

Ti-6Al-4V ALAŞIM TOZUNDAN HAZIRLANAN BESLEME STOKUNUN KALIPLAMA VE SINTERLEME PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

Mehmet SUBAŞI¹, Çetin KARATAŞ²

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara

msubasi@gazi.edu.tr, cetink@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 06.05.2015; Kabul/Accepted: 12.10.2015)

ÖZET

Titanyum ve alaşımları, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci ve mükemmel biyouyumluluk gibi nedenlerden dolayı endüstride birçok parçada ve biyomedikal uygulamalarda oldukça fazla kullanılmaktadır. Toz enjeksiyon kalıplama (TEK), plastik enjeksiyon kalıplama ve geleneksel toz metalurjisi tekniklerinin kombinasyonundan ortaya çıkmış bir yöntemdir. TEK yöntemi küçük ve karmaşık şekilli parçaların seri üretimi için birçok benzersiz avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımından TEK ile parça üretimi için gerekli optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri belirlenmiştir. Kalıplama ve sinterleme parametrelerinin tespiti için Taguchi yöntemi ile yapılan deney tasarımı kullanılmıştır. Ti-6Al-4V besleme stoku için en uygun parametreler debi 20 cm³/s, enjeksiyon basıncı 1100 bar, ütleme basıncı %60, enjeksiyon sıcaklığı 140°C, kalıp sıcaklığı 60°C, sinterleme sıcaklığı 1250°C, sinterleme süresi 1 saat, sinterleme hızı 1°C/min, gaz akış hızı 10 l/min olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ti-6Al-4V, toz enjeksiyon kalıplama, sinterleme

INVESTIGATION OF MOLDING AND SINTERING PARAMETERS OF FEEDSTOCK PREPARED FROM Ti-6Al-4V ALLOY POWDER

ABSTRACT

Having some properties like low density, high temperature resistance, corrosion resistance and excellent biocompatibility, has made titanium and its alloys to be used in many industrial and biomedical applications. As a new production process, Powder Injection Molding (PIM) refers to a combination of powder metallurgy and plastic injection molding technologies. PIM method offers several unique advantages in mass production of small and complex-shaped parts. In this study, the PIM optimal parameters of molding and sintering stages, for fabricating of Ti-6Al-4V alloy has been determined. To realize the molding and sintering parameters, Taguchi method of experimental design has been applied. As a result, Ti-6Al-4V feedstock studies exhibited flow rate of 20 cm³/s, injection pressure of 1100 bar, holding pressure of 60%, injection temperature of 140°C, sintering temperature of 1250°C, sintering dwell time of 1 hour, sintering heating rate of 1°C/min, gas flow rate of 10 lit/min, as optimum parameters.

Keywords: Ti-6Al-4V, powder injection molding, sintering

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titanyum alaşımları, belirli bir akma dayanımı ve yoğunluk arasındaki ilişkiye göre ($\sigma_{0.2}$ /yoğunluk) hafif metal alaşımlar, çelikler, nikel alaşımlar vb. malzeme türleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek dayanıma sahiptirler. Hatta bu avantajlarını yaklaşık 500°C

sıcaklıkta bile koruyabilmektedirler. Bundan dolayı bazı titanyum alaşımları gaz türbini ve jet motorlarının parçalarının üretimi için çok uygundur [1]. Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK), metal ve seramik tozlarından üretim yapabilmek için toz metalurjisinin yetenekleri ile plastik enjeksiyon kalıplamanın biçimlendirme verimliliğinin birleşimi

sonucunda ortaya çıkmış üretim teknolojisidir [2]. TEK plastik enjeksiyon kalıplama prensibine dayanır. Bu yöntem özellikle küçük boyutlu parçaların üretimi ve karmaşık şekilli parçaların daha düşük maliyetlerle üretilebilmesi için geliştirilmiştir. TEK besleme stoku hazırlama, enjeksiyon kalıplama, bağlayıcı giderme ve sinterleme olmak üzere dört adımdan meydana gelmektedir. Bu kalıplama tekniğinde iyi bir sonuca ulaşmak için her bir adımın parametrelerinin iyi optimize edilmesi gereklidir [2, 3]. TEK’de enjeksiyon parametrelerinin son ürünün özellikleri ve ham parçanın yüzey kalitesi üzerine etkisi çok yüksektir [4]. Ayrıca Ti tozları elementel olarak hazırlanması ve sinterleme aşamasında oksijenle kolayca reaksiyona girebilen reaktif bir malzeme olmasından dolayı sinterleme parametrelerinin optimum olarak seçilmesi gerekmektedir [4]. Yapılan literatür çalışmalarından TEK ile titanyum ve titanyum alaşımlarından üretimin gittikçe yaygınlaştığı ancak toz ve bağlayıcı sistemin enjeksiyon parametrelerine (enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, kalıp sıcaklığı) etkilerinin tam olarak optimum bir hale getirilemediği görülmüştür [6-12]. Literatürde yapılan çalışmalarda demir ve paslanmaz çelik tozlarından elde edilen besleme stoklarının enjeksiyon parametreleri ve akış boylarının sanal ortamda optimize edilmeye çalışıldığı tespit edilmiştir [13, 14]. Bu çalışmanın amacı, dental ya da ortopedik amaçlı implant malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan titanyum alaşımlarından olan Ti-6Al-4V’den TEK ile parça üretimi sırasında kalıplama parametrelerinin kalıplanan parçadaki etkilerinin tespit edilmesi ve bu bulgular ışığında endüstriyel üretim için enjeksiyon ve sinterleme parametrelerinin belirlenmesidir.

2. MALZEME VE METOT (MATERIALS AND METHOD)

2.1 Toz ve Bağlayıcı (Powder and Binder)

Çalışmada gaz atomizasyon yöntemi ile elde edilmiş TLS Technik GmbH firmasından temin edilen küresel şekilli ve boyutu $< 25 \mu\text{m}$ olan Ti-6Al-4V alaşım tozu kullanılmıştır. Tablo 1’de deneylerde kullanılan tozun kimyasal kompozisyonu verilmiştir. TEK’de bağlayıcının düşük viskoziteye sahip olması, kalıba yapışmaması, uçucu olmaması, kademe kademe sistemden ayrılması, kolayca uzaklaştırılabilmesi, akış esnasında tozdan ayrılmaması ve ayrıca toz ile kimyasal tepkimeye girmemesi istenmektedir [15]. Bu prensipler çerçevesinde çalışmada hacimce %35 orana sahip Yüksek Yoğunluklu Polietilen, Polipropilen, PEG 20,000, Parafin ve Stearik asitten meydana gelen bağlayıcı sistem hazırlanmıştır. Bağlayıcı sistem Turbula marka üç boyutlu karıştırıcıda kuru ortamda

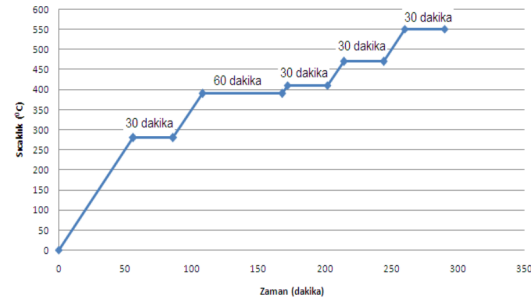
Karataş ve diğerlerinin [16] yaptıkları çalışma doğrultusunda 45 dakika karıştırılmıştır.

2.2 Toz Enjeksiyon Kalıbı (Powder Injection Molding)

Enjeksiyon kalıplama işlemi Arburg Allrounder 220S cihazında yapılmıştır. Çalışmada besleme stoklarından standart çekme dayanımı test numunesi üretilmiştir. Çekme dayanımı test numuneleri üretmek için kullanılan kalıp “Metal Powder Industries Federation” tarafından belirlenen ölçülere uygun yapılmıştır [1].

2.3 Bağlayıcı Giderme Deneyleri (Experiments Of Debinding)

Besleme stoklarına kimyasal ve ısıl olmak üzere iki bağlayıcı giderme işlemi uygulanmıştır. Kimyasal bağlayıcı giderme aşamasında numuneler etüv fırında yüksek saflıktaki Heptan da 60°C de 20 saat bekletilmişlerdir. Bu aşamadan sonra numuneler 60°C 12 saat kurutma işlemine tabi tutulmuşlardır. Isıl bağlayıcı giderme işlemi ise atmosfer kontrollü sinterleme fırınında yüksek saflıktaki (%99,999) argon gazının taze bakır talaşından geçirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Isıl bağlayıcı giderme deneyleri $1-3-5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ olmak üzere üç farklı ısıtma hızında yapılmıştır. Şekil 1’de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ısıtma hızında yapılan ısıl bağlayıcı giderme aşaması adımları gösterilmiştir.



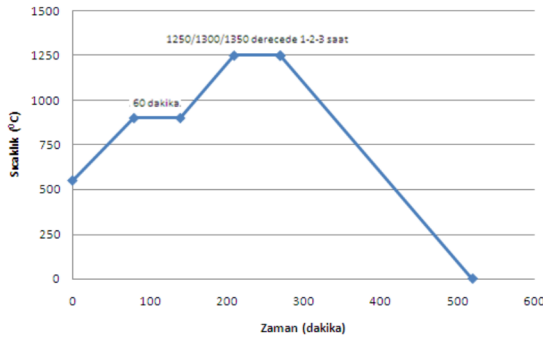
Şekil 1. Besleme stokunun $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ısıtma hızındaki ısıl bağlayıcı giderme aşamaları (The feedstock thermal binder removal stages at the heating rate $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$)

2.4. Sinterleme deneyleri (Experiments of sintering)

Sinterleme işlemi, atmosfer kontrollü MTI marka GSL 1800X model sinterleme fırınında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme fırını atmosferi, 500°C 'ye ısıtılmış bakır talaşından geçirilen yüksek saflıktaki argon gazı ile kontrol altına alınmıştır. Ön sinterleme tamamlandıktan sonra $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ısıtma hızıyla 1250-1300-1350 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarına çıkılmış ve 1, 2, 3 saat beklenilerek sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme işleminden sonra fırın $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ soğutma hızında soğutulmuştur (Şekil 2).

Tablo 1. Ti-6Al-4V tozunun kimyasal kompozisyonu (Chemical properties of Ti-6Al-4V powder)

Element	Al	V	C	Fe	O	N	H	Y	Zn	Mg	Sn	Ti
Ağırlıkça %	6,42	4,22	0,007	0,130	0,120	0,016	0,0010	<0,001	<0,002	<0,002	0,001	Geri kalan



Şekil 2. Sinterleme aşaması (Sintering stage)

2.5 Deneysel Tasarımı (Design of experiment)

Literatür taraması, kalıplama ve sinterleme ön deneyleri sonuçları doğrultusunda Taguchi yöntemi kullanılarak Tablo 2 ve Tablo 3'deki parametrelerin kullanılmasına karar verilmiştir. Kalıplama ve sinterleme parametrelerinin üretilen parçanın mekanik özelliklerine etkisi belirleyebilmek için Taguchi yönteminde bulunun L27 modeli ile deney tasarımı yapılmıştır.

2.6 Çekme Deneyleri ve Boşluk Oranı Ölçümü (Tensile Testing and Porosity Measurements)

Deneyler Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan maksimum 50 kN yükleme kapasiteli Instron marka bilgisayar kontrollü çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri kafa hızı 1 mm/min sabit tutularak TS EN ISO 6892-1 standardına göre yapılmıştır. Çalışmada numunelerdeki boşluk oranı Eş 1'deki formül ile tespit edilmiştir [18].

$$\% \text{ Boşluk oranı} : 100 - \left[\left(\frac{\text{Sinterlenmiş parçanın yoğunluğu}}{\text{Hadde malzeme yoğunluğu}} \right) \times 100 \right] \quad (1)$$

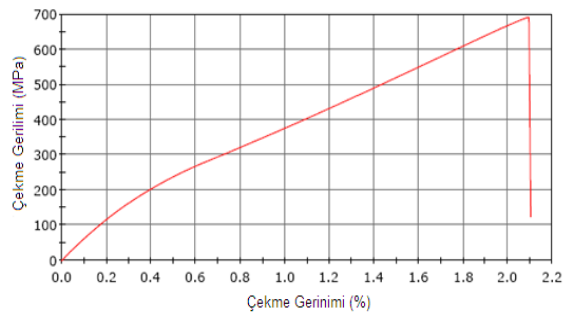
2.7 Mikroyapı Analizleri (Microstructural Analysis)

Çalışmada numunelerin mikroyapı analizleri Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

laboratuvarında bulunan LEICA marka ışık mikroskobu ve JEOL marka JSM-6060LV Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazlarında yapılmıştır. Mikroyapı analizleri aşamasında numuneler 400-600-800-1000-1200 numaralı zımparalar ile sırasıyla parlatılmış ve ardından Kroll çözeltisi (2 ml HF (Hidroflorik asit)+10 ml HNO₃ (Nitrik Asit)+88 ml saf su) ile dağlanmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Yapılan deneyler sonucunda Ti-6Al-4V besleme stoklarından üretilen numunelerin çekme dayanımı sonuçları Ek 1 de görülmektedir. Deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı birinci satırdaki deney parametrelerinde (691,21 MPa) elde edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokundan elde edilen en yüksek çekme dayanımı (The highest tensile strength of Ti-6Al-4V specimens with 65wt% powder loading)

Deney girdilerinin etki sıralamasında en küçük değere sahip olan *Prob>F* değeri en etkili parametreyi ifade etmektedir. Taguchi L27 modeli doğrultusunda yapılan sıralama sonucunda 0,0014 *Prob>F* değerine sahip olan sinterleme sıcaklığının en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4). Deneyler sonucunda Ti-6Al-4V alaşım tozları ile hazırlanmış besleme stokunun optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri Taguchi yöntemi ile belirlenmiştir (Tablo 5). Belirlenen bu parametreler ile yeniden

Tablo 2. Toz enjeksiyon kalıplama parametreleri (Powder injection molding parameters)

Enjeksiyon Kalıplama Parametreleri	Debi (cm ³ /s)	Enjeksiyon Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (%)	Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)
1	20	1100	50	140	40
2	25	1200	60	150	50
3	30	1300	70	160	60

Tablo 3. Sinterleme parametreleri (Sintering parameters)

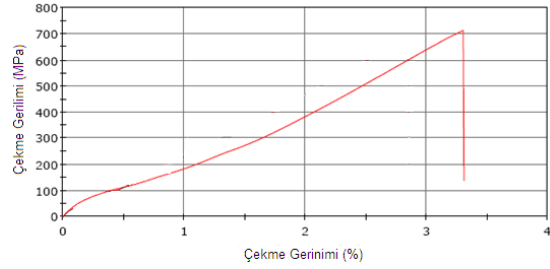
Sinterleme Parametreleri	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Isıtma Hızı (°C/min)	Gaz Akış Hızı (l/min)
1	1250	1	1	5
2	1300	2	3	10
3	1350	3	5	15

üretilen numunelerde en yüksek çekme dayanımı 711,79 MPa çıkmıştır. Taguchi L27 modeli ve bu modelin önerdiği optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri karşılaştırıldığında Taguchi L27 modelinin önerdiği optimum parametrelerin en yüksek çekme dayanımı elde etmek için uygun olduğu tespit edilmiştir (Tablo 6), (Şekil 4).

Şekil 3 ve 4’de görüldüğü gibi hazırlanan besleme stokundan üretilen numunelerin çekme grafiği dökme demir gibi davrandığı görülmektedir. Toz metalurjisi parçaların dökme demir gibi hareket ettiği bilinmektedir [19]. Ferri ve diğerleri [20] %68 Ti-6Al-4V toz yüklemeli numunelerin sinterleme işlemini 10^{-5} mbar vakum altında 1250°C de 2 saat tutarak gerçekleştirmişler daha sonra bilyeleme işlemi uygulamışlardır. Bu çalışma sonucunda numunelerde en yüksek 800 MPa çekme gerilmesi elde etmişlerdir.

Tablo 4. Ti-6Al-4V numuneler için deney girdilerinin etki sıralaması (Effect-oriented sequence of input parameters for Ti-6Al-4V samples)

Effect Tests S/N Ration	
Source	Prob > F
Sinterleme sıcaklığı	0,0014
Enjeksiyon sıcaklığı	0,1643
Gaz akış hızı	0,1904
Debi	0,2212
Kalıp sıcaklığı	0,2466
Ütuleme basıncı	0,4326
Enjeksiyon basıncı	0,4705
Sinterleme süresi	0,7048
Isıtma hızı	0,7677



Şekil 4. Ti-6Al-4V besleme stokundan optimum kalıplama ve sinterleme parametrelerinde üretilmiş numunenin çekme dayanımı (The tensile strength of Ti-6Al-4V specimens produced with the optimum molding and sintering parameters)

Obasi ve arkadaşları [10] %69 Ti-6Al-4V toz yüklemeli numunelerin sinterleme işlemini 10^{-4} mbar vakum altında 1250°C ile 1400°C arasında değişen sıcaklıklarda ve farklı sinterleme süreleri ve ısıtma hızlarında gerçekleştirmişler ve en yüksek çekme gerilmesini 806 MPa bulmuşlardır. Shibo ve diğerleri [21] %72 toz yüklemeli Ti-6Al-4V numunelerin sinterleme işlemini 10^{-5} mbar vakum altında 1230°C de 3 saat de yapmışlardır. Deneyler sonucunda numunelerde 835 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Nor ve diğerleri [9] Ti-6Al-4V numuneleri yüksek vakum altında (10^{-6} mbar) sinterlemişler ve en yüksek çekme dayanımına (934,33 MPa), 1200°C sinterleme sıcaklığında, 1 saat sinterleme süresinde ulaştıklarını rapor etmişlerdir. Ergül ve diğerleri [22] TEK yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşım tozundan ürettikleri numuneleri dört farklı sıcaklıkta ve beş farklı sürede 10^{-3} mbar vakum atmosferinde sinterlemişlerdir. Deneyler sonucunda 1275°C de 10 saat sinterlenmiş numunede 704 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Bu çalışma da Ti-6Al-4V besleme stoklarından hazırlanan ve 1250°C de 1 saat sinterlenmiş numunelerde en yüksek çekme

Tablo 5. Ti-6Al-4V alaşım tozu ile hazırlanmış besleme stokunun optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri (Optimum molding and sintering parameters of feedstock containing Ti-6Al-4V alloy-powder)

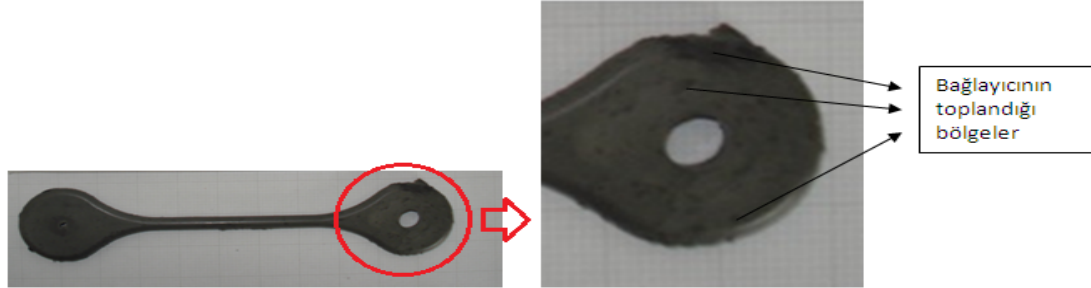
Toz cinsi	Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütuleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Sinterleme Hızı (°C/min)	Gaz Akış Hızı (l/min)
Ti-6Al-4V	20	1100	60	140	60	1250	1	1	10

Tablo 6. Çekme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of the results of tensile test)

Besleme Stoku Cinsi	Taguchi Deney Tasarımı İle Elde Edilen En Yüksek Çekme Dayanımı (MPa)	Taguchi Deney Tasarımının Önerdiği Optimum Parametrelerde Elde Edilen En Yüksek Çekme Dayanımı (MPa)	Hadde Malzemenin Çekme Dayanımı Sonuçları (MPa)
Ti-6Al-4V	691,21	711,79	860 (ASTM F1108-04)

Tablo 7. Ti-6Al-4V numunelerin MPIF 35 standardındaki özellikleri (The properties of Ti-6Al-4V samples according to the standard of MPIF 35)

Özellik	Sinterlenmiş Ti-6Al-4V	MPIF 35
Yoğunluk (g/cm ³)	96,95	>%96
Boşluk (%)	3,05	< 5
Boyda çekme (%)	12,85	12 - 15
Çekme Dayanımı (MPa)	711,79	>700

**Şekil 5.** Toz enjeksiyon kalıbından çıkan numune (Debi 25 cm³/s - Enj. basıncı 1300 bar) (The molded and ejected specimen (Flow rate 25 cm³/s - Injection Pressure 1300 bar))

gerilmesi (711,79 MPa) elde edilmiştir. Ferri ve arkadaşları 800 MPa değerini numuneleri bilyeleyerek ve vakum altında 2 saat süre ile sinterleme sonucunda elde edebilmişlerdir. Çalışmamızda numuneler bilyelenmeden ve vakum altında değil kontrol atmosferde sinterlenmiştir. Vakum altında yapılan sinterlemenin kontrol atmosferde yapılandan daha iyi olduğu ve toz yüklemesi arttıkça numunenin mekanik özelliklerinde bir artış olacağı bilinmektedir [23]. Ayrıca numunelere uygulanan bilyeleme işlemi de mukavemeti arttırmıştır. Çalışmamızda atmosfer kontrollü ortamda 1250°C de 1 saat sinterlenmiş numunelerde 711,79 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Ergül ve diğerleri 10⁻³ mbar vakum altında sinterledikleri numunelerde ancak 10 saat sinterleme sonucunda 704 MPa çekme dayanımı elde edebilmişlerdir.

Çalışmamız literatürle karşılaştırıldığında düşük vakum altında sinterleme yerine atmosfer kontrollü ortamda sinterlemenin daha yüksek çekme dayanımı elde etmede etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışmada Ti-6Al-4V numunelerden elde edilen sonuçların MPIF 35 standardına uygun olduğu (Tablo 7) ve sinterleme süresinin gereğinden fazla tutulması ile çekme dayanımının düştüğü tespit edilmiştir.

3.1 Kalıplama Parametrelerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Molding Parameters)

Toz enjeksiyon kalıplamada istenilen özelliklerde bir ürün elde edebilmek için, besleme stokunun doğru hazırlanıp, sinterleme şartlarının ve kalıplama parametrelerinin doğru belirlenmesini gerektirir. Kalıplama parametreleri enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı (debi), ütüleme basıncı ve kalıp sıcaklığı gibi parametrelerdir [24].

Enjeksiyon Basıncı: Bu çalışmada hazırlanan besleme stokundan 1100-1200-1300 bar enjeksiyon

basınçlarında numuneler üretilmiştir. Literatürde, kalıplama esnasında yanlış seçilecek enjeksiyon basıncı, toz bağlayıcı ayrışmasına, kalıpta kayma gerilmesi değerinde artışa ve bunun sonucu olarak da bağlayıcı sistemdeki polimer zincirinde kırılmalar meydana getireceği belirtilmiştir [4, 25]. Karşılaşılabilecek bu durumlar sonucunda numunelerin mekanik özellikleri azalacaktır. Ayrıca besleme stokunun toz yüklemesi oranı enjeksiyon basıncının farklı olmasına neden olmaktadır [21, 26]. Bu çalışmada 1100–1200–1300 bar enjeksiyon basıncı kullanılarak numuneler üretilmiştir. Yüksek enjeksiyon basıncı olan 1300 bar da üretilen numunelerde bağlayıcının ayrışma eğiliminde olduğu görülmüştür (Şekil 5). Çalışmada hacimce %65 Ti-6Al-4V alaşım tozu yüklemeli besleme stoku için 1100 bar en uygun enjeksiyon basıncı olarak belirlenmiştir.

Debi (enjeksiyon hızı): Enjeksiyon hızı yavaş olduğunda da yüzey düzgün olmazken enjeksiyon hızı hızlı olduğunda ise ürünün özellikle kalın bölgelerinde gözenekler oluşmaktadır [27]. Ayrıca besleme stoklarının yüksek debi ve enjeksiyon basınçlarında kalıplanmaları numunelerde toz ve bağlayıcı ayrışmasının oluşmasına da sebep olmaktadır. Eğer enjeksiyon debisi artar ise kalıplanan parçada yüzey gerilmeleri yükselir ve parçada istenilmeyen çarpılmaların oluşmasına neden olur [25]. Bu çalışmada 20–25–30 cm³/s debi kullanılmış üretilen parçalarda çarpılma, yüzey bozukluğu ve gözenek oluşmamıştır. Ancak yüksek debide enjekte edilen numunelerde bağlayıcının numune içerisinde ayrışma eğiliminde olduğu parça üzerinde ortaya çıkan renk değişimi ile tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda numunede bağlayıcı ayrışması eğilimi görülmeden en yüksek çekme dayanımı 20 cm³/s debi değerinde elde edilmesinden dolayı bu değer en uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Enjeksiyon Sıcaklığı: Kalıplama esnasında yüksek enjeksiyon sıcaklığı besleme stokunun taşınabilirliğini artırır ve kalıplama işlemini kolaylaştırır. Ancak yüksek enjeksiyon sıcaklığı kalıplama esnasında daha fazla enerji gereksinimi doğurur ve soğuma zamanını da artırır. Diğer taraftan yüksek enjeksiyon sıcaklığı sonucu oluşan gerilmeler sinterleme sonrası boyutsal değişiminde fazla olmasına neden olur [4]. Bu çalışmada da 140°C'de enjekte edilen Ti-6Al-4V numunelerde boyutsal değişim % 12,85 iken, 160°C'de enjekte edilen numunelerde %15,28 olmuştur.

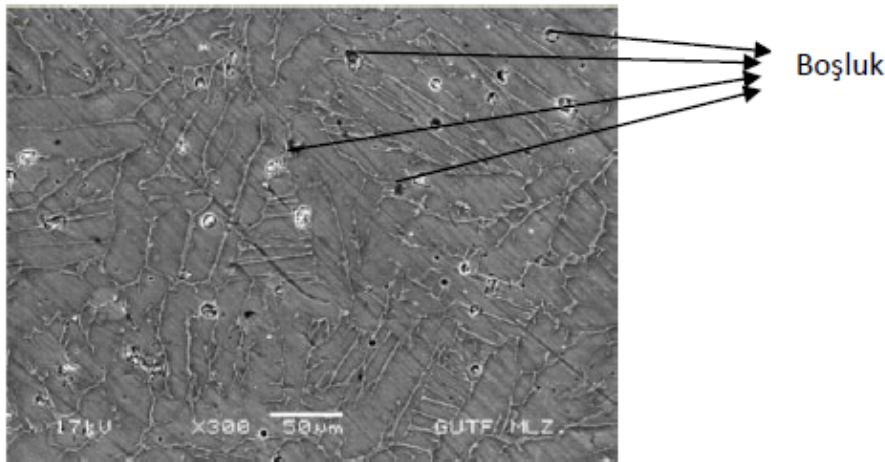
Ütüleme Basıncı: Kalıplama parametrelerinden olan ütüleme basıncının parça üzerindeki etkisi önemlidir. Düşük ütüleme basınçları ham numunede gaz boşluğu ve çökmelere neden olmaktadır. Ütüleme basıncı aşamasında kalıp boşluğuna gönderilmeye çalışılan ilave besleme stoku ile kalıplanan numunede soğuma esnasında görülen ısıl gerilmelerin etkileri ortadan kaldırılır [28]. Ancak ütüleme basıncı değerinin diğer enjeksiyon parametreleri ile ilişkili olarak değerlendirilmesi gereklidir. Örneğin ütüleme basıncının düşük olması ve kalıp sıcaklığının aşırı yüksek olması numunelerde bozulmalara neden olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada 40–50–60°C kalıp sıcaklıkları ve %50–60–70 ütüleme basıncı değerlerinde deneyler yapılmış ve gaz boşluğu, çökme gibi ütüleme basıncından dolayı oluşacak problemlerle karşılaşmamıştır. Taguchi L27 deney tasarımı sonucunda optimum ütüleme basıncı değeri, 60°C kalıp sıcaklığı için enjeksiyon basıncının %60'ı olarak tespit edilmiştir.

Kalıp Sıcaklığı: Kalıplama parametreleri içerisinde parçanın kusursuz olarak elde edilmesini sağlayan bir diğer parametre ise kalıp sıcaklığıdır. TEK'de kalıp sıcaklığının yüksek olması enjeksiyon esnasında karşılaşılan ısı dalgalanmalarını azalttığı için istenilen bir durumdur. Ayrıca kalıp sıcaklığının yüksek olması besleme stokunun reolojik özelliklerine olumlu yönde

etki yapar [29]. Bu çalışmada da besleme stokları ile 40–50–60°C kalıp sıcaklıklarında yapılan deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı değeri 60°C'de elde edilmiştir.

3.2 Sinterleme Parametrelerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Sintering Parameters)

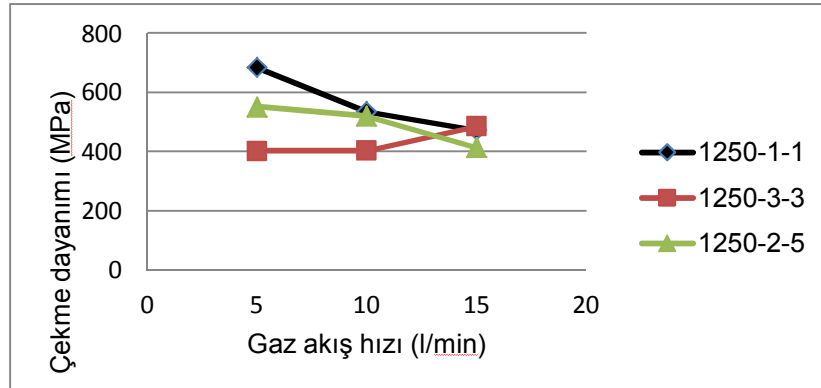
Parçanın mekanik özelliklerine kalıplama parametreleri ile birlikte sinterleme sıcaklığı, süresi, hızı ve ortamı gibi birçok parametre etki yapmaktadır [4]. Literatürdeki sinterleme çalışmalarının temel hedefi sinterleme süresi ve sıcaklığını azaltmaya yöneliktir. Çünkü yüksek sıcaklıklarda yoğunlaşmanın hızı düşer ve tane büyümesinin hızı artar ve oluşan bu yapıya sahip parçanın mekanik özellikleri azalır [30]. Çalışmamızda da 1250-1300-1350°C'lerde yapılan deneyler sonucunda optimum sinterleme sıcaklığı değeri 125°C olarak tespit edilmiş ve en yüksek çekme dayanımı değerleri bu sıcaklıkta elde edilmiştir. Optimum sinterleme sıcaklığı ve süresinde yapılmayan sinterleme süreci parça yoğunluğunda bir düşüşe neden olur. Birleşme aracılığı ile kontrol edilen gözenek büyümesi de gözlemlenir. Daha küçük olan gözeneklerdeki ortam, büyük olanlardan daha fazla çözünürlüğe sahiptir. Bu yüzden yoğunluk uzun sinterleme süreleri ile birlikte azalır [30]. Bu çalışmada da 1–2–3 saat olmak üzere üç farklı sürede parçalar sinterlemiş ve deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı değerleri sinterleme süresi 1 saat olan numunelerde elde edilmiştir. 1350°C'de ve 2 saat sinterlenen numunelerde en düşük çekme dayanımı elde edilmiş ve boşluk miktarının fazla (%5,97) olduğu belirlenmiştir (Şekil 6). Ayrıca yapılan çalışmada sinterleme sıcaklığı 1350°C, sinterleme süresi 3 saat, sinterleme hızı 5°C/min. olan numunelerde %94,09 yoğunluk elde edilmiştir. Literatürde de Ferri ve arkadaşları [18] Ti-6Al-4V besleme stokundan hazırladıkları numuneleri 1250 ve 1350°C'de 2 saat sinterlemişler ve çalışmaları sonucunda 1350°C'de



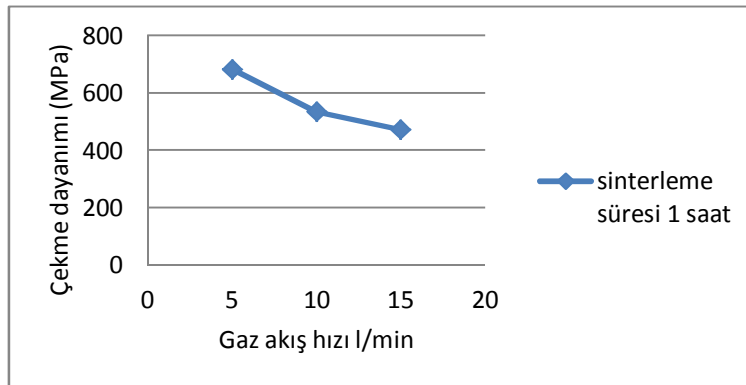
Şekil 6. En düşük çekme dayanımının (134 MPa) ve yoğunluğun (%94,03) elde edildiği numune (The specimen with the minimum tensile strength (134 MPa) and the density (94.03%))

sinterlenen numunelerde %96,4 (%3,6 boşluk), 1250 °C'de sinterlenen numunelerde %96,6 (%3,4) yoğunluk elde etmişlerdir. Thian ve diğerleri [31] ise Ti-6Al-4V+HA besleme stokundan hazırladıkları numuneleri 1100, 1150°C'lerde sinterlemişler ve en yüksek parça yoğunluğuna 1100°C'de (% 49,9), en düşük parça yoğunluğuna ise 1150°C'de (%47,8) ulaşmışlardır. Obasi ve diğerleri [10] yüksek sinterleme sıcaklığı ve uzun sinterleme süresinin parçanın mikroyapısında tane büyümesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada da düşük sıcaklık (1250°C) ve kısa sürede (1 saat) sinterlenen parçalarda en yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir. Sinterleme esnasında ısıtma hızı mikroyapının gelişimini kontrol etmede önemlidir. Düşük sıcaklıklarda yüzey difüzyonu tipik olarak sinterlemeye baskın çıkar. Bu da yoğunlaşma olmadan bağ oluşumunu oluşturur. Yoğunlaşma olmadan bağ oluşumunu elde etmek yapıda irileşme olmadan yüksek yoğunluk elde edilmesini sağlar. Mikroyapıda bu durumun oluşması ısıtma hızı ile yakın ilişki içerisindedir. Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda hızlı ısıtmanın ham parçaya zarar verdiği belirlenmiştir. Hızlı ısıtma sonucunda parçanın köşelerinin düz yüzeylerden daha hızlı ısınmasına sebep olduğu ve bunun sonucunda köşelere yakın yerlerde daha fazla gerilme meydana getirdiği tespit edilmiştir. Parçada oluşacak bu gerilmelerin

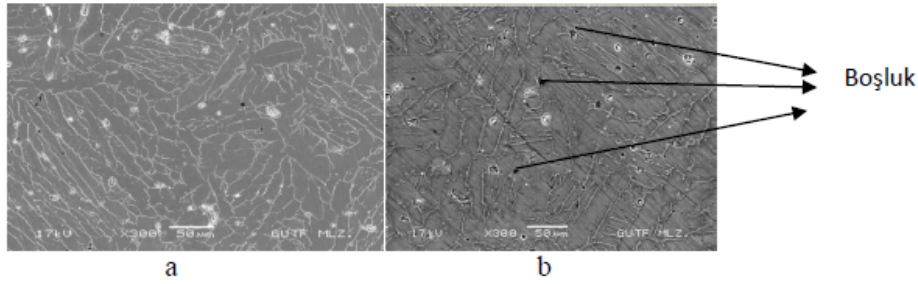
istenilmeyen kusurların (çatlakların vs.) oluşmasına sebep olduğu belirlenmiştir [30]. Thian ve arkadaşları [32] Ti-6Al-4V alaşım tozundan TEK yöntemi ile hazırladıkları numunelerin ısıtma hızı bağlayıcı giderme şartlarını inceledikleri çalışmalarında bağlayıcı sistemin problemsiz bir şekilde uzaklaştırılması için ısıtma hızının düşük tutulması gerektiğini rapor etmişlerdir. Literatürde titanyumun bağlayıcı sistem ile 350°C'nin üstünde tepkimeye girerek titanyum karbür oluşturduğu belirtilmektedir. Ayrıca karbür oluşumunun yanı sıra hızlı bir şekilde bağlayıcının giderilmesi karbon kirliliği, is oluşumu, yüzey hatası veya renk bozukluğuna yol açtığı rapor edilmiştir. Bu sebeplerden dolayı yavaş ısıtma bağlayıcıyı gidermenin en iyi yol olduğu belirtilmiştir [33]. Bu çalışmada da 1-2-3 C/min ısıtma hızlarında deneyler yapılmış ve en yüksek çekme dayanımı değeri 1°C/min ısıtma hızında elde edilmiştir. Çalışmada Ti-6Al-4V besleme stoklarından 1250°C sinterleme sıcaklığında, farklı sinterleme süreleri (1-2-3 saat) ve farklı ısıtma hızlarında (1-3-5°C/min) elde edilen çekme dayanımı sonuçlarına göre sinterleme süresi, ısıtma hızı ve gaz akış miktarı azaldıkça çekme dayanımının arttığı belirlenmiştir (Şekil 7). Ayrıca 1250°C'de, 1 saat ve 1°C/min ısıtma hızında sinterlenen numunelerdeki çekme dayanımlarının gaz akış miktarının azalması ile arttığı tespit edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 7. Ti-6Al-4V numunelerin farklı sinterleme süresi (1-2-3 saat) ve ısıtma hızlarındaki (1-3-5°C/min) çekme dayanımları (Tensile strength of Ti-6Al-4V samples sintered at different sintering times (1-2-3 hours) and heating rates (1-3-5°C/min))



Şekil 8. 1250°C'de, 1 saat ve 1°C/min ısıtma hızında sinterlenen Ti-6Al-4V numunelerin çekme dayanımları (Tensile strength of Ti-6Al-4V samples sintered at 1250°C, 1 hour and heating rate 1°C/min)



Şekil 9. Ti-6Al-4V numunelerin SEM görüntüleri, a) Optimum parametrelerde kalıplanmış ve sinterlenmiş numune (711,79 MPa), b) En düşük çekme dayanımın elde edildiği numune (134,77 MPa) (SEM micrographs of Ti-6Al-4V samples, a) molded and sintered under optimum parameters (711,79 MPa), b) exhibiting minimum tensile strength (134,77 MPa))

Sinterleme atmosferi, sinterleme derecesi ve besleme stokunun kimyasal yapısı ile ilişkilidir. Sinterleme esnasında ortam sabit değildir. Besleme stoku ile birlikte kirleticiler sinterleme fırınına taşınmaktadır. Isıtma esnasında besleme stokunda bulunan kirleticiler fırın atmosferindeki bileşimi değiştirmektedir. Bu yüzden sadece atmosfer türü değil aynı zamanda gazın akış hızı, sinterleme sıcaklığı, tozun türü ve kullanılan bağlayıcı sistem elemanları önemlidir çünkü bu faktörler fırın içinde oluşan ortamın anlık bileşimini belirlemektedir. Sinterleme esnasında ortama gönderilen gazın ortam kirleticilerini uzaklaştırarak temizleyici ve koruyucu görev yapması istenmektedir. Ayrıca sinterleme esnasında ortama gönderilen gazın maliyeti her zaman dikkate alınması gereken bir konudur [30]. Bu nedenlerden dolayı çalışmamızda sinterleme ortamına gönderilecek gaz miktarının optimize edilmesine çalışılmıştır. Deneyler sonucunda Ti-6Al-4V besleme stoku için 10 l/min, gaz akış hızlarında en yüksek çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. En düşük çekme dayanımı değeri ise gaz akış miktarı 15 l/min olan numunelerde elde edilmiş ve bu numunelerde gözenek miktarının daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 9).

3.3 Numunelerin Mikroyapı Değerlendirmesi (The Evaluation of Samples Microstructure)

Numunelerin SEM görüntüleri değerlendirildiğinde $\alpha+\beta$ fazının olduğu görülmektedir. Obasi ve diğerleri [10]. Ti-6Al-4V alaşım tozu kullanarak yaptıkları çalışmada parçaların mikro yapılarında beyaz kısımların β fazı, siyah kısımların ise α fazı olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada da aynı α ve β fazına sahip mikro yapı elde edilmiştir. Deneyler sonucunda düşük çekme dayanımına sahip numunelerde boşluk miktarının fazla olduğu görülmüştür. Boşluk miktarındaki farklılık çekme dayanımı değerleri arasındaki farkı net bir şekilde ortaya koymaktadır (Şekil 8).

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Ti-6Al-4V alaşım tozundan besleme stokları hazırlanmıştır. Bu stoklar kullanılarak TEK yöntemi ile çekme deney numuneleri üretilerek

optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; Ti-6Al-4V besleme stokundan optimum kalıplama ve sinterleme parametrelerinde hazırlanan numunelerde en yüksek 711,79 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Besleme stokunun toz oranına bağlı olarak enjeksiyon basıncının etkilendiği belirlenmiştir. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stoku için 1100 bar en uygun enjeksiyon basıncı olduğu tespit edilmiştir. Ti-6Al-4V besleme stoku için en yüksek çekme dayanımı değerini veren enjeksiyon debisi değerinin 20 cm³/s, ütleme basıncı değerinin enjeksiyon basıncının %60'ı, kalıp sıcaklığı değerinin 60°C olduğu tespit edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı değerine 1250°C'de ve 60 dakika sinterleme süresinde ulaşılmıştır. En yüksek çekme dayanımı değerini elde etmek için sıcaklık artış hızının 1°C/min olması gerektiği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK ve Gazi Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından sırası ile 213M557 ve 07/2011-01 kodlu projeler ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Cui, C., Hu, B., Zhao, L. ve Liu, S., "Titanium Alloy Production Technology, Market Prospects and Industry Development", **Materials & Design**, Cilt 32, No 3, 1684-1691, 2011.
2. German, R.M., **Powder Injection Molding**, Pennsylvania/USA: Metal Powder Industries Federation; 1990.
3. Subaşı, M. ve Karataş, Ç., "Titanyum ve Titanyum Alaşımından Yapılan Implantlar Üzerine İnceleme", **Journal of Polytechnic**, Cilt 15, No 2, 81-97, 2012.
4. Luo, T.G., Qu, X.H., Qin, M.L. ve Ouyang, M.L., "Dimension Precision of Metal Injection Molded Pure Tungsten", **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, Cilt 27, No 3, 615-620, 2009.
5. Yalçın, B. ve Varol, R., "Sinterlenmiş Titanyum Alaşımının Aşınma Performansı ve Bazı

- Mekanik zelliklerinin Belirlenmesi", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 24, No 1, 63-72, 2009.
6. Chen, Lj., Li, T., Li, Ym., He, H. ve Hu, Yh., "Porous Titanium Implants Fabricated by Metal Injection Molding", **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Cilt 19, No 5, 1174-1179, 2009.
 7. German, R., "Progress in Titanium Metal Powder Injection Molding", **Materials**, Cilt 6, No 8, 3641-3662, 2013.
 8. Limberg, W., Ebel, T., Pyczak, F., Oehring, M. ve Schimansky, F.P., "Influence of the Sintering Atmosphere on the Tensile Properties of MIM-Processed Ti 45Al 5Nb 0.2B 0.2C." **Materials Science and Engineering: A**, Cilt 552, 323-329, 2012.
 9. Nor, N.H.M., Muhamad, N., Ihsan, A.K.A.M. ve Jamaludin, K.R., "Sintering Parameter Optimization of Ti-6Al-4V Metal Injection Molding for Highest Strength Using Palm Stearin Binder", **Procedia Engineering**, Cilt 68, 359-364, 2013.
 10. Obasi, G.C., Ferri, O.M., Ebel, T. ve Bormann, R., "Influence of Processing Parameters on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by MIM", **Materials Science and Engineering: A**, Cilt 527, No 16-17, 3929-3935, 2010.
 11. Zhao, D., Chang, K., Ebel, T., Qian, M., Willumeit, R., Yan, M. ve Pyczak, F., "Microstructure and Mechanical Behavior of Metal Injection Molded Ti-Nb Binary Alloys as Biomedical Material", **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, Cilt 28, 171-182, 2013.
 12. Bidaux, J.-E., Closuit, C., Rodriguez-Arbaizar, M. ve Carreño-Morelli, E., "Metal Injection Moulding of Ti-Nb Alloys for Implant Application" **European Cells and Materials**, Cilt 22, No 4, 32, 2011.
 13. Ahn, S., Park, S.J., Lee, S., Atre, S.V. ve German, R.M., "Effect of Powders and Binders on Material Properties and Molding Parameters in Iron and Stainless Steel Powder Injection Molding Process", **Powder Technology**, Cilt 193, No 2, 162-169, 2009.
 14. Karataş, ., Szen, A., Arcaklioglu, E. ve Erguney, S., "Investigation of Mouldability for Feedstocks Used Powder Injection Moulding", **Materials & Design**, Cilt 29, No 9, 1713-1724, 2008.
 15. Setasuwon, P., Bunchavimonchet, A. ve Danchaivijit, S., "The Effects of Binder Components in Wax/Oil Systems for Metal Injection Molding", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 196, No 1-3, 94-100, 2008.
 16. Karataş, ., Koer, A., nal, H.İ., ve Sarıtaş, S., "Rheological Properties of Feedstocks Prepared with Steatite Powder and Polyethylene-based Thermoplastic Binders", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 152, 77-83, 2004.
 17. 50 Ms. "Metal Enjeksiyon Kalıplamada Bağlayıcı Giderme ve Sinterlemede ekme Testi Specimenleri İçin Metot", **Metal Powder Industries Federation**; 1992.
 18. Ferri, O.M., Ebel, T. ve Bormann, R., "Influence of Surface Quality and Porosity on Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V Components Processed by MIM", **Materials Science and Engineering A**, Cilt 527, 1800-1805, 2010.
 19. Karataş, ., **Toz Enjeksiyon Kalıplamada Karışımın Reolojisi**, Doktora Tezi, Gazi Universitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997.
 20. Ferri, O.M., Ebel, T. ve Bormann, R., "High Cycle Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V Fabricated by Metal Injection Moulding Technology", **Materials Science and Engineering: A**, Cilt 504, No 1-2, 107-113, 2009.
 21. Shibo, G., Xuanhui, Q., Xinbo, H., Ting, Z. ve Bohua, D., "Powder Injection Molding of Ti-6Al-4V Alloy", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 173, No 3, 310-314, 2006.
 22. Ergül, E., Glsoy, H.., ve Gnay, V., "Effect of Sintering Parameters on Mechanical Properties of Injection Moulded Ti-6Al-4V Alloys", **Powder Metallurgy**, Cilt 52, No 1, 65-71, 2009.
 23. Qian, M., "Cold Compaction and Sintering of Titanium and Its Alloys for Near-Net-Shape or Preform Fabrication", **International Journal of Powder Metallurgy**, Cilt 46, No 5, 29-44, 2010.
 24. Subaşı M., **Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK) ile Titanyum Para retiminde Kullanılacak Optimum retim Parametrelerinin Araştırılması**, Doktora tezi, Gazi Universtesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
 25. Lee, S.W., Ahn, S., Whang, C.J., Park, S.J., Atre, S.V., Kim, J. ve German, R.M., "Effects of Process Parameters in Plastic, Metal, and Ceramic Injection Molding Processes", **Korea-Australia Rheology Journal**, Cilt 23, No 3, 127-138, 2011.
 26. Sidambe, A.T., Figueroa, I.A., Hamilton, H.G.C., ve Todd, I., "Taguchi Optimization of MIM Titanium Sintering", **International Journal of Powder Metallurgy**, Cilt 47, No 6, 21-17, 2011.
 27. Safarian, A. ve Karataş, ., The Investigation of the Effect of Injection Velocity on Defects Caused in Thick Components Fabricated by Metal Injection Molding, **7th International Powder Metallurgy Conference and Exhibition**, 2014.
 28. Fu, G., Loh, N.H., Tor, S.B., Murakoshi, Y. ve Maeda, R., "Effects of Injection Molding Parameters On The Production Of Microstructures By Micropowder Injection

- Molding", **Materials and Manufacturing Processes**, Cilt 20, No 6, 977-985, 2005.
29. Fang, W., He, X., Zhang, R., Yang, S. ve Qu, X., "The Effects of Filling Patterns on the Powder-Binder Separation in Powder Injection Molding", **Powder Technology**, Cilt 256, 367-376, 2014.
30. German, R.M., **Sintering Theory And Practice**, Wiley, 2014.
31. Thian, E.S., Loh, N.H., Khor, K.A. ve Tor, S.B., "Microstructures and Mechanical Properties of Powder Injection Molded Ti-6Al-4V/HA Powder", **Biomaterials**, Cilt 23, 2927-2938, 2002.
32. Thian, E.S., Loh, N.H., Khor, K.A. ve Tor, S.B., "Effects of Debinding Parameters on Powder Injection Molded Ti-6Al-4V/HA Composite Parts", **Advanced Powder Technology**, Cilt 12, No 3, 361-370, 2001.
33. Sarıtaş, S., Türker, M., ve Durlu, N., **Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri**, Ankara, Uyum Ajans, 2007.

Ek 1. Ti-6Al-4V besleme stoklarından üretilen numunelerin ekme dayanımı sonuçları (The results of tensile strength of specimens produced from Ti-6Al-4V feedstock)

	Debi (cm ³ /s)	Enjeksiyon Basıncı (bar)	tleme Basıncı (%)	Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Hızı (°C/ min)	Gaz Akış Hızı (l/min)	1	2	3	ort	S/N
1	20	1100	50	140	40	1250	1	1	5	674,88	691,21	685,82	683,97	56,699
2	20	1100	50	140	50	1300	2	3	10	296,37	400,96	378,56	358,63	50,865
3	20	1100	50	140	60	1350	3	5	15	317,04	302,95	325,9	315,3	49,963
4	20	1200	60	150	40	1300	2	3	15	438,98	397,23	436,61	424,27	52,525
5	20	1200	60	150	50	1350	3	5	5	204,05	271,35	156,81	210,74	45,835
6	20	1200	60	150	60	1250	1	1	10	500,3	524,57	580,2	535,02	54,518
7	20	1300	70	160	40	1350	3	5	10	217,59	212,4	441,72	290,57	47,922
8	20	1300	70	160	50	1250	1	1	15	431,84	514,94	472,69	473,16	53,433
9	20	1300	70	160	60	1300	2	3	5	284,69	442,94	418,07	381,9	51,124
10	25	1100	60	160	60	1250	2	5	5	485,02	595,23	574,13	551,46	54,725
11	25	1100	60	160	40	1300	3	1	10	376	397,99	550,91	441,63	52,549
12	25	1100	60	160	50	1350	1	3	15	119,63	352,87	182,71	218,4	44,443
13	25	1200	70	140	60	1300	3	1	15	286,69	557,92	381,65	408,75	51,299
14	25	1200	70	140	40	1350	1	3	5	164,86	254,27	284,16	234,43	46,666
15	25	1200	70	140	50	1250	2	5	10	467,83	611,78	480,46	520,02	54,137
16	25	1300	50	150	60	1350	1	3	10	403,27	452,25	357,16	404,23	52,012
17	25	1300	50	150	40	1250	2	5	15	388,85	460,61	392,91	414,12	52,266
18	25	1300	50	150	50	1300	3	1	5	120,87	370,67	179,25	223,6	44,483
19	30	1100	70	150	50	1250	3	3	5	382,19	473,23	350,78	402,07	51,885
20	30	1100	70	150	60	1300	1	5	10	416,08	370,35	308,61	365,01	51,048
21	30	1100	70	150	40	1350	2	1	15	134,77	200,17	158,51	164,48	43,986
22	30	1200	50	160	50	1300	1	5	15	167,02	375,29	211,22	251,18	46,618
23	30	1200	50	160	60	1350	2	1	5	71,95	303,38	232,5	202,61	41,297
24	30	1200	50	160	40	1250	3	3	10	387,17	361,68	460,21	403,02	51,975
25	30	1300	60	140	50	1350	2	1	10	302,16	306,44	336,1	314,9	49,935
26	30	1300	60	140	60	1250	3	3	15	578,63	451,62	425,9	485,38	53,499
27	30	1300	60	140	40	1300	1	5	5	467,82	333,6	524,83	442,08	52,42

