



## ÖN ALAŞIMLANDIRILMIŞ Ti6Al4V TOZU İLE Ti(CP) TOZUNUN SIKIŞTIRILABİLME ŞARTLARININ ARAŞTIRILMASI

Muqdad Naser M. AL-DULAIMI <sup>1</sup>, Remzi VAROL <sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği AB Dalı, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Ti6Al4V</i> <i>Toz Metalurjisi</i> <i>Sıkıştırılabilirlik</i> <i>Ön Alaşımlandırılmış toz</i>	TM ile üretilen titanyum ürünleri birçok endüstriyel alanda, tıp alanında ve diğer sektörlerde kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı farklı sıkıştırma basınçlarında titanyum tozuna ilave edilen yağlayıcı (Zn-Stearat) miktarlarının ham yoğunluğa, ham dayanıma, kalıptan ürünün çıkartılması için gerekli olan çıkartma kuvvetine, sinterlenmiş yoğunluğa ve diğer mekanik özelliklere etkisinin araştırılmasının yanı sıra kırık yüzeylerin incelenmesidir. Bu deneysel çalışmada, titanyum tozuna eklenen ve karıştırılan yağlayıcı miktarları (0.5%, 0.75%, 1% ve 1.1%) olarak belirlenmiş ve bu oranlarla karıştırılan titanyum tozları farklı basınçlarda (Ti6Al4V için 650- 900 MPa) ve [Ti(CP)] için 400-650 MPa) sıkıştırılmıştır. Her iki çeşit Titanyum tozundan kompaktlar 1250C° sıcaklıkta argon gazlı atmosferik fırında sinterlenmiştir. Sinterlenmiş numunelere üç nokta eğme deneyi, darbe deneyi, sertlik deneyi ve SEM-EDS analizleri yapılmıştır.

## INVESTIGATION ON THE COMPACTABLE CONDITIONS OF TI POWDERS PRE-ALLOYED Ti6Al4V AND Ti(CP)

Keywords	Abstract
<i>Ti6Al4V</i> , <i>Ti (CP)</i> , <i>Powder Metallurgy</i> , <i>Compactability</i> , <i>Pre-alloyed powder</i> ,	The titanium products produced by powder metallurgy method, a decent position among the other materials and production methods. The aim of this study is to investigate the effect of lubrication (Zn-Stearat) which added to the titanium powder at different compaction pressure, to the green density, green strength, ejecting force to eject the products from the die, sintered density and others mechanical properties as well as the metallography for fracture surfaces of specimens. Then, all results of between two type of titanium (Ti6Al4V and Ti (CP)) powders are compared. In this experimental study, cold pressing with single acting press are applied. The amounts of lubrications (Zn-Stearat) are added and mixed with titanium powder is (0.5%, 0.75%, 1% and 1.1%) and each ratio are compacted in steel die at different compaction pressure (650- 900 MPa for Ti6Al4V) and (400-650 MPa for Ti (CP)). Two types of titanium powder compacts are sintered in 1250C° in argon gas atmospheric furnace. Three point bending test, impact test, hardness test and SEM -EDS analysis were applied to all specimens.

### Alıntı / Cite

Al-Dulaimi, M.N.M., Varol, R., (2018). Ön Alaşımlandırılmış Ti6Al4V Tozu İle Ti(CP) Tozunun Sıkıştırılabilirlik Şartlarının Araştırılması, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(1), 175-181.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Muqdad Naser M. AL-DULAIMI, 0000-0003-2777-9328

Remzi VAROL, 0000-0003-2427-0710

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	13.12.2017
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	27.02.2018
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	12.03.2018
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	30.03.2018

\* İlgili yazar / Corresponding author: [remzivarol@sdu.edu.tr](mailto:remzivarol@sdu.edu.tr), +90-246-211-1256

## 1. Giriş

Tıp alanında, implant malzemeleri gibi cerrahi işlemlerde, uçak ve otomotiv sanayii, kimya tesisleri, enerji istasyonları ve diğer birçok endüstride iyi bir performans sağlayan titanyum alaşımları kullanılmaktadır. Bu alaşımların önemi yüksek dayanım/ağırlık oranı, yüksek korozyon direnci, biyouyumluluk, yüksek oksidasyon direnci, yorulma, sürünme ve yüksek sıcaklık performansı gibi özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Titanyum alaşımlarının yüksek maliyeti bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Saf titanyum (ticari titanyum) dört derecede sınıflandırılabilir. İçerdiği oksijen elementi oranına göre derece 1'den başlayarak derece 4'e kadar sınıflandırılmaktadır. Oksijen elementi titanyumun dayanımını arttırmak için saf titanyum içinde arayer elementi olarak göz önüne alınır (Williams, 2007). Yaygın olarak endüstride, tıp alanında ve diğer pek çok alanda en çok kullanılan Ti6Al4V alaşımı,  $\alpha+\beta$  alaşımlarından biridir. Titanyum parçaların üretim yöntemlerinden biri toz metalürjisidir. Diğer üretim yöntemlerine göre malzeme kaybının çok az olması gibi avantajlara sahiptir. Bunun yanında, nihai ürünün yüzeyi düzgün ve net şekle yakın olduğu için ek işlemlere gerek duyulmaz. (Peter, 2003).

Toz metalürjisinde temel işlem aşamaları elementel tozlar ve yağlayıcıların ilavesi, karıştırılması veya harmanlanması, sıkıştırma ve sinterlemedir. Toz içerisine ilave edilen yağlayıcı miktarı karıştırma ve sıkıştırma işlemi sırasında partiküller arasındaki sürtünmeyi azaltmakta ve akıcılığı iyileştirmektedir. Buna ek olarak sıkıştırılmış ürünün kalıptan çıkarma kuvvetinin azaltılması ve sıkıştırma kalıbının ve aparatlarının ömrünün uzatılması için yağlayıcı ilavesi oldukça önemlidir. Ancak aynı zamanda partiküller arasında oluşan mekanik kenetlenmeyi azalttığı ve böylece ham dayanımı düşürdüğü için ilave edilen yağlayıcı miktarı ve çeşidi kontrol edilmelidir. İlave edilen diğer katkılar alaşım elementleri, sinterleme işleminde ki aktivatör elementler veya gözenekli malzemelerin üretimi için doldurma elementleridir (German, 1994). Karıştırma işlemi karıştırıcının hızı, karıştırma süresi ve karıştırıcı/toz hacim oranı olmak üzere üç değişkene bağlıdır. Bu değişkenler parçacıkların pekleşmesine neden olan toz partiküllerin aşırı plastik şekil almasının veya toz partiküllerinin kırılmasının önlenmesi için kontrol edilmelidir.

Sıkıştırma işleminde, toz karışımı istenilen sıkıştırma sonrası şeklinin elde edilmesi için kalıp içerisinde preslenir. Bu aşamada basıncın etkisi ile toz yoğunlaşmakta ve sıkıştırılmış tozda partiküller arası gözenekler azalmaktadır. Sıkıştırma kalıbından parçanın çıkartılması ve numunelerin deneylere tabii tutulabilmesi ve sinterleme işlemine taşınması sırasında kırılmasını önlemek, ayrıca nihai ürünün son özelliklerinin iyileşmesi için uygun miktardaki ham yoğunluğun ve ham dayanımın elde edilmesi

gerekmektedir. Sıkıştırma kuvvetinin artması ile yüksek ham dayanım ve yoğunluk değeri sağlanabilir. Bu işlemde parçacıklar mekanik kenetlenme ile birbirlerine bağlanmaktadır. Sıkıştırma işlemi toz şekli, boyutu, dağılımı ve tozun sertliği gibi mekanik özelliklere bağlıdır (Upadhyaya, 2002). Son aşama sinterleme işlemidir. Bu aşamada partiküller arasında bağ kurulmakta ve istenilen ürünün son özellikleri elde edilmektedir. Bu işlem malzemenin ergime sıcaklığının %0.6 ile %0.75'i arasındaki sıcaklıkta özel fırınlarda, numunelerin belirli bir süre tutulması ile gerçekleştirilmektedir. Partiküller arasındaki bağ, temas eden partikül yüzeyleri arasındaki difüzyon ile gerçekleşmekte ve gözenekler giderilmektedir. (Höganäs, 2013).

Bu çalışmada saf titanyum Ti (CP) grade (2) ve titanyum alaşımı Ti6Al4V grade (5) olmak üzere iki farklı toz kullanılmıştır. Farklı oranlarda katı yağlayıcı (Zn-stereat) ilavesi ve farklı kalıpta soğuk sıkıştırma basınçları uygulanarak numuneler üretilmiştir. İlave edilen yağlayıcı miktarları %0.5, %0.75, %1 ve %1.1 oranlarındadır ve bu amaç için hazırlanan çift konik karıştırıcı içerisinde her tip titanyum ile karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi MPIF standartlarına uygun yapılmıştır. Karıştırma işi 20 dakika süreyle 22d/d karıştırıcı hızında gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırılmış kompaktlar 1250°C sıcaklıkta sinterlenmişlerdir ve daha sonra sinterlenmiş parçalara sinterlenmiş dayanımının belirlenmesi için üç nokta eğme deneyi uygulanmıştır.

Diğer bazı sinterlenmiş numunelere Charpy deneyi uygulanmıştır. Tüm sinterlenmiş parçaların sertlik değerleri Rockwell Sertlik Cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Bunlara ek olarak çalışmanın farklı aşamalarında SEM analizleri yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı iki farklı titanyumtozu için metal tozlarına ilave edilen yağlayıcı miktarlarının etkisini ve ham/sinterlenmiş dayanım ile ham/sinterlenmiş yoğunluk değerlerine farklı sıkıştırma basınçlarının etkisini ve yağlayıcının sıkıştırma kalıbı içerisinden sıkıştırılmış ürünün çıkartma kuvvetine etkisini belirlemektir.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Gronostajski vd. (2009) Ti6Al4V titanyum alaşım tozuna uygulanan 3 farklı işlemi incelenmiştir. Bunlar; farklı basınçlar altında 25 mm çapında numunelerin sıkıştırılması ve vakum fırınlarında sinterlenmesi, plastik sıkıştırma kalıbında aksel ve simetrik olacak şekilde TM parçalarının üretilmesi, argon atmosferiyle korunan ortamda sıcak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmesidir. Lou vd. (2012) titanyum tozunun sıkışma davranışının üzerinde yağlayıcının rolü ve daha sonraki sinterleme işleminde gerçekleşen mikroyapıdaki yoğunluk artışı ve değişimini incelemişlerdir. Çalışmada %0-2 stearik asit veya magnezyum stearat yağlayıcıları ile karıştırılan HDH titanyum tozu soğuk sıkıştırılmıştır. Yağlayıcı

miktarının %0.3-0.6 oranında olmasının önemli ölçüde sıkıştırılabilirliği geliştirdiği bulunmuştur. Ancak yağlayıcı miktarının %0.6'dan daha fazla olması düşük basınçlarda sıkıştırılabilirliğe yardımcı olmakta fakat yüksek yoğunluklarda maksimum yoğunluğa erişimi kısıtlamaktadır. Buna ek olarak %0.3-0.6 oranında yağlayıcı ilave edilmesi TM ürünüde daha uniform yoğunluk dağılımı sağlamaktadır. Yan vd. (2013) sinterlenmiş Ti-6Al-4V alaşımının gözenek morfolojisine bağlı olarak yorulma davranışları ve sinterlenmiş yoğunluk değerleri incelenmiştir. Sinterlenmiş yoğunluk ve gözenek morfolojisinin anlaşılması için mikroyapının analizi yorulma ve mekanik dayanım özellikleriyle ilişkili olarak yürütülmüştür. Düşük çevrim sayılı yorulma ve yüksek çevrim sayılı yorulma deneyleri farklı sinterlemiş yoğunluğa (%95 ve %99) sahip iki farklı alaşım kullanılarak yapılmıştır. Çekme dayanımında belirgin farklılıklar bulunmamış ancak sinterlenmiş yoğunluk %95'ten %99'a arttırıldığında yorulma sınırının %20 oranında arttığı belirlenmiştir. Singh vd. (2013) toz metalürjisi kullanılarak işlem görmüş titanyumun ve alaşımlarının mekanik özelliklerini çalışmıştır. Çalışmanın sonucunda TM ile üretilen parçaların sertlik ve süneklik değerlerinin bunlara eş tam yoğun malzemelerden imal edilenlere göre daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın diğer bir amacı her iki yöntemle imal edilen titanyum alaşımlarının kırılma tokluğunu incelemektir. Kırılma tokluğunu mikroyapı özellikler, ısıl işlem ve arayer kalıntıları gibi kritik faktörlerin etkilediği belirlenmiştir. Frykholm vd. (2016) sinterlenmiş nihai ürünün özelliklerine işlem parametrelerinin ve toz özelliklerinin etkisini tartışmıştır. Ti ürünlerinin üretimi için presleme ve sinterleme pratik olarak yapılarak, bu malzemelerin yüksek sıcaklıklarda kullanım güvenliği üzerinde durulmuştur. Bu işlemlerdeki zorluklar ve tozların yüksek maliyeti toz kullanımının yaygınlaşmasında sınırlandırmalar oluşturmaktadır. Ancak son zamanlarda ki gelişmeler TiH<sub>2</sub> tozunun sinterleme ve presleme alanlarında kullanımındaki maliyet etkilerinin iyileştigiğine işaret etmektedir.

### 3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, iki çeşit metal tozu kullanılmıştır. Bu tozlardan birincisi ticari titanyum Ti(CP) sınıf (2) ve diğeri ön alaşımlandırılmış titanyum alaşımı Ti6Al4V sınıf (5) tozu'dur. Tozların her ikisi de piyasadan ticari olarak temin edilmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Bu tozların özellikleri deneysel olarak belirlenmiş ve belirlenen bu özellikler ile ilave edilen yağlayıcı miktarları sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2' de verilmektedir (Al-Dulaimi, 2017).

Tablo 1. Ti6Al4V Tozunun Özellikleri

Alaşım Elemanları	Ti6Al4V	Katı yağlayıcı (Zn-Stearat)
Ağırlık (%)	100	0.5, 0.75, 1 ve 1.1
Ergime Noktası (C°)	1668	120-240
Toz partikül boyutu (µm)	45	
Toz partikül şekli	Düzensiz	
Toz Üretim çeşidi	HDH + öğütme	

(HDH: Hydride Dehydride)

Tablo 2. Titanyum (CP) tozunun Özellikleri

Kimyasal kompozisyon	Ti	Katı yağlayıcı (Zn-Stearat)
Ağırlık (%)	100	0.5, 0.75, 1 ve 1.1
Ergime Noktası (C°)	1668	120-240
Toz partikül boyutu (µm)	45	-
Toz Partikül Şekli	Düzensiz	-
Toz Üretim Çeşidi	HDH + öğütme	-

Tablo 1 ve Tablo 2'de verildiği gibi metal toza dört farklı oranda ( % 0,5, 0.75, 1 ve 1.1) yağlayıcı ilave edilmiştir. Toz tane boyutu, tane şekli ve toz üretim yöntemleri toz özellikleri olarak verilmiştir.

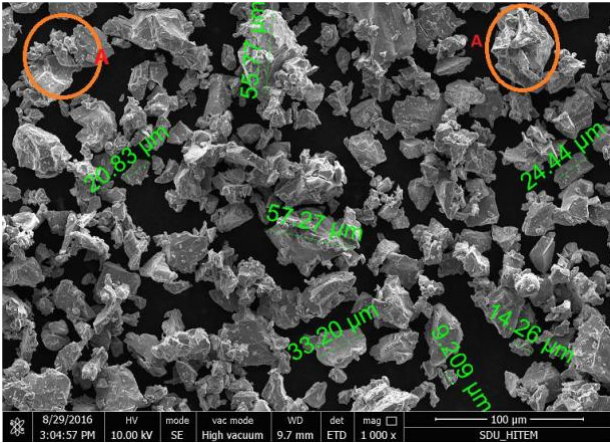
Bu deneysel çalışmanın uygulanma sırası ve yöntemi, aşağıda verilen aşamalardan oluşmaktadır;

- Toz partiküllerinin karakterizasyon çalışmaları, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılmış ve toz partikül şekli ve morfolojisi belirlenmiştir. Bu aşamada ayrıca tozun içerdiği elementlerin belirlenmesi için EDS analizi gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler QUANTA FEG 250 model SEM cihazı ile yapılmıştır.
- Deneylerde kullanılacak tozların akıcılık ve görünür yoğunluk ölçümleri MPIF Standard 04 (2006)'e uygun olarak Hall Hunisi kullanılarak yapılmıştır.
- Metal tozları ile katı yağlayıcı (Zn-Stearat), MPFI standartlarına göre 20 dakika süreyle 22d/d karıştırma hızında çift taraflı konik karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır.
- Toz karışımlarının soğuk sıkıştırma işlemi tek parça kalıp içinde tek etkili pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
- Kalıpta soğuk sıkıştırılan kompaktların ham yoğunluk, ham dayanım ve kalıptan çıkarma kuvvetleri belirlenmiştir.
- Ham numunelerin sinterleme işlemi, Argon koruyucu gaz atmosferinde yapılmıştır. Fırın sıcaklığı 7°C/dakika ısıtma hızı ile oda sıcaklığından 400 °C sıcaklığa kadar arttırılmıştır. Numuneler bu sıcaklıkta 20 dakika süreyle fırında bekletilmişlerdir. Bu bekleme esnasında yağlayıcının giderilmesi amaçlanmıştır. Ardından sıcaklık aynı ısıtma hızında 1250°C'a kadar çıkarılmış ve numuneler bu sıcaklıkta 90 dakika fırın içerisinde sinterlenmişlerdir

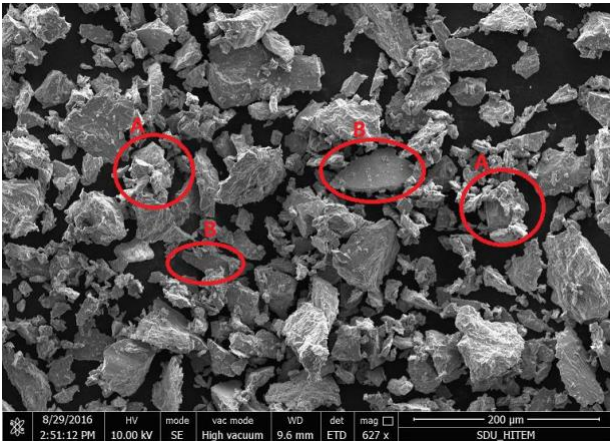
- Sinterlenmiş numunelerin yoğunluk değerleri belirlenmiş ve seçilen numunelere üç nokta eğme ve Charpy darbe deneyleri uygulanmıştır. Üç nokta eğme deneyleri TS EN ISO 7438 (2016) standartlarına uygun olarak bilgisayar kontrollü universal çekme cihazı kullanılarak ve darbe deneyleri ise Charpy deney cihazı ile yapılmıştır.
- Ham ve sinterlenmiş numunelerin kırık yüzeylerinin incelemeleri QUANTA FEG 250 model SEM cihazı ile yapılmıştır.

#### 4. Araştırma Bulguları

Bu çalışmada kullanılan Ti(CP) ve Ti6Al4V metal tozunun, SEM görüntüleri incelendiğinde iki toz grubunda düzensiz ve homojen olmayan şekilli toz tanelerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 1 ve Şekil 2). Ayrıca tane boyutları arasında oldukça farklılık bulunmaktadır. Toz şeklinin homojen olmaması toz üretiminde kullanılan öğütme (HDH+öğütme) metodundan kaynaklanmaktadır. Öğütme ile üretilen tozlar düzensiz şekil ve boyuta sahiptirler (Al-Dulaimi, 2017).



Şekil 1. Ti (CP) metal tozunun SEM mikrofrafisi



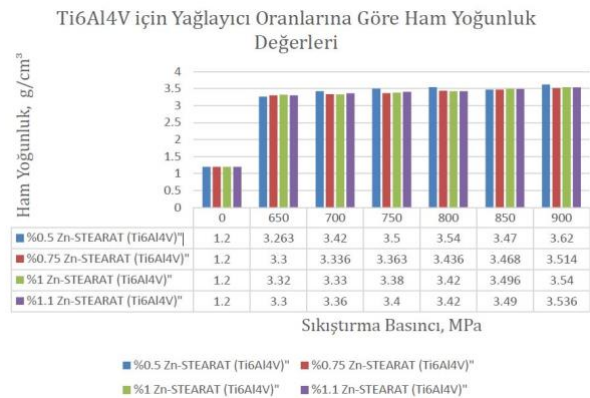
Şekil 2. Ti6Al4V metal tozunun SEM mikrofrafisi

Toz partiküllerinin şekillerinde görülen düzensizliği etkileyen diğer bir neden ise yığılmadır. Yığılma, öğütme işlemi sırasında Van Der Walls kuvveti veya mekanik kenetlenme ile partiküllerin birleşmesidir. Bu durum Şekil 1 ve Şekil 2'de A bölgesi olarak belirtilen daire içinde görülmektedir. Ayrıca öğütme işlemi sırasında partiküllerin birbirleriyle çarpışmaları nedeniyle mikro dövme gerçekleşerek partikül yüzeyleri yassılaştırmaktadır. Bu durum Şekil 2'de B bölgesi olarak belirtilen daire içinde görülmektedir.

Deneylerde kullanılan tozların sıkıştırılabilirliğinin ve erişilebilecek en yüksek ham yoğunluk değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla her bir toz cinsi ve yağlayıcı ilave miktarına bağlı olarak altı farklı pres basıncı için elde edilen ham yoğunluk değerleri belirlenmiş ve bu değerler Tablo 3. 'te verilmiştir. Tablo 3'teki değerler incelendiğinde; 650MPa sıkıştırma basıncında, yağlayıcı miktarı arttıkça ham yoğunluk artmaktadır. 700 MPa sıkıştırma basıncında, yağlayıcı miktarı arttıkça ham yoğunluk azalmaktadır, bu geçiş basıncı noktasının yaklaşık olarak 650-700 MPa arasında olduğu anlamına gelir. Bu noktadan sonra yağlayıcı miktarının artması ile ham yoğunluk azalacaktır. Diğer bazı etkenlerden dolayı bu sapmaların meydana gelmesi beklenir. Bu etkenlerden birisi yağlayıcı yoğunluğunun göreceli olarak titanyum tozuna göre çok düşük olması ( $\rho_{Ti}=4.5 \text{ g/cm}^3$  ve  $\rho_{Zn-ste}=1.05 \text{ g/cm}^3$ ) olarak verilebilir.

Ayrıca bazı toz partikülleri kalıp duvarına yapışır ve bunun sonucunda kalıp duvarı ile toz arasında daha fazla sürtünme kuvveti meydana gelir. Bu sürtünme kuvveti, sıkıştırma işlemi sırasında basınç akışına engel oluşturduğundan dolayı sıkıştırılmış ürünün ham yoğunluğunu azaltmaktadır.

Tablo 3. Ti6Al4V alaşımına ilave edilen farklı yağlayıcı miktarlarına göre ham yoğunluk değerlerindeki değişim.



Sıkıştırma esnasında partiküllerin mekanik kilitlemesine ilave olarak sinterleme sonrası dayanım, partiküller arasında oluşan birleşme yüzeylerinde atomların ve boşlukların difüzyonunun ortaya çıkması ile daha sıkı bağlanması söz konusu olacaktır. Böylece gözeneklerin miktarının azalması, şeklinin küresel hale dönüşmesi ve/veya ortadan kalkması ile kompaktlarda boyut değişimi görülecektir. Tablo 4'te Titanyum alaşımlarının sıkıştırma basınçları ve sinterlenmiş parçaların farklı özellik değerleri verilmiştir. Toz boyutunun küçük olması (45µm) nedeniyle zımba ve kalıp arasındaki boşluğa toz partikülleri sıkışarak adeta kalıp duvarına soğuk kaynak edilmişçesine yapışmıştır. Bu nedenle ara ara mekanik ve kimyasal olarak kalıp duvarı temizliği yapılmıştır. Bu tür yapışmalar hem sıkılaşmada basınç değerlerine bağlı olarak ham yoğunluk değerlerinde sapmalara hem de kalıptan çıkarma kuvvetlerinde artışlara neden olmuştur.

Tablo 4. Titanyum alaşımlarının sinterlenmiş dayanım değerleri

Alaşım Çeşidi ve İzafi Yoğunluk Değerleri	Sıkıştırma Basıncı MPa	Sinterlenmiş Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Maksimum Kuvvet N	Numune Yüksekliği mm	Sinterlenmiş Dayanım N/mm <sup>2</sup>
1.1% Zn-Stearat Ti(CP), 89%	500	4.29	6750	10.52	420.84
1% Zn-Stearat Ti(CP), 91.3%	550	4.405	5250	10.44	332.35
0.75% Zn-Stearat Ti(CP), 90%	550	4.38	6000	10.31	389.47
0.5% Zn-Stearat Ti(CP), 88%	550	4.35	6500	10.72	390.27
0.5% Zn-Stearat Ti6Al4V, 91%	900	4.42	6250	10.44	395.66
0.75% Zn-Stearat Ti6Al4V, 89%	900	4.25	8250	10.47	519.28
1% Zn-Stearat Ti6Al4V, 90%	900	4.27	9250	10.33	598.12
1.1% Zn-Stearat Ti6Al4V, 90%	900	4.25	5250	10.67	318.18

Yapılan sinterleme işlemi sonucunda numunelerin boyutunda ve şeklinde değişimler meydana gelmiştir. Hatta bazı numuneler deforme olmuştur. Bu değişimlerin sebebinin, toz taneleri boyutlarının ve toz dağılımının geniş bir aralıkta olması nedeniyle numunelerde meydana gelen yüksek kendine çekme değerlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 3'de farklı şartlarda sinterlenmiş numunelerin genel görünüşleri verilmektedir. Ayrıca, sinterleme atmosferinin saflık değerinin yetersiz kalması, yüksek



Şekil 3. Sinterlenmiş numunelerin şekil ve boyutlarındaki değişimler.

sıcaklıktaki sinterleme fırın atmosferinde O<sub>2</sub> içermesi nedeniyle numunelerde oksitlenme sonucu boyut ve şekil değişimi ortaya çıkmıştır (Al-Dulaimi, 2017). Sinterlenmiş numunelerin Rockwell A skalası kullanılarak ölçülmüş sertlik değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Verilen değerler incelendiğinde her iki titanyum tozu için de izafi yoğunluğun artması ile sertliğin arttığı açıkça görülmektedir. Bunun nedeni sinterleme işleminde partiküller birbirlerine kuvvetli bir şekilde bağlanarak mikroyapıyı oluşturan taneler ortaya çıkmaktadır. Böylece sinterlenmiş numunelerde izafi yoğunluk arttıkça değerindeki artışa paralel olarak sertlik değerleri de artmaktadır.

Tablo 5. Ti6Al4V ve Ti (CP) için sinterlenmiş yoğunluk ve sertlik değerleri

Alaşım Çeşitleri	Sıkıştırma Basıncı Mpa	Sinterlenmiş Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Sertlik HRA
Ti6Al4V-%0.5 Zn	900	4.4	76
Ti6Al4V-%0.5 Zn	800	4.17	73
Ti6Al4V-%0.75 Zn	900	4.25	72
Ti6Al4V-%0.75 Zn	850	4.158	71
Ti6Al4V-%1 Zn	900	4.27	72
Ti6Al4V-%1 Zn	800	3.96	71
Ti6Al4V-%1.1 Zn	900	4.24	74
Ti6Al4V-%1.1 Zn	850	4.185	74
Ti(CP) %0.5 Zn	650	4.45	65
Ti(CP) %0.5 Zn	550	4.35	62
Ti(CP) %0.75 Zn	550	4.381	65
Ti(CP) %0.75 Zn	450	4.208	63
Ti(CP) %1 Zn	550	4.405	66
Ti(CP) %1 Zn	450	4.02	64
Ti(CP) %1.1 Zn	600	4.29	68
Ti(CP) %1.1 Zn	500	4.22	65

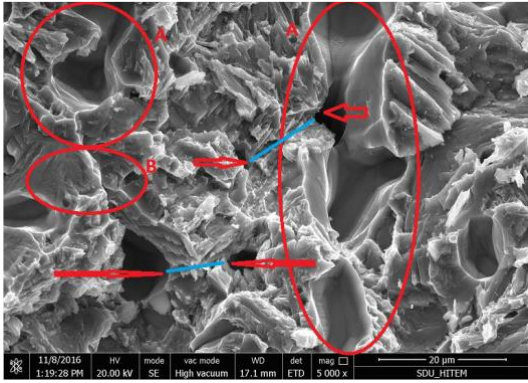
Darbe deneyi sırasında, her iki titanyum tozu kullanılması durumunda da numuneler gevrek davranış göstermiştir. Darbe deneyleri çentiksiz numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş numunelerde bulunan gözeneklerin iç çentik olarak görev yapması dış çentik açılmasına gerek kalmadığı sonucuna varılarak çentiksiz numune kullanılmasını gerektirmiştir. Darbe deneyi sonucunda numunelerden elde edilen kırılma enerjisi değerleri Tablo 6'de toplu halde verilmiştir.

Tablo 6. Darbe test değerleri (Ti6Al4V ve Ti (CP))

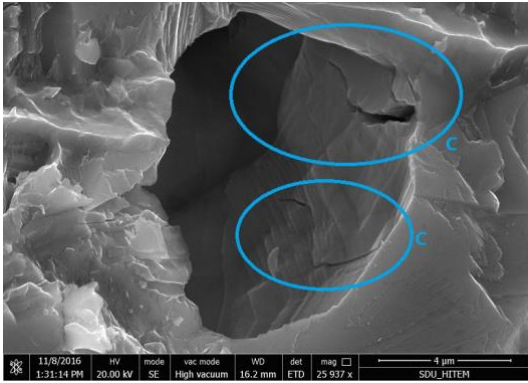
Alaşım Çeşitleri	Sıkıştırma Basıncı MPa	Darbe Enerjisi joule
Ti(CP) %0.5 Zn-Stearat	650	4
Ti(CP) %0.75 Zn-Stearat	450	4
Ti(CP) %1 Zn-Stearat	450	5
Ti(CP) %1.1 Zn-Stearat	600	3
Ti6Al4V-%0.5 Zn-Stearat	800	3
Ti6Al4V-%0.75 Zn-Stearat	850	4
Ti6Al4V-%1 Zn-Stearat	800	3
Ti6Al4V-%1.1 Zn-Stearat	900	6

Sinterleme sonrası numunelerin ham dayanımlarını belirlemek için yapılan üç nokta eğme deneyi sonucunda kırılan sinterlenmiş numunelerin kırık yüzeylerinin incelenmesi için SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4'de sinterlenmiş Ti (CP) numunelerin 3 nokta eğme deneyi sonrası kırık yüzeylerinin SEM

görüntüleri verilmektedir. Şekil 5’de ise Ti (CP) numunelerin darbe deneyi sonrası kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmektedir. Şekil 4’de işaretlenen A bölgesinde tane sınırlarının ayrılması nedeniyle oluşan taneler arası kırılma tipi ve B bölgesinde gevrek kırılma çeşidi görülmektedir. Ayrıca Şekil 5’de işaretlenen C bölgesinde partiküllerde oluşan çatlaklar görülmektedir. Bu nedenle kırılma tipinin gevrek olduğunu göstermektedir. Ayrıca verilen kırık yüzeyi görüntülerinde partiküller arasındaki boyunlar ve çapları mavi çizgi ile gösterilmiştir. Resimler incelendiğinde kırık yüzeyinde genel olarak gevrek kırılma görüntüsü mevcut iken burada gösterilen partiküllerdeki çatlakların varlığı gevrek kırılmanın yaygın olduğunu destekler niteliktedir



Şekil 4. Üç nokta eğme deneyi sonucu oluşan kırık yüzeylerin SEM görüntüleri (Ti (CP))



Şekil 5. Darbe deneyi ile oluşan kırıkların SEM görüntüsü (Ti (CP))

Şekil 6.’da Ti(CP) için, Şekil 7.’de Ti6Al4V için yapılan EDS analizleri görülmektedir. Yapılan EDS analizi sonucunda numunelerde C ve Si kalıntıları görülmektedir. Bu kalıntıların sinterleme atmosferinden kaynaklandığı ve/veya TM imalat aşamalarından olan karıştırma ve kalıpta sıkıştırma esnasında oluştuğu düşünülmektedir (Al-Dulaimi,2017).



Şekil 6. Ti (CP) numunesinin EDS analiz sonucu



Şekil 7. Ti6Al4V tozundan elde edilen numunenin EDS sonucu

## 5. Sonuç ve Tartışma

İki farklı titanyum tozu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Bu çalışmada, kullanılan tozun boyutunun ortalama 45 µm, düzensiz şekle sahip olduğu ve toz boyut dağılımının geniş bir aralıkta olduğu belirlenmiştir.
- Kalıpta soğuk sıkıştırma basıncının artması ile ham yoğunluk artmaktadır.
- Yağlayıcı miktarı arttıkça kalıptan numuneyi çıkartma kuvveti azalmaktadır.
- Sinterlenmiş yoğunluk ve dayanım doğrudan ham yoğunluk ile ilişkilidir; ham yoğunluk arttıkça, sinterlenmiş yoğunluk ve dayanım artmaktadır.
- Yapılan SEM analizleri iki titanyum için kırık yüzeylerinde yapraksı kırılma (klavaj) ve taneler arası kırılma çeşitleri görülmüştür. Kırık yüzeylerinde yer yer kirlilikler belirlenmiştir.
- Sinterleme ortamının kirli olması, oksijenin vakumlanamamış olması, numunelerde yer yer oksitlenmelere neden olmuştur. Ayrıca çalışma ortamı, kalıp-zimba kirliliği numunelerde kirlenmeye neden olmuştur.

## Teşekkür

4682-YL1-16 No'lu proje ile çalışmayı maddi olarak destekleyen SDÜ Araştırma Projeleri Yönetim Birimi'ne teşekkür ederiz.

## Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar

Al-Dulaimi, M.N.M., (2017). Ön Alaşımlandırılmış Ti6Al4v Tozu İle Ti(Cp) Tozunun Sıkıştırılabilme Şartlarının Araştırılması, SDÜ FBE, Y. Lisans Tezi.

Bosman, H. L., Ve Blaine, D. C. (2014). Influence Of Powder Particle Size Distribution On The Properties Of Press-And-Sintered Titanium And Ti-6al-4v Preforms. *Advanced Materials Research*, (1019).

Delavari, M., Salarvand, A., Rahi, A., Ve Shahri, F. (2011). The Effect Of Powder Metallurgy Process Parameters On Mechanical Properties Of Micro And Nano-İron Powder. *International Journal Of Engineering, Science And Technology*, 3(9), 86-94.

Fang, Z. Z., Ve Sun, P. (2012). Pathways To Optimize Performance/Cost Ratio Of Powder Metallurgy Titanium-A Perspective. In *Key Engineering Materials* (Vol. 520, Pp. 15-23). Trans Tech Publications.

Gronostajski, Z., Bandoła, P., Ve Skubiszewski, T. (2009). Influence Of Cold And Hot Pressing On Densification Behaviour Of Titanium Alloy Powder Ti6al4v. *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, 9(2), 47-57.

Handbook, A. S. M. (1998). Volume 7. *Powder Metal Technologies and Applications*, 435.

Hryha, E., Dudrova, E., Ve Bengtsson, S. (2008). Influence of Powder Properties On Compressibility of Prealloyed Atomised Powders, *Powder Metallurgy*, 51(4), 340-342.

Kateřina Skotnicová, Miroslav Kurša Ve Ivo Šzurman. (2014). *Powder Metallurgy*. University Text Book, Faculty of Metallurgy and Materials Engineering, Vsb- Technical University of Ostrava.

Liu, X., Chu, P. K., Ve Ding, C. (2004). *Surface Modification of Titanium, Titanium Alloys, And Related Materials For Biomedical Applications*.

*Materials Science And Engineering: R: Reports*, 47(3), 49-121.

Upadhyaya, G. S. (2002). *Powder Metallurgy Technology*, Cambridge Int Science Publishing.

W. Brian James, Hoeganaes Corporation (2015). *Powder Metallurgy Methods and Applications*. ASM Handbook, Volume 7, Powder Metallurgy.

Wang, H., Fang, Z. Z., ve Sun, P. (2010). A critical Review of Mechanical Properties of Powder Metallurgy Titanium. *International Journal of Powder Metallurgy*, 46(5), 45-57.

Welsch, G., Lee, Y. T., Eloff, P. C., Eylon, D., & Froes, F. H. (1983). Deformation Behavior of Blended Elemental Ti-6Al-4V Compacts. *Metallurgical Transactions A*, 14(3), 761-769.

Williams, J. C. (2007). *Titanium. Engineering Materials and Processes*. Springer.

Yalçın, B. (2007). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin araştırılması* (Doctoral dissertation, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).

Yan, Y., Nash, G. L., ve Nash, P. (2013). Effect of Density and Pore Morphology on Fatigue Properties of Sintered Ti-6Al-4V. *International Journal of Fatigue*, 55, 81-91.

Yu, C. (2014). *Ti Powder Sintering: Impurity, Sintering Atmosphere and Alloy Design* (Doctoral dissertation, ResearchSpace@ Auckland).

Zak Fang, Z. (Ed.) (2010). *Sintering of Advanced Materials: Fundamental and Processes*. Woodhead Publ. in Materials. Oxford,UK.