksiz parçalar elde etmişlerdir. Bu malzemeyi 600 °C'de tutarak, mukavemetini 1050–1100 MPa'a kadar çıkartmışlardır.

Hokamoto vd [35] 4–8 µm çapa sahip büyük tozlar ve 0–2 µm çapa sahip küçük tozların karışımından oluşan elmas tozlarını PBX patlayıcı kullanarak sıkıştırmışlardır. 40 GPa basınç ve 1100 °C sıcaklığın kullanıldığı deneylerde 90 GPa'dan daha yüksek sertliğe sahip parçalar elde edilmiştir.

Yücel and Tekin yaklaşık 50 µm boyutunda  $\text{B}_4\text{C}$  (%98  $\text{B}_4\text{C}$  ve %2 C) ile 50 µm boyutunda saf Al (%99,8 Al) veya yaklaşık 50 µm boyutunda 7075 Al alaşım (%5,5 Zn, %2,5 Mg ve %1,5 Cu) toz karışımlarını 10-12 GPa basınç altında patlayıcı yardımıyla sıkıştırmışlardır.  $\text{B}_4\text{C}$ 'yi Al içinde hacimce %30, 50 ve 80 oranlarında, 7075 Al içinde ise %0, 40 ve 60 oranlarında karıştırmışlardır.  $\text{B}_4\text{C}$  oranı arttıkça daha yüksek sertlik, daha düşük teorik yoğunluk elde edildiği belirtilmiştir. Elde edilen parçalarda mikroçatlaklara rastlanmamıştır [36].

Szewczak vd [37]40-50 µm boyutlarında Al ve 150-200 µm boyutlarında Ti tozlarını ¼ ve ½ oranlarında (Ti/Al) karıştırarak, MWZA120 patlayıcıyla 4,4 GPa basınçta sıkıştırmışlar ve 400 nm ortalama tanecik boyutlarına sahip parçalar elde etmişlerdir.

Tomoshige vd [1] 45 µm ortalama tanecik büyüklüğüne sahip Ti tozları, 1-2 µm ortalama tanecik büyüklüğüne sahip grafit tozları ve 40 µm ortalama tanecik büyüklüğüne sahip Si tozlarını SEP plastik patlayıcı ve 5 GPa basınç kullanarak sıkıştırmış ve TiC/Ti-Si kompozit parçalar elde etmişlerdir. Yüksek Ti oranlarında TiC ve Ti<sub>3</sub>Si<sub>3</sub> fazları, yüksek Si oranlarında ise bunlara ilaveten Ti<sub>5</sub>Si<sub>4</sub>, TiSi<sub>2</sub> ve SiC fazları gözlemlenmiştir. Si oranı arttıkça yoğunluk ve sertlik değerleri azalmıştır.

Chiba vd [38] takma diş ve kemik yapımında en çok kullanılan seramik tozu  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozu karışımlarını SEP plastik patlayıcı ve 2 GPa basınç-

ta sıkıştırmışlardır. Patlama sonucunda elde edilen numunelerde herhangi bir çatlak veya yırtılma gözlemlenmemiştir.

Kasiraj vd [7] 44-74  $\mu\text{m}$  boyutlarındaki AISI 9310 çelik tozlarını başlangıç basıncı 3,6-17,9 GPa, azami basıncı 6-37 GPa olan şok basıncı ile sıkıştırmışlardır. 4 GPa'dan daha yüksek basınçlarda, elde edilen parçanın mukavemeti, AISI 9310 çeliğin azami çekme mukavemetinden daha yükseğe,  $1,3 \pm 0,1$  GPa'a çıkmıştır.

Chiba vd [39] zirkonyum, Ni ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozlarını, SEP patlayıcı ve 7 GPa basınç kullanarak patlayıcı yardımıyla sıkıştırmışlardır. Elde edilen  $\text{ZrO}_2/\text{Ni}$  ve  $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  malzemelerin tam yoğunlukta olduğu ve parçalarda herhangi bir çatlak veya çarpılma olmadığı belirtilmiştir.

Hokamoto vd [40] SEP ve PBX patlayıcılar kullanarak, yüksek hız çeliği,  $\text{TiB}_2$ , c-BN ve elmas tozlarını sıkıştırmışlardır. Sıcaklığı 1100  $^\circ\text{C}$ 'ye kadar, şok basıncını ise 50 GPa'ya kadar değiştirmişlerdir. Yazarlar, kullanılan sert tozların yumuşama ve yüzey ergimesi mekanizmaları sayesinde sıkıştırılabildiğini göstermişlerdir.

Süper iletken tozlar üzerinde de literatüde çalışmalar yapılmıştır. Mamalis vd [41]  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  süper iletken seramik tozlarını patlayıcı yardımıyla sıkıştırmışlardır. Aynı yazarlar farklı bir çalışmada ise tanecik boyutu 30  $\mu\text{m}$ 'den daha küçük olan  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  süper iletken seramik tozlarını patlayıcı yardımıyla sıkıştırmışlardır. Sıkıştırmadan sonra elde edilen parçalar 950-960  $^\circ\text{C}$ 'de sinterlenmiştir. Optik mikroskopla yapılan incelemeler sonucunda üç farklı tanecik yapısı olduğu belirlenmiştir: kırılğan beyaz tanecikler, çok sert ve kırılğan koyu yeşil tanecikler ve yumuşak siyah tanecikler [42]

Raming vd [43] zirkonyum/rutenyum ( $\text{Zr}/\text{Ru}$ ) tozlarını patlayıcı yardımıyla sıkıştırmış ve %78 yoğunluk değeri elde etmişlerdir. 1150  $^\circ\text{C}$ 'de basınçsız ortamda yapılan sinterleme sonucunda yoğunluk %93'e çıkmış fakat büyük çatlaklar ortadan kaldırılamamıştır.

Kim vd [44] 200 nm boyutlarındaki  $\text{TiO}_2$  tozlarını SEP ve HABW patlayıcılar kullanarak sıkıştırmışlardır. 6 GPa şok basıncının kullanıldığı deneylerde, %96 yoğunlukta çatlaksız parçalar elde edilmiştir.

Fredenburg vd [45] 6061-T6 AL tozlarını sıkıştırarak %98-99 teoik yoğunlukta parçalar elde etmişlerdir. Alba-Baena ise 150  $\mu\text{m}$  çapındaki Al tozlarını, 30  $\mu\text{m}$  boyutunda SiC veya 30 nm boyutunda  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozları ile birlikte amonyum nitrat fuel oil (ANFO) kullanarak patlayıcı yardımıyla sıkıştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre alüminyumun sertliği 24 HV'den 46 HV'ye çıkmıştır [46]. Yine alüminyum tozlar üzerinde çalışan Nieh vd [47], ortalama tanecik büyüklüğü 50–70 nm olan Al nanokristalleri patlayıcı yardımıyla sıkıştırmış ve ortalama tanecik büyüklüğü 80-200 nm olan parçalar elde etmişlerdir. Wang vd [48] ise patlayıcı yardımıyla sıkıştırma yöntemiyle, 5,2



GPa patlama basıncı ve  $1,14 \times 10^9$  K/s soğuma hızı kullanarak  $Al_2O_3$  seramik tozlarını sıkıştırmışlar ve 171 HV0.025 mikrosertlik değerleri elde etmişlerdir.

Yu vd [49] hem indirekt hem de direkt temas yöntemini kullanarak, Al-Li alaşım tozlarını ANFO patlayıcı kullanarak sıkıştırmışlardır. Elde edilen parçaların teorik yoğunlukları %97'nin üzerine çıkmıştır.

Zhang vd [50] 30-50 nm boyutlarında gümüş tozlarını ANFO kullanarak patlayıcı yardımıyla sıkıştırmış ve %99,5-100 teorik yoğunluğa sahip parçalar elde etmişlerdir. Elde edilen parçaların basma akma dayanımı  $320 \pm 10$ MPa, ortalama azami çekme mukavemeti  $390 \pm 10$ MPa ve ortalama gerinim kırılması  $0.22 \pm 0.02$  olarak çıkmıştır.

Khan vd [51] Ti-10Mo alaşım tozlarını yüksek hızda sıkıştırdıkları çalışmada iki farklı yükseklik/çap oranına sahip silindirik toz haznesi (A numunesi için 0,56, B numunesi için 0,8) kullanmışlardır. Yükseklik/çap oranı arttıkça yoğunluk ve mekanik özelliklerin azaldığı belirtilmiştir. Elde edilen parçalar sinterlendikten sonra A numunesi %99,14 yoğunluğa, 387 HV Vickers sertliğe, 2.090,72 MPa bükme mukavemetine ve 749,82 MPa çekme dayanımına çıkmıştır. B numunesi ise %97,73 yoğunluğa, 376 HV Vickers sertliğe, 1.259,94 MPa bükme mukavemetine ve 450,25 MPa çekme dayanımına çıkmıştır.

#### 4. SONUÇ

Patlayıcı yardımıyla sıkıştırma tekniğinin anlatıldığı bu çalışmada, tekniğin özellikleri, avantaj ve dezavantajları, tekniğe etki eden parametreler ve teknikte kullanılan tozlar, literatürde yapılan çalışmalar referans alınarak detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Özellikle konvansiyonel yöntemlerle sıkıştırılması çok zor olan tungsten gibi malzemelerin yoğunluklarının artırılmasında kullanılan bu yöntem sayesinde, herhangi bir çatlağın olmadığı, %98'in üzerinde teorik yoğunluğa sahip parçaların elde edilebildiği görülmüştür. Bu tekniğin sadece seramik veya sert metallerin sıkıştırılmasında değil, aynı zamanda iki katmanlı ve/veya kompozit toz metal parçaların üretiminde de kullanılabileceği literatür çalışması sonucunda ortaya konulmuştur.

#### KAYNAKÇA

1. **Tomoshige, R., Goto, T., Matsushita, T., Imamura, K., Chiba, A., Fujita, M.** 1999. "High-temperature-shock compaction of ceramics:silicide composites produced by combustion synthesis," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 85, p. 100–104.
2. **Mamalis, A.G., Vottea, I.N., Manolakos, D.E.** 2001. "On the modelling of the compaction mechanism of shock compacted powders," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 108, p. 165-178.
3. **Hegazy, A.A.** 2000. "Bonding and properties of explosively compacted copper powder and polypropylene granules," *Current Advances in Mechanical Design and Production*,

Seventh Cairo University International MDP Conference, Cairo, February 15-17, p. 415-421.

4. **Zohoor, M., Mehdipoor, A.** 2009. "Explosive compaction of tungsten powder using a converging underwater shock wave," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, p. 4201-4206.
5. **Zheng, Z., Xiao-jie, L., Gang, T., Chang-xing, D.** 2009. "CuCr bulk alloy produced by mechanical alloying and explosive compaction," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 19, p. 626-629.
6. **Gourdin, W.F.** 1984. "Energy deposition and microstructural modification in dynamically consolidated metal powders," *Journal of Applied Physics*, vol. 55, p. 172.
7. **Kasiraj, P., Vreeland, T., Schwarz, R.B., Ahrens, J.** 1984. "Shock consolidation of a rapidly solidified steel powder," *Acta Metallurgica*, vol. 32, no. 8, p. 1235-1241.
8. **Prümmer, R.** 1988. "Explosive compaction of metallic glass powders," *Materials Science and Engineering*, vol. 98, p. 461-463.
9. **Berg, S., Häggblad, H.A., Jonsén, P.** 2011. "High-pressure compaction modelling of calcite (CaCO<sub>3</sub>) powder compact," *Powder Technology*, vol. 206, p. 259-268.
10. **Häggblad, H.A., Hockauf, M., Eriksson, M., Berggren, C.** 2005. "Simulation of high velocity compaction of powder in a rubber mould with characterization of silicone rubber and titanium powder using a modified split Hopkinson set-up," *Powder Technology*, vol. 154, p. 33-42.
11. **Skoglund P.** 2001. "High density P/M components by high velocity compaction," International conference on power transmission components, Ypsilanti, MI (USA), October 16-17.
12. **Cambronero, L.E.G., Gordo, E., Torralba, J.M., Ruiz-Prieto, J.M.** 1996. "Comparative study of high speed steels obtained through explosive compaction and hot isostatic pressing," *Materials Science and Engineering A*, vol. 207, p. 36-45.
13. **Ando, S., Mine, Y., Takashima, K., Itoh, S., Tonda, H.** 1999. "Explosive compaction of Nd-Fe-B powder," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 85, p. 142-147.
14. **Chiba, A., Nishida, M., Yamaguchi, T., Tosaka, J.** 1988. "Explosive consolidation of titanium powder with a pressure medium," *Scripta Metallurgica*, vol. 22, p. 213-217.
15. **Schwarz, R.B., Kasiraj, P., Vreeland, T., Ahrens, J.** 1984. "A theory for the shock-wave consolidation of powders," *Acta Metallurgica*, vol. 32, no. 8, p. 1243-1252.
16. **Tomoshige, R., Kakoki, Y., Imamura, K., Chiba, A.** 1999. "Effect on addition of titanium diboride to titanium carbide produced by the SHS: shock consolidation method," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 85, p. 105-108.
17. **Wang, S., Sun, C., Guo, W., Yan, Q., Zhou, Z., Zhang, Y., Shen, W., Ge, C.** 2014. "Review on the explosive consolidation methods to fabricate tungsten based PFMs," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 455, p. 174-179.
18. **Li, J. P., Meng, S. H., Han, J. C., Wang, B. L.** 2008. "Energy and deformation during explosive compaction of ZrB<sub>2</sub>-SiC ultrahigh temperature ceramics," *Scholarly Research Exchange*, doi:10.3814/2008/754838.
19. **Sivakumar, K., Balakrishna Bhat, T., Ramakrishnan, P.** 1998. "Effect of process para-



- meters on the densification of 2124 Al–20vol.% SiCp composites fabricated by explosive compaction,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 73, p. 268–275.
20. **Zheng, Z., Xiao-jie, L., Gang, T.** 2009. “Manufacturing nano-alumina particle-reinforced copper alloy by explosive compaction,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 478, p. 237–239.
  21. **Karimi, Y., Mehdipoor, A., Alizadeh, A.** 2016. “Consolidation of bulk TiB<sub>2</sub> by underwater explosive compaction,” *Ceramics International*, vol. 42, p. 11543–11547.
  22. **Kim, Y., Ueda, T., Hokamoto, K., Itoh, S.** 2009. “Electric and microstructural characteristics of bulk ZnO fabricated by underwater shock compaction,” *Ceramics International*, vol. 35, p. 3247–3252.
  23. **Farinha, A.R., Mendes, R., Baranda, J., Calinas, R., Vieira, M.T.** 2009. “Behavior of explosive compacted/consolidated of nanometric copper powders,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 483, p. 235–238.
  24. **Mamalis, A.G., Gioftsidis, G.N.** 1990. “A consolidation mechanism for the compaction of copper powder at high pressures,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 23, p. 333-345.
  25. **Godibadze, B. A., Chagelishvili, E. Sh., Peikrishvili, A. B., Tsiklauri, M. V., Dgebaudze, A.A.** 2015. “Explosive fabrication of Cu-C and Cu-W materials,” *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 15, p. 448-453.
  26. **Zhou, Q., Chen, P.** 2015. “Characterization of fine-grained W–10 wt.% Cu composite fabricated by hot-shock consolidation,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 52, p. 137-142.
  27. **Zhou, Q., Chen, P.** 2016. “Fabrication of W-Cu composite by shock consolidation of Cu-coated W powders,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 657, p. 215-223.
  28. **Cline, C.F., Hopper, R.W.** 1977. “Explosive fabrication of rapidly quenched materials,” *Scripta Metallurgica*, vol. 11, p. 1137- 1138.
  29. **Morris, D. G.** 1980. “Compaction and mechanical properties of metallic glass,” *Materials Science and Technology*, vol. 14, no. 6, p. 215-220.
  30. **Kasiraj, P., Kostka, O., Vreeland, T., Ahrens, J.** 1984. “Shock wave consolidation of an amorphous alloy,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 61-62, p. 967-972.
  31. **Murr, L.E., Shankar, S., Hare, A.W., Staudhammer, K.P.** 1983. “Explosive consolidation of an amorphous iron-base powder,” *Scripta Metallurgica*, vol. 17, p. 1353-1357.
  32. **Shao, B., Liu, Z., Zhang, X.** 1999. “Explosive consolidation of amorphous cobalt-based alloys,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 85, p.121–124.
  33. **Chiba, A., Hokamoto, K., Sugimoto, S., Kozuka, T., Mori, A., Kakimoto, E.** 2007. “Explosive consolidation of Sm–Fe–N and Sm–Fe–N/(Ni, Co) magnetic powders,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 310, p. 881–883.
  34. **Emelchenko, G.A., Naumenko, I.G., Veretennikov, V.A., Gordopolov, Y.A.** 2009. “Shock consolidation of nanopowdered Ni,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 503, p. 55–57.
  35. **Hokamoto, K., Fujita, M., Tanaka, S., Kodama, T., Ujimoto, Y.** 1998. “High-temperature shock consolidation of diamond powders using converging underwater shock wave,” *Scripta Metallurgica*, vol. 39, no.10, p. 1383–1388.

36. **Yücel, O., Tekin, A.** 1997. "The fabrication of boron carbide-aluminium composites by explosive consolidation," *Ceramics International*, vol. 23, p. 149-152.
37. **Szewczak, E., Paszula, J., Leonov, A.V., Matyja, H.** 1997. "Explosive consolidation of mechanically alloyed Ti-Al alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 226-228, p. 115-118.
38. **Chiba, A., Kimura, S., Raghukandan, K., Morizono, Y.** 2003. "Effect of alumina addition on hydroxyapatite biocomposites fabricated by underwater-shock compaction," *Materials Science and Engineering A*, vol. 350, p. 179-183.
39. **Chiba, A., Nishida, M., Imamiira, K., Ogura, H., Morizono, Y.** 1996. "Fabrication of  $ZrO_2/Ni$  and  $ZrO_2/Al_2O_3$  functionally graded materials by explosive powder consolidation technique," *Functionally Graded Materials*, p. 191-195.
40. **Hokamoto, K., Tanaka, S., Fujita, M.** 2000. "Optimization of the experimental conditions for high-temperature shock consolidation," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, p. 631-640.
41. **Mamalis, A.G., Gioftsidis, G.N.** 1992. "On the extrusion of silver-sheathed superconducting billets fabricated by explosive compaction of  $YBa_2Cu_3O_7$  powder," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 30, p. 297-313.
42. **Mamalis, A.G., Gioftsidis, G.N., Szalay, A., Boday, O.** 1989. "The shock wave compaction of high temperature superconducting powders into cylindrical components," *Annals of the CIRP*, vol. 38, no. 1, p. 297-301.
43. **Raming, T.P., Zyl, W.E., Carton, E.P., Verweij, H.** 2004. "Sintering, sinterforging and explosive compaction to densify the dual phase nanocomposite system  $Y_2O_3$ -doped  $ZrO_2$  and  $RuO_2$ ," *Ceramics International*, vol. 30, p. 629-634.
44. **Kim, Y., Mitsugi, F., Tomoaki, I., Hokamoto, K., Itoh, S.** 2011. "Shock-consolidated  $TiO_2$  bulk with pure anatase phases fabricated by explosive compaction using underwater shockwave," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 31, p. 1033-1039.
45. **Fredenburg, D.A., Thadhani, N.N., Vogler, T.J.** 2010. "Shock consolidation of nanocrystalline 6061-T6 aluminum powders," *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, p. 3349-3357.
46. **Alba-Baena, N.G., Salas, W., Murr, L.E.** 2008. "Characterization of micro and nano two-phase regimes created by explosive shock-wave consolidation of powder mixtures," *Materials Characterization*, vol. 59, p. 1152-1160.
47. **Nieh, T.G., Luo, P., Nellis, W., Lesuer, D., Benson, D.** 1996. "Dynamic compaction of aluminum nanocrystals," *Acta Materialia*, vol. 44, p. 3781-3788.
48. **Wang, B., Xie, F., Li, Z., Zhang, H.** 2016. "Explosive compaction of  $Al_2O_3$  nano powders," *Ceramics International*, vol. 42, p. 8460-8466.
49. **Yu, L.H., Meyers, M.A., Peng, T.C.** 1991. "Shock consolidation of Al-Li alloy powders," *Materials Science and Engineering A*, vol. 132, p. 257-265.
50. **Zhang, L., Elwazri, A.M., Zimmerly, T., Brochu, M.** 2008. "Fabrication of bulk nanostructured silver material from nanopowders using shockwave consolidation technique," *Materials Science and Engineering A*, vol. 487, p. 219-227.
51. **Khan, D. F., Yin, H., Li, H., Asadullah, Z. A., Qu, X., Ellahi, M.** 2014. "Effect of impact force on Ti-10Mo alloy powder compaction by high velocity compaction technique," *Materials and Design*, vol. 54, p. 149-153.