

Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe Alaşımlarının Toz Metalürji Yöntemiyle İmalatı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Bekir YALÇIN, Remzi VAROL

ÖZET

Sinterlenmiş parçalarda yoğunluk ve mekanik özellikler sinterleme ve presleme şartlarına bağlıdır ve istenilen özelliklere ulaşmada sinterleme ve presleme koşullarının iyi belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada, uzay ve biyomalzeme sektöründe tercih edilen Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe alaşımları toz metalürjisi (T/M) metoduyla imal edilmiş ve bazı mekanik özelliklerinin tayini için testler yapılmıştır. Bu amaçla, 550 MPa sıkıştırma basıncı ile rijit kalıp içerisinde prizmatik (10x10x55 mm) numune şeklinde sıkıştırılan tozlar, % 99.99 saflıkta argon atmosferine sahip tüp fırın içerisinde 1250 °C sıcaklıkta iki saat süreyle sinterlenmişlerdir. Üretilen numuneler üzerinde, eğme, çekme ve mikrosertlik testleri yapılmıştır. Elde edilen veriler metalografik çalışmalar ile desteklenmiştir. Sonuç olarak, aynı koşullarda imal edilen Ti-5Al-2.5Fe alaşımının Ti-6Al-4V alaşımına göre yüksek mukavemetli yapıya sahip olmakla birlikte iyi sünek karakteristik gösterdiği gözlenmiştir. Elde edilen mekanik özelliklerin diğer araştırmaların referansıya herhangi bir implant uygulamalarında yeterli olabileceği kanaatine varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyomalzeme, sinterleme, implant.

Production of Ti-6Al-4V and Ti-5-Al-2.5Fe Alloys Via Powder Metallurgy Method and Investigation of its Some Mechanical Properties

ABSTRACT

Mechanical properties and density in sintered parts are based on the sintering and pressing conditions and then determination of the sintering and pressing condition of titanium alloy powders is required for the obtaining of desirable properties. In this study, Ti-6Al-4V and Ti-5Al-2.5Fe alloys were produced via powder metallurgy (P/M) and its some mechanical properties were investigated. With this aim, elemental powders for these alloys were pressed using 550 MPa compacting pressure inside rigid die as prismatic specimens (10x10x55 mm). Afterward, green compacts were sintered at 1250 °C temperature with two hour inside closed tube furnace under % 99.99 argon atmospheres. Tensile, bending and microhardness tests for these specimens were performed. Obtained experimental results were supported with metallurgical analyses. Tensile test results showed that sintered Ti-5Al-2.5-Fe alloy produced under same condition has higher strength than sintered Ti-6Al-4V alloy. Results indicate that these mechanical properties will be enough to any implant applications with respect to other researches.

Key words: Biomaterials, sintering, implant.

1. GİRİŞ

Titanyum (Ti) çeliğe göre yaklaşık % 56 düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen yüksek özgül dayanıma (çekme mukavemeti/yoğunluk) sahip bir malzemedir. Titanyum manyetik özelliği olmayan, korozyona dayanımı ve biyoyumluluğu yüksek malzeme olarak tanımlanır [1]. Bu özelliklerinden dolayı kimya, uzay, biyomalzeme ve kesici takım yüzey kaplama tek-

nolojilerinde tercih edilen ileri mühendislik malzemesidir (1-4). Ancak Ti esaslı parçaların yüksek üretim maliyeti kullanım alanlarını da oldukça sınırlamaktadır.

Ti alaşımlarının özellikleri fazların dönüşümü ile karakterize edilir. Endüstriyel uygulamalarda Ti alaşımları fazların dönüşümlerine göre seçilmekte olup biyomalzeme imalatında sıklıkla α/β ve β' ya yakın fazlar önerilmektedir (1, 3). Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe alaşımları α/β alaşımlarıdır ve sıklıkla uçak iniş takımları, gaz türbin çarkları ve kalça implant imalatı için tercih edilen malzeme olarak literatürde görülmektedir (3). Ancak bu alaşımların döküm yöntemiyle imalatından sonra talaşlı imalat proseslerinin kullanılmasıyla parça imalatı, işleme zorlukları ile birlikte malzeme sarfiyatıyla yüksek maliyetleri doğurmaktadır. Bu yüzden, pahalı bu alaşımlardan parça imalatı son şekle

Makale 05.05.2008 tarihinde geldi, 22.07.2008 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

B. YALÇIN, S.Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Mekatronik Eğitimi Bölümü, Isparta.

R. VAROL, S.Demirel Üniversitesi, Müh. Mim. Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta.

bekir@tef.sdu.edu.tr

Digital Object Identifier 10.2339/2008.11.3.235-241

yakın parça üretim tekniklerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. TM tekniği son şekle yakın parça üretebilmek için nitelendirilmekte olup, bu metodun özellikle gözenekli implant malzeme imalatında sıklıkla kullanıldığı bazı bilimsel çalışmalar ile tespit edilmiştir (4, 5, 6).

Taddei ve diğerleri (7), biyomalzeme amaçla Ti-35Nb-7Zr-5Ta alaşımını T/M yöntemini kullanarak imal etmişlerdir. Elde ettiği deneysel veriler ile bu alaşımın mükemmel biyoyumluluk ve kemiğe yakın elastik modülüne sahip olmasından dolayı implant uygulamasına aday bir malzeme olabileceğini rapor etmektedirler. Wen ve diğerleri (8), biyomalzeme imalatı için TiZr alaşımını T/M yöntemiyle 45 µm toz tane büyüklüğe sahip Ti tozu ve 150 µm Zr tozlarından köpük malzeme imal etmişlerdir. Elde ettiği veriler ile, kemiğe yakın elastik modülü, sağlanan gözenek yapısı ve mekanik özelliklerin doğal kemik yapısı ile benzeştiğini ileri sürmektedirler. Bir diğer çalışmada ise (1), Ti alaşımları ile paslanmaz çeliğin biyoyumlulukları vücut içinde yapılan hücre yaşatma testleri ile tespit edilmiştir. Sonuç olarak Ti alaşımlarının hücre yaşatma oranı % 90 mertebesinde iken, paslanmaz çelikte bu oran ortalama % 15 olduğu rapor edilmiştir. Leyens ve Peter'a göre (1), %10-20 gözenekli imal edilen Ti alaşımlarının kortikal kemiği implantasyonunda yeterli mekanik özellikleri sağlayabilmektedir.

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe alaşımları ortalama % 10 gözenekli bir şekilde toz metalurjisi metoduyla imal edilmiştir. Alaşımların karakterizasyonu için, çekme, eğme, sertlik ve metalografik analizler gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Alaşımların İmalatı

Alaşımların kimyasal içerikleri ASTM Grade 5 ve ISO Part 10 standartlarına göre belirlenmiş ve Çizelge 1 ve Çizelge 2' de verilmiştir

Her bir alaşım için, belirlenen alaşım elementleri

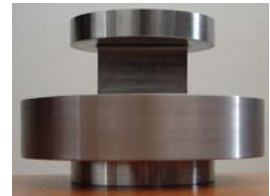
Çizelge 1. Ti-6Al-4V alaşımını oluşturan tozların kimyasal bileşimi

Alaşım Elemanı	Ti	Al	V	Zn-S
Ağırlık (%)	90	6	4	0,6
Ergime Sıcaklığı (°C)	1668	660	1910	120-124
Ortalama Toz Boyutu (µm)	44	63	44	40
Toz Morfolojisi	%70 Köşeli+ %30 küresel	Köşeli	Küresel	Köşeli

Çizelge 2. Ti-5Al-2.5Fe alaşımını oluşturan tozların kimyasal bileşimi

Alaşım Elemanı	Ti	Al	Fe	Zn-S
Ağırlık (%)	92.5	5	2.5	0,6
Ergime Sıcaklığı (°C)	1668	660	1538	120-124
Ortalama Toz Boyutu (µm)	44	63	44	40
Toz Morfolojisi	%70 Köşeli+ %30 küresel	Köşeli	Köşeli	Köşeli

ayrı ayrı % ağırlık oranlarına göre hassas terazilerde tartılarak on dört numune imal edilecek şekilde karışım hazırlanmıştır. Homojen toz karışımının sağlanması için tozlar, konik karıştırıcıda 22 dev/dak hızla 20 dakika süre ile karıştırılmıştır. Yüksek mukavemetli Ti alaşımı imal edebilmek için % 90 ham yoğunluk değeri esas alınarak, tozlar rijit kalıp içerisinde 550 N/mm² sıkıştırma basıncıyla preslenerek ham kompakt haline getirilmiştir. Ham numuneler 10x10x55 mm boyutlarında imal edilmiştir ve Şekil 1' de kompakt numune olarak verilmiştir. Sinterleme işlemi, % 99.99 saflıkta argon gaz atmosfer ortamında tüp fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler 5 °C/dak. ısıtma soğutma hızıyla 400 °C sıcaklıkta 20 dakika süreyle Zn-S uçurulmuş ve daha sonra 1250 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile bekletilerek sinterlenmiştir. Daha sonra, bu sıcaklıktan aynı soğutma hızıyla oda sıcaklığına soğutulmuş fırın ortamından dışarı alınmıştır.



Şekil 1. Kalıp seti ve ham numune

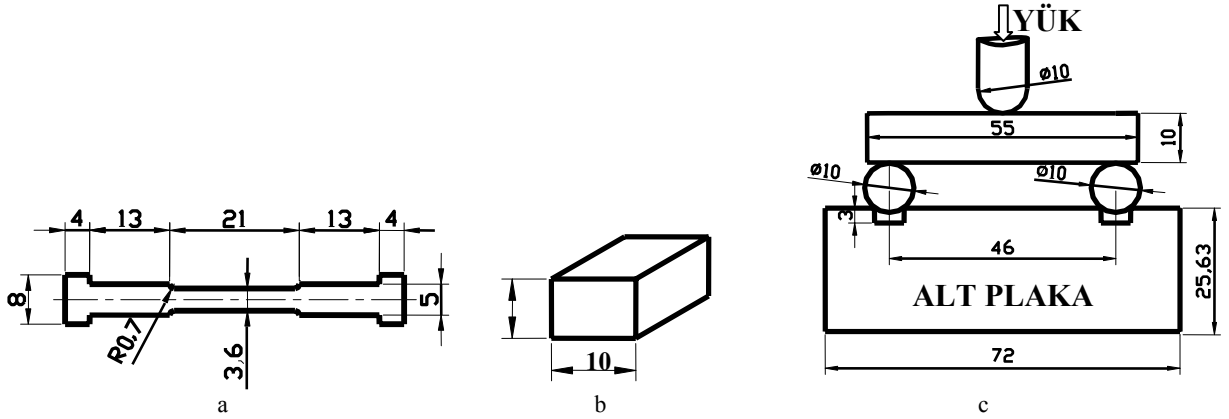
2.2. Mekanik Deneylemler

İmal edilen numunelerin mekanik özelliklerinin tayini için, çekme, eğme ve mikrosertlik testleri yapılmıştır. Mikrosertlik değerleri, numunenin boyuna belli aralıklarla yapılan ölçümleri ile tespit edilmiştir. Ölçümler Metkon MH3 marka sertlik ölçüm cihazında, vickers ucu kullanılarak 200 g yük 20 s uygulanarak yapılmıştır. Çekme deneyi için Şekil 2-a' da görülen ve TS EN 138 standardına göre çekme numuneleri hazırlanmıştır. Çekme deneyleri ALŞA marka test cihazında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, köpük ve kemik malzemelerin elastik modüllerini belirlemede kullanılan

Computer-Controlled Ultrasonic Pulser/ Receiver Sonik elastik modül cihazı kullanılarak, 7x10x10 mm boyutlarında hazırlanan numuneler (Şekil 2-b) ile elastik modül değerleri tayin edilmiştir. Eğme deneyi ise, Controls (Milano) marka 3000 kgf yük kapasitesine sahip cihazda yapılmıştır. MPIF 35-41 standardına göre hazırlanan test düzeneği ile, iki noktadan numune mesnetlenmiş ve numune ortasından eğme yükü uygulanmıştır (Şekil 2-c). Her bir alaşımın maksimum yükü ile eğme dayanımları aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\sigma_e = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (1)$$

σ_e , eğme mukavemeti (MPa), F kırılmayı oluşturan eğme yükü (N), L numunenin boyu (mm), b numunenin eni (mm) ve h ise numunenin yüksekliği (mm)'dir.



Şekil 2. a) Çekme deney numunesi, b) Sonik elastik modül numunesi, c) Eğme deney seti

2.4. Yoğunluk ve Boyut Değişimi

Her bir alaşımın yoğunluk ve sinter sonrası boyut değişimi beşer numune üzerinde yapılan ölçümler ile hesaplanmıştır. Boyut değişimi, sinterleme öncesi numune boyutu ile sinter sonrası boyut arasındaki fark % olarak verilmiştir. Boyut ölçümleri 0.01 mm hassasiyetindeki mikrometre ve 0.02 mm hassasiyetindeki kumpaslar ile yapılmıştır. Yoğunluk değişimi, ham yoğunluk

değerleri ile sinter sonrası yoğunluk değerleri arasındaki fark % olarak verilmiştir. Yoğunluk ölçümleri Arshimed metoduyla tespit edilmiştir.

2.3. Metalografik Analizler

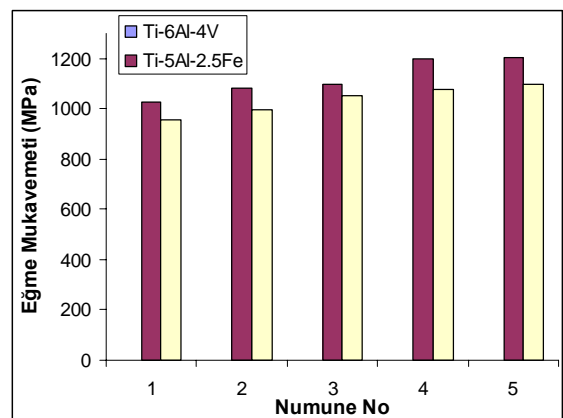
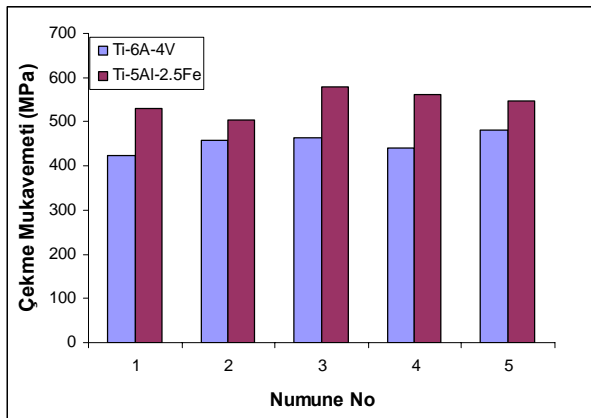
İlk olarak, imal edilen numunelerin homojenliğini araştırmak için EDS analizleri yapılmıştır. Eğme yükü ile kırılan numunelerin kırık yüzeyleri ZEISS marka Supra 50VP model tarama elektron mikroskobunda (SEM) yapılmıştır. SEM mikroskobuyla, malzemelerde oluşan gözenek şekli ve büyüklüğü, yapı dönüşümleri analiz edilmiştir. Mikroyapı incelemeleri için, her bir alaşımın numune ön hazırlık aşamasında, 400, 600, 800, 1200 ve 2000 numara zımpara ile zımparalanmış ve elmas macun ile parlatma işlemi yapılmıştır. Dağlama sıvısı olarak % 10 HF, % 5 HNO₃ ve % 85 H₂O kullanılmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI

3.1. Mekanik Test Sonuçları

Çekme deneyi beşer numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ortalama alınan deney sonuç değerleri Şekil 3' de verilmektedir.

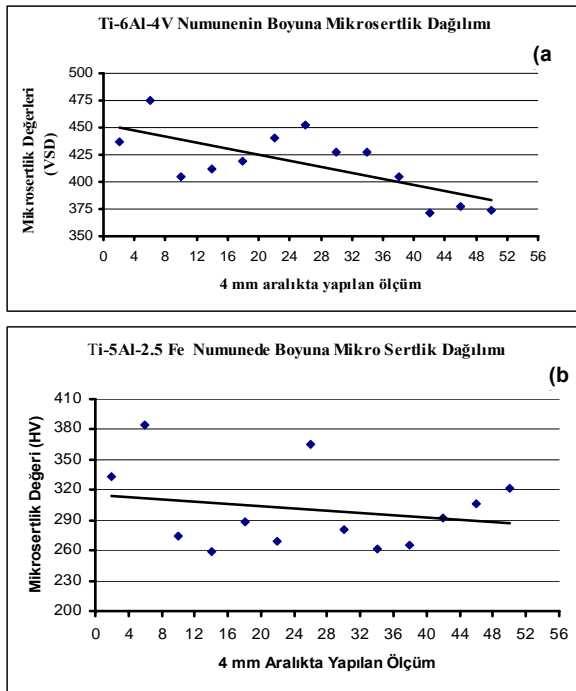
Numunelerden elde edilen değerler karşılaştırıldığında, Ti-6Al-4V alaşımında ortalama 453



Şekil 3. Çekme ve eğme mukavemet değerleri

MPa, Ti-5Al-2.5Fe alaşımında ise 544 MPa çekme mukavemeti, Ti-5Al-2.5Fe alaşımında ortalama % 1.45 kesit daralması ve %4.45 uzama, Ti-6Al-4V alaşımında ise % 1.3 kesit daralma ve % 4.25 boyut uzaması elde edilmiştir. Elastik modül değerleri ise, Ti-6Al-4V alaşımında 83 GPa, Ti-5Al-2.5Fe alaşımında ise 79 GPa olarak tespit edilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımında ortalama 1122 MPa, Ti-5Al-2.5Fe alaşımında ise 1035 MPa ortalama eğme dayanımı değeri elde edilmiştir.

Mikrosertlik değerleri, her bir alaşım için 55 mm uzunluk üzerinden 4 mm aralıklar ile ölçüm yapılarak ortalama sertlik değeri alınmıştır. Bu değerler Şekil 4' te verilmektedir.

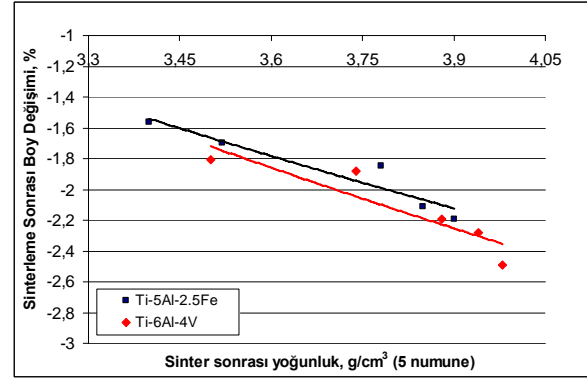


Şekil 4. a) Ti-6Al-4V alaşımı mikrosertlik değerleri, b) Ti-5Al-2.5Fe alaşımı mikrosertlik değerleri

Ti-6Al-4V alaşımının mikro sertlik değeri 375-450 HV arasında, Ti-5Al-2.5Fe alaşımında ise 260-320 HV arasında değişim göstermektedir. Ti-5Al-2.5Fe alaşımında daha kararlı bir sertlik değeri gözlemlenirken, Ti-6Al-4V alaşımında ise daha değişken bir sertlik görülmüştür. Ancak, Ti-5Al-2.5Fe alaşımı 290 HV ortalama sertlik değerine, diğer alaşım ise 410 HV mikrosertlik değerine sahip olduğu söylenebilir.

3.2. Yoğunluk ve Boyut Değişimleri

Alaşımlarda sinter öncesine göre sinter sonrası yoğunluk ve % boyut değişimleri Şekil 5' te verilmiştir.



Şekil 5. Alaşımlarda sinter öncesine göre sinter sonrası yoğunluk ve % boyut değişimleri

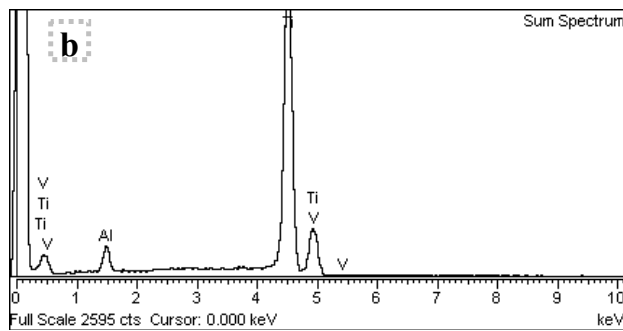
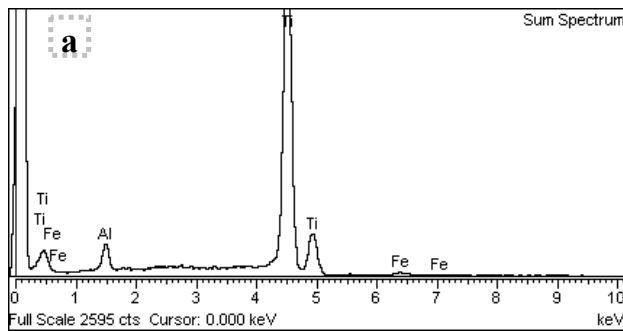
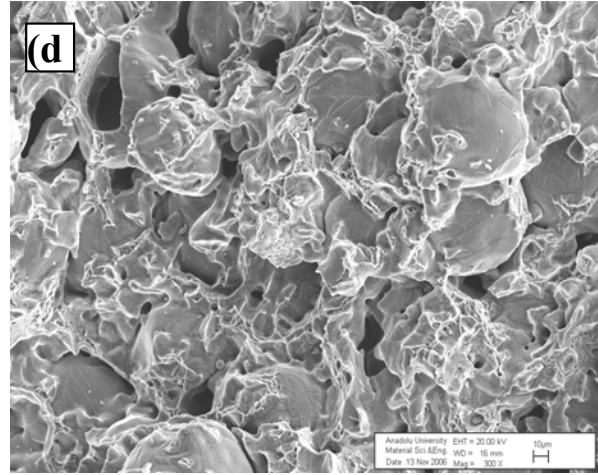
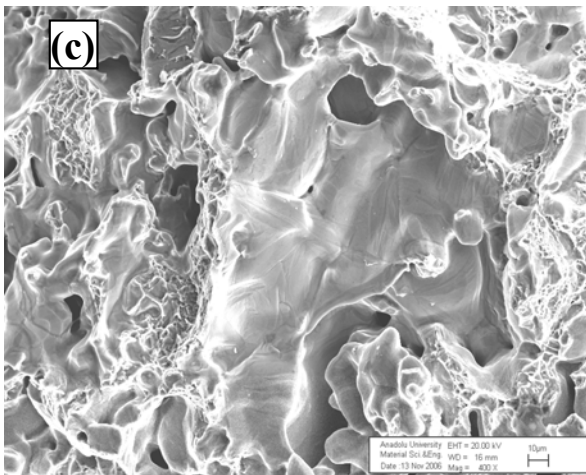
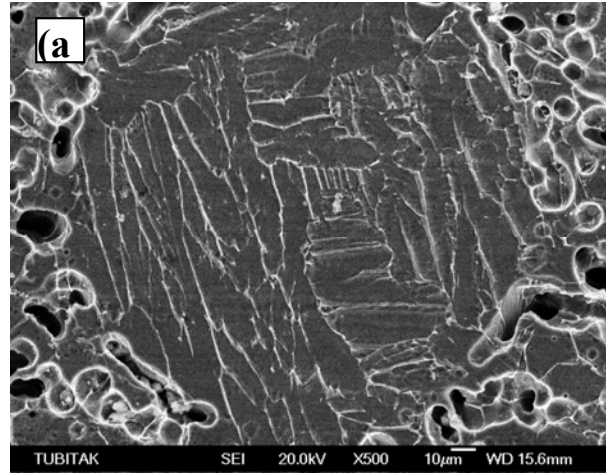
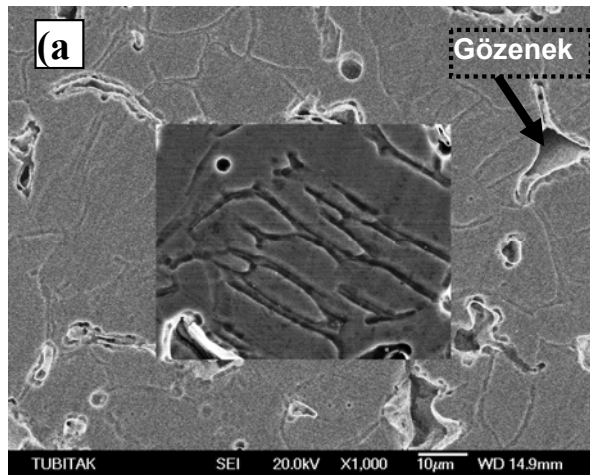
Ti-6Al-4V alaşımında beş numunede ortalama % -2,2 boyutsal küçülme gözlemlenmiş ve diğer alaşımda ise ortalama % -2 boyutsal küçülme meydana gelmiştir. Ti-6Al-4V alaşımı numuneleri sinter sonrası ortalama yoğunluk $3,92 \text{ g/cm}^3$, diğer alaşımda ise bu değer $3,89 \text{ g/cm}^3$ tür. Her iki alaşımda da, bu değerler birbirine oldukça yakındır.

3.3. Metalurjik Analizler

Numunelerin gözenek morfolojisi, eğme deneyi sonrası kırılan numunelerin kırık yüzeyleri üzerinde incelenmiştir. Alaşımların mikroyapıları, oluşan gözenek morfolojisi Şekil 6'da ve yapıların EDS analizleri Şekil 7'de verilmiştir.

Ti-5Al-2.5Fe alaşımında gözenek oluşumu, tanelerin birleştiği bölgelerde oldukça elverişli bir şekilde gelişmiş ve gözenek boyutunun yaklaşık $10 \mu\text{m}$ büyüklüğünde olduğu Şekil 6-a' da görülmektedir. Mikroyapı dönüşümü, yaklaşık $6 \mu\text{m}$ genişliğinde ve $10-20 \mu\text{m}$ aralığında uzunluğa sahip iğnemsî α fazı ile birlikte nadiren eş eksensel α fazı ve tane sınırlarına yerleşen ince β fazı şeklinde gelişmiştir (Widmanstatten yapı dönüşümü). Bu alaşımda gözenekler küresel yakın formda ve sinter difüzyon mekanizması da oldukça elverişli bir şekilde gelişmiştir (Şekil 6-c). Ti-5Al-2.5Fe alaşımının homojen olduğu Şekil 7-a.' da verilen EDS analizlerinde görülmektedir.

Ti-6Al-4V alaşımında ise, gözeneklerin küreselleşmesi ile birlikte Widmanstatten yapı dönüşümü Şekil 6-a,d.' de görülmektedir. Widmanstatten yapı, yaklaşık $5-10 \mu\text{m}$ kalınlığında ve $40-50 \mu\text{m}$ aralığında iğnemsî α fazı şeklinde oluşmuştur. Diğer alaşıma göre daha ince ve uzun lamel yapı gözlemlenmiştir. Gözenekler ise, $10-15 \mu\text{m}$ büyüklüğünde ve tane sınırlarında oldukça yoğunlaştığı Şekil 6-b' de görülmektedir. Bu alaşımda, alaşım elemanları yapı içerisinde homojen dağılım göstermiş ve bu durum Şekil 7-b' de verilmiştir



4. SONUÇLARIN YORUMLANMASI

Benzer şartlarda toz metalurjisi yöntemiyle imal edilen bu iki ileri mühendislik alaşımın karakterizasyonu için, çekme, eğme ve mikrosertlik testleri ile birlikte bazı metalurjik analizler yapılmıştır.

Şekil 3’de görüleceği üzere, Ti-6Al-4V alaşımına göre Ti-5Al-2.5Fe alaşımı yaklaşık % 16 mertebesinde daha fazla çekme mukavemetine sahip olmakla birlikte daha yüksek kopma uzama karakteri göstermiştir. Diğer yandan Ti-6Al-4V alaşımına göre % 29 oranında daha düşük mikro sertlik değerine sahiptir. Bu sonuçlar ile, aynı şartlarda imal edilen Ti-5Al-2.5Fe alaşımı diğer alaşıma göre daha sünek bir karakteristiğe sahip olduğu söylenebilir.

Şekil 5’ de görüldüğü gibi, Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe alaşımlarında sinterleme sonrası sırasıyla 3,92 g/cm³ ve 3,89 g/cm³ yoğunluk değeri elde edilmiştir. Fores vd. [9]; 500-600 MPa sıkıştırma basıncından sonra 1250 °C sinterleme sıcaklığında ortalama 3,95 g/cm³ yoğunluğa ulaşılabildiğini belirtmişlerdir. Elde edilen yoğunluk değerlerinin literatürde yapılan çalışmalarla örtüştüğü anlaşılmaktadır. Lin ve diğerleri [10], Ti esaslı alaşımlarda 1200 °C sinterleme sonrası % 1-2,5 aralığında lineer bir boyutsal küçülme olabileceğini rapor etmektedirler. Bu çalışmada da, alaşımlarda sinterleme sonrası %2-2,5 oranında boyutsal küçülme tespit edilmiştir.

Choe vd.[11] 44 µm toz partikül büyüklüğüne sahip Ti-6Al-4V alaşımının ortalama 426 HV, Ti-5Al-2.5Fe alaşımında ise 285 HV mikrosertlik değeri elde etmişlerdir. Bu çalışmada ise, Şekil 4’ de görüleceği üzere, Ti-6Al-4V alaşımı ortalama 410 HV, Ti-5Al-2.5Fe alaşımı ortalama 290 HV mikro sertlik değeri elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen sertlik değerleri ile literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen değerlerin uyum sağladığı söylenebilir.

Long ve Rack [12]’ a göre, % 20 gözenek oranına sahip TNZT alaşımının elastik modülünün 55 GPa mertebesine kadar düşürülebildiği ve bu alaşımın 550 MPa çekme mukavemet değerinin implant uygulamala-

rında kabul edilebilir olduğu ileri sürülmektedir. Bu çalışmada ise TM Ti alaşımları, Çizelge 3’ de görüleceği üzere, döküm Ti-5Al-2.5Fe, Ti-6Al-4V ve paslanmaz çelik malzemelere göre kemiğe yakın mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 6’ da belirtildiği gibi, gözenek büyüklüğü ve gözenek miktarı arttıkça, çekme dayanımının da azalacağı söylenebilir. Bu çalışmada da, Ti-6Al-4V alaşımında diğer alaşıma göre daha yoğunlaşmış gözenekli yapı elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Aynı presleme ve sinterleme şartlarında imal edilen Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe alaşımlarında yapılan mekanik testler sonrası bazı değerler elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmayla aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir:

- TM metodu kullanılarak minimum malzeme fitesi ile implant uygulamalarında kullanılan Ti esaslı alaşımı imal etmek mümkündür.
- Gözenek oranının artırılmasıyla daha düşük elastik modülüne sahip Ti alaşımı imal edilebilir ancak implant uygulamalarında optimum çekme mukavemeti sağlanmalıdır.
- Titanyum alaşımlarında sinterlemenin vakum ve koruyucu gaz atmosfer ortamında yapılmasıyla kimyasal olarak homojen yapılar elde edilebilir. Bu alaşımlarda, 5 °C/dak. ısıtma-soğutma hızında ve 1250 °C sıcaklıkta iki saat süre ile yapılan sinterleme işleminin, gerekli Widmanstatten yapı dönüşümünü sağladığı söylenebilir.
- Makroskobik anlamda Ti alaşımlarında sinterleme sonrası, % 2-2,5 mertebesinde boyutsal küçülme oluşmaktadır. Bu malzemeler için, diğer endüstriyel parçaların kalıp imalatında bu değer göz önüne alınmalıdır.
- Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe alaşımlarında ortalama % 90 sinter sonrası yoğunluk (doluluk oranı) ile, yaklaşık 80 GPa elastik modül ve 450-550 MPa çekme mukavemeti elde edile-

Çizelge 3. TM Ti alaşımlar ile kemik malzemenin karşılaştırılması

Alaşım	Elastisite Modül (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Özgül Çekme Mukavemeti (çekme mukavemeti/yoğunluk)	Yoğunluk (g/cm ³)	% Kesit daralma	% Uzama
TM Ti6Al4V	83	464	118	3,94	1,35	4,25
TM Ti5Al2.5Fe	79	581	147,5	3,94	1,42	4,45
Döküm Ti6Al4V	110	950	214	4,42	22	10
Döküm Ti5Al2.5Fe	110	1030	228	4,51	35	15
Döküm 316 L SS	211	650	83	7,8	45	-
Kemik	10-40	90-140	63	1,9	-	1

bildiği söylenebilir. İmal edilen bu alaşımların mekanik özellikleri daha önce yapılan çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırıldığında implant uygulamaları için aday bir malzeme olabileceği sonucuna varılmıştır.

6. TEŞEKKÜR

Çalışmamızı destekleyen TÜBİTAK ve SDÜ.BAP. yönetim birimine teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

1. Leyen, C., Peters, M., Titanium and Alloys, Fundamentals and Applications, Wiley Vch, Köln, Germany, 2003.
2. ASM Metals Handbook, "Powder Metallurgy and Applications", Vol. 7, ASM International, USA, 1998.
3. Donachie, M.J., Titanium a Technical Guide, The Material Information Society, Second Edition, USA, 2000.
4. Titanium Industries, 2006. İnternet Sitesi.<http://www.titanium.com/titanium/applis.cfm>. Erişim Tarihi: 12.07.2006.
5. Henriques, V.A.R., Campos, P.P., Cairo, C.A.A., Bressiani, C.J., Production of Titanium Alloys for Advanced Aerospace Systems by Powder Metallurgy, Material Research, 8 (4), 443-446, 2005.
6. Yalçın, B., Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Ti Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması, SDÜ., Fen Bil. Enst., Makine Müh. A.D., Isparta, 2007.
7. Taddei, E.B., Characterization of Ti-35Nb-Zr-5Ta Alloyed Produced by Powder Metallurgy, Materials Science Forum, Trans. Tech. Pub., Switzerland, 498-499, 34-39, 2005.
8. Wen, C.E., Yamada, Y., Hodgson, P.D., Fabrication of Novel TiZr Alloy Foam for Biomedical Applications, Materials Science and Engineering C 26, 1439-1444, 2006.
9. Froes, F.H., Eylon, D. and Bombergers Eds., Titanium Technology: Presents Status and Future Trends, TDA, Dayton, OH, 1985.
10. Lin, W.C., Ju, P.C., Chern Lin, J.H., A Comparison of the Fatigue Behavior of the Cast Ti 7.5Mo with Cp Titanium, Ti-6Al-4V and Ti-13Nb-13Zr Alloys, Biomaterials, 26, 2899-2907, 2005.
11. Choe, H., Abkowitz, S.M., Abkowitz, S., Effects of Tungsten Additions on the Mechanical Properties of Ti-6Al-4V, Materials Science and Engineering, A 396, 99-106, 2005.
12. Long, M., Rack, H.J., Titanium Alloy in Total Joint Replacement a Materials Science Perspective, Biomaterials, 19, 1621-1639, 1998