




Investigation on manufacturability of bone plates used in humerus fractures by additive manufacturing method

Mehmet Fatih Aycan 

Department of Mechanical Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- The effect of building direction and preheating in additive manufacturing method
- Determining of ideal production condition
- Investigation of manufacturability of bone plate by additive manufacturing

Keywords:

- Additive manufacturing
- Bone plate
- Building direction
- Preheating
- Mechanical properties

Article Info:

Research Article
Received: 24.02.2018
Accepted: 12.04.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460530

Acknowledgement:

TOBB University of
Economics and Technology
GÖR Group Company

Correspondence:

Author: Mehmet Fatih
Aycan
e-mail:
mfaycan@gazi.edu.tr
phone: 0312 223 75 70

Graphical/Tabular Abstract

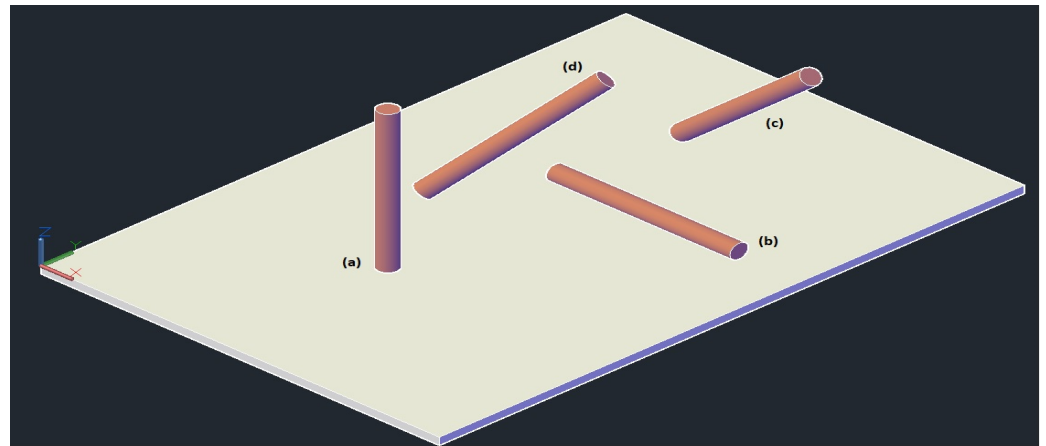


Figure A. Indicating of building direction; (a) Vertical, (b) Horizontal, (c) 1x45, (d) 2x45

Purpose: The aim of this study is to determine the ideal production conditions (building orientation and preheating) for bone plates in additive manufacturing method.

Theory and Methods: The manufacturability of Ti6Al4V titanium alloyed bone plates used in treatment of humerus fractures by DMLS additive manufacturing method was investigated. Samples were manufactured by using same process parameters and heat treated in same conditions after production. The samples were manufactured by using four different building directions (vertical, horizontal, 1x45, 2x45) and two preheating conditions (0°C and 200°C). After production of cylindrical samples, the stress relieving heat treatment processes were done and then they were tested in axial tensile testing and three-point bending testing (statically and dynamically). Determining ideal building direction and preheating condition by using cylindrical samples, the bone plate samples were produced and tested in four-point bending tests statically and dynamically according to the ASTM F382 in order to determine the biomechanical behavior of bone plates.

Results: The orientation of samples in DMLS method did not make a significant effect on mechanical properties but the strength of samples was affected negatively with preheating process. However, it was seen that the ductility and toughness of samples increased via the preheating process. The sample manufactured with preheating in vertical direction had the highest mechanical properties when compared to the other samples. It was decided that the condition of vertical direction with preheating was accepted as an ideal condition according to the test results of cylindrical samples. Thus, the bone plates were manufactured on this condition and heat treated by same process parameters. The bone samples manufactured by additive manufacturing method has sufficient biomechanical properties comparing with conventional production methods.

Conclusion:

It was concluded that the bone plates manufactured by additive manufacturing method had better bending strength and fatigue behavior. They may be an alternative choice for treatments of humerus fractures in clinical applications.



Humerus kırıklarında kullanılan kemik plakalarının eklemeli imalat yöntemi ile üretilebilirliğinin incelenmesi

Mehmet Fatih Aycan*^{ORCID}

Gazi Üniversitesi, Rektörlük, Ankara, 06500, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Mikro Eklemeli imalat yönteminde konumlandırma ve ön ısıtmanın etkisi
- İdeal üretim koşulunun belirlenmesi
- Kemik plakaların eklemeli imalat ile üretilebilirliğinin incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 24.01.2018

Kabul: 12.04.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460530

Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat,
kemik plakası,
konumlandırma,
ön ısıtma, mekanik özellikler

ÖZET

Bu çalışmada humerus kırıklarında kullanılan Ti6Al4V titanyum alaşımı kemik plakaların eklemeli imalat yöntemi ile üretilebilirliği araştırılmıştır. Eklemeli imalat yönteminde ideal üretim koşullarının belirlenmesi amacıyla; konumlandırmanın ve ön ısıtma durumunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. İki parametre haricindeki üretim parametreleri ve üretim sonrasındaki ısıtma uygulamaları tüm deney numuneleri için standart olarak uygulanmıştır. Deney numuneleri dört farklı konumda (dikey, yatay, 1x45, 2x45) ve 200°C sıcaklıkta ön ısıtmalı veya ön ısıtmaz olarak üretilmiş ve belirlenen koşullarda gerilim giderme ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Sonrasında ise eksenel çekme deneyi ile statik ve dinamik (yorulma) olarak üç nokta eğme deneylerine tabi tutulmuştur. Konumlandırma mekanik özellikler üzerinde istatistiksel olarak anlamlı farklar oluşturmazken, ön ısıtma işlemi dayanım değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Ancak, ön ısıtma işlemi sonrasında numunelerin tokluk ve süneklik özelliklerinde genel olarak bir iyileşme olduğu görülmüştür. Mekanik deneyler neticesinde dikey konumda ve ön ısıtmalı olarak üretilen numunelerin diğerlerine göre daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları tespit edilmiştir. Bu nedenle, kemik plakalar dikey konumda ve ön ısıtmalı olarak üretilmiş sonrasında benzer ısıtma uygulamalarından sonra ASTM F382 standardına göre statik ve dinamik olarak dört nokta eğme deneylerine tabi tutulmuştur. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen kemik plakaların sahip oldukları eğilme dayanımı ve yorulma davranışları ile klinik uygulamalar için humerus kırıklarının tedavisinde önemli bir alternatif olabilecekleri ortaya konulmuştur.

Investigation on manufacturability of bone plates used in humerus fractures by additive manufacturing method

H I G H L I G H T S

- The effect of building direction and preheating in additive manufacturing method
- Determining of ideal production condition
- Investigation of manufacturability of bone plate by additive manufacturing

Article Info

Research Article

Received: 24.01.2018

Accepted: 12.04.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460530

Keywords:

Additive manufacturing,
bone plate,
building direction,
preheating,
mechanical properties

ABSTRACT

In this study, the manufacturability of Ti6Al4V titanium alloyed bone plates used in fracture of humerus by additive manufacturing method was surveyed. In order to determine ideal production conditions for additive manufacturing method, the effect of building direction and preheating on mechanical properties was investigated. All the samples were manufactured by using same process parameters and heat treated in same conditions after production. The samples were manufactured on four different building directions (vertical, horizontal, 1x45, 2x45) and two preheating conditions (0°C and 200°C). After the heat treatment process completed for stress relieving, they were tested in axial tensile testing and three-point bending testing statically and dynamically. While, the orientation did not make a significant effect on mechanical properties, the strength of samples was affected negatively with preheating process. However, it was seen that the ductility and toughness of samples increased via the preheating process. The sample manufactured with preheating in vertical direction had the highest mechanical properties when compared to the other samples. Thus, the bone plates were manufactured on this condition and heat treated, then they were tested in four-point bending testing according to the ASTM F382. It was concluded that the bone plates manufactured by additive manufacturing method had better bending strength and fatigue behavior. They may be an alternative choice for fixation treatments of humerus fractures in clinical applications.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: mfaycan@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 223 7570

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kemik plakaları, ortopedi cerrahisinde kırıkların tedavi edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Vücudun günlük hareketleri esnasında kemik dokuda oluşan iç kuvvetlerin oluşturduğu yüklenme koşullarına dayanabilecek mekanik özelliklere sahip olacak şekilde imal edilmesi gereken kemik plakaları, doku içerisinde nörolojik problemlere sebebiyet vermeyecek biçimde biyouyumlu yapıda olmalıdır. Kemik plakaları farklı türdeki malzemelerden imal edilebilmelerine rağmen cerrahi uygulamalarda en yaygın kullanılan malzemelerin paslanmaz çelikler, Co-Cr alaşımları ile titanyum alaşımlarının olduğu görülmektedir [1]. Özellikle titanyum alaşımlarının sahip oldukları yüksek biyouyumluluk, mekanik dayanım ve korozyon direnci ile diğer malzeme türlerine göre daha fazla tercih edildiği görülmektedir [2]. Ti6Al4V titanyum alaşımı, yüksek özgül dayanımı ve korozyon direnci ile uzay havacılık ve medikal endüstrisi başta olmak üzere geniş uygulama alanı bulmaktadır. Diğer yandan, titanyum alaşımları başarılı malzeme özellikleri ile yaygın olarak kullanılırken, diğer malzemelere kıyasla daha yüksek üretim maliyetlerine sahiptir [3]. Kemik plakalarının veya implantların üretimlerinde büyük ölçüde geleneksel üretim yöntemleri olarak da bilinen talaşlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Son on yılda eklemeli imalat yönteminin kişiye özgü üretime müsaade etmesi, ekonomik üretime imkân vermesi ve karmaşık şekilli parçaların üretimlerinde başarılı olması medikal endüstrisinde geniş uygulama alanı bulmasına sebep olmuştur [4]. Medikal endüstrisinde titanyum alaşımlarından medikal ürün imalatında eklemeli imalat yönteminin tercih edilmesinde kişisel ve osseointegratif kafes yapıli implant üretimine imkân vermesi etkili olurken, efektif ham madde kullanımı ile hassas geometrik boyutların elde edilmesi de bu yöntemin yaygınlaşmasında önemli rol oynamıştır [5-7]. Eklemeli imalat yönteminin sağlık uygulamalarında kullanımı; cerrahi operasyon sürelerinin kısaltılması, implant reddinin asgari seviyeye indirilmesi, vakalarda daha ergonomik ve estetik sonuçların elde edilmesi noktasında uygulayıcılara büyük kolaylık sağlamaktadır [8]. Eklemeli imalat yönteminde üretimi gerçekleştirilen ürünlerin dayanım ve mikroyapı özellikleri, üretim esnasında kullanılan üretim parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı ve üretim konumu gibi üretim parametreleri, ürünün mekanik ve metalografik özellikleri başta olmak üzere birçok malzeme özelliği üzerinde etkili olmaktadır [9, 10]. Eklemeli imalat üretim yöntemlerinin geleneksel üretim yöntemlerine göre belirli üstünlüklerinin olmasının yanında; üretim süreçlerinden kaynaklanan kalıntı ısı gerilmelerin oluşumunun engellenememesi eklemeli imalat yöntemi için dezavantaj oluşturmaktadır [11]. Üretim esnasında yüksek bölgesel ısı girdileri ve hızlı soğuma değişimleri malzeme içerisinde geniş ısıl gradyanların oluşmasına neden olurken, bu gradyanlar ise ısı gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Ürünün tasarım ve üretim sürecinde söz konusu kalıntı gerilmelerin oluşabileceğine dikkat edilmediğinde nihai ürünün hatalı olması kaçınılmazdır [12]. Üretim

tamamlanmasından sonra istenen mekanik ve metalografik özelliklerin elde edilebilmesi için kalıntı gerilmelerin giderilmesi amacıyla bazı ısı işleme süreçlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir [11]. Bunun yanında üretim öncesinde ise uygulanacak ön ısıtma işlemi ile ısı gerilmelerin azaltılması veya yok edilmesinin mümkün olduğu ortaya konulmuştur [13]. Ürünün konumlandırıldığı platformun belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması şeklinde gerçekleştirilen ön ısıtma işleminin, soğuma hızını kısmen azaltması nedeniyle ısıl gradyanların oluşmasını azalttığı tespit edilmiştir [11]. Kemik plakalarının vücut içerisinde farklı yüklenme koşullarına maruz kaldığı dikkate alındığında; kullanılan malzemenin özelliklerinin istenen düzeyde olması ve oluşan iç kuvvetlere karşı kararlılığını muhafaza etmesi büyük önem arz etmektedir [14, 15]. Bu nedenle, plakaların mekanik özelliklerinin doğru biçimde belirlenmesi ve uygun biçimde yerine tespit edilmesi operasyonun başarısı için kaçınılmazdır. Plakaların özellikle eğme, çekme ve yorulma dayanımlarının bilinmesi ve uygulamanın bu çerçevede gerçekleştirilmesi cerrahi operasyonun uzun vadedeki başarısını belirleyecektir. Eğme veya çekme yükü altındaki plakalarda oluşan çatlak oluşması ve ilerlemesi plakanın yorulma dayanımını doğrudan etkilemektedir [14]. Vücudun farklı bölgelerinde farklı yüklenme bileşenlerinin oluşmasından dolayı kemik plakaların ön görülen bölge için tasarlanması, uygun malzeme seçimi ve üretim yöntemi kullanılarak üretilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada farklı üretim konumlarında ve ön ısıtma durumlarında üretilen silindirik çubukların eğme, çekme ve yorulma dayanımları belirlenerek ideal eklemeli imalat koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Buna bağlı olarak belirlenen üretim koşullarında Ti6Al4V titanyum alaşımından üretilmesi öngörülen humerus kırıklarının tedavisinde kullanılan kemik plakalarının eklemeli imalat yöntemi ile üretilebilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Silindirik Numunelerin Üretilmesi (Manufacturing of Cylindrical Samples)

Üretim konumunun mekanik özellikler üzerindeki etkisinin gözlemlenmesi amacıyla Ti6Al4V titanyum alaşımından imal edilen silindirik çubuklar kullanılmıştır. 8 mm dış çap ve 50 mm uzunluğa sahip numuneler eklemeli imalat yöntemlerinden DMLS (Direct Metal Laser Sintering) yöntemi ile üretilmiştir. Söz konusu çubukların üretilmesinde Tablo 1'de verilen üretim parametreleri kullanılırken, her bir numune aynı üretim parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Üretim parametrelerinden sadece üretim konumu değiştirilmiştir. Diğer üretim parametrelerinin sabit tutulmasıyla konumlandırmanın mekanik özellikler üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Deney numuneleri; 1x45, 2x45, yatay ve dikey olmak üzere dört farklı konumda üretilmiştir. Numuneler, platform ile paralel olarak konumlandırıldığında; yatay, platform ile 45°'lik açı yaptığında; 1x45, zemin ile yaptığı 45°'lik açıya ilave olarak dik eksene göre 45° döndürüldüğünde; 2x45 ve zemine dik

olarak konumlandırıldığında ise dikey olarak tanımlanmıştır. Numune konumlandırılmalarının üç boyutlu eksen üzerindeki gösterimi Şekil 1’de gösterilmiştir. Bunun yanında numuneler, ön ısıtmanın etkisinin gözlemlenmesi amacıyla ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız olarak iki farklı durumda üretilmiştir. Ön ısıtma işlemi 200°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin, üretim konumu ve ön ısıtma durumları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen numune tanımlaması Tablo 2’de verilmiştir. Numunelerin tamamı, gerilim giderme amacıyla belirlenen koşullarda ısıtma işlemi uygulamasına tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen ısıtma işlemi uygulamasında; numuneler 925°C – 955°C sıcaklık aralığında bir değere kadar atmosfer korumalı bir ortamda ısıtılmıştır. Sonrasında 760°C’ye kadar 56°C/h soğutma hızından daha düşük bir hızda soğutulurken, bu sıcaklıktan 480°C sıcaklığına kadar en az 370°C/h soğutma hızında soğutulmuştur. Son olarak, numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılarak süreç tamamlanmıştır. Her bir numune için aynı ısıtma işlemi süreci gerçekleştirildiğinden, ısıtma işlemi uygulamasının mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmemiştir. Isıtma işlemi uygulamasından sonra numuneler statik ve dinamik olarak deneylere tabi tutulmuştur.

Tablo 1. Kullanılan üretim parametreleri
(Used production parameters)

Parametre	Lazer gücü W	Tarama hızı mm/s	Tarama aralığı μm	Katman kalınlığı μm	İşin çapı μm
Değer	170	1,25	100	30	80

2.2. Silindirik Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

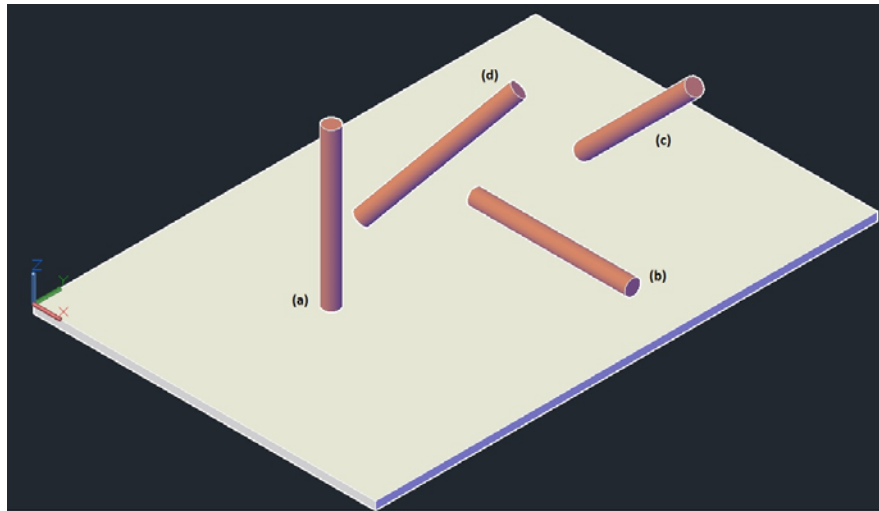
(Determination of Mechanical Properties of Cylindrical Samples)

Üretim konumu ve ön ısıtma işlemi haricinde aynı üretim parametreleri kullanılarak üretilen deney numuneleri; eksenel çekme deneyi ile statik ve dinamik olarak üç nokta

eğme deneylerine tabi tutulmuştur. Eksenel çekme ve üç nokta eğme deneylerinin genel görünüşleri sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3’te verilmiştir. Üç nokta eğme (statik) ve eksenel çekme deneyleri hız kontrollü olarak 5 m/s’lik durağan hızda, beşer deney numunesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında yük-yer değiştirme eğrileri elde edilirken ulaşılan en yüksek yük değeri eğme veya çekme dayanım değeri olarak kabul edilmiştir. Statik olarak gerçekleştirilen deneyler sonunda ortalama yük değerleri, yer değiştirme değerleri ve bunlara ait standart sapma değerleri elde edilmiştir. Bunun yanında üç nokta eğme deney cihazı kullanılarak, deney numuneleri yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Yorulma deneyleri, statik koşullarda gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyinde elde edilen eğme yükleri yardımıyla belirlenen yükleme koşullarında; yük kontrollü olarak $R=0,1$ yük oranı ve 5 Hz frekansta beşer deney numunesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler, deney numunelerinin özelliğine göre 1,5 kN ile 5,0 kN aralığında 11 farklı yükleme koşulunda, deney numunesi 1.000.000 çevrime ulaşana veya kırılana kadar devam etmiştir. Belirlenen çevrim sayısına ulaşan numuneler başarılı, diğerleri ise başarısız olarak kabul edilmiştir. Statik olarak gerçekleştirilen deneyler sonunda elde edilen sonuçların tamamının birbiri içerisinde bilimsel olarak anlamlı veya anlamsız olduğunun belirlenmesi amacıyla Student T test analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Deney numunelerinin konum ve ön ısıtma durumuna göre tanımlanması
(Defining of samples with regard to the building direction and preheating)

Kodlama	Konum	Ön ısıtma
N000Y	Yatay	Yok
N145Y	1x45	Yok
N245Y	2x45	Yok
N090Y	Dikey	Yok
N000V	Yatay	Var
N145V	1x45	Var
N245V	2x45	Var
N090V	Dikey	Var



Şekil 1. Üretim konumlarının gösterimi a) Dikey b) Yatay c) 1x45 d) 2x45
(Indicating of building direction (a) Vertical (b) Horizontal (c) 1x45 (d) 2x45)



Şekil 2. Silindirik deney numunelerinin aksel çekme deneyinde gösterimi
(Indicating of cylindrical samples on axial tensile testing)



Şekil 3. Silindir deney numunelerinin üç nokta eğme deneyinde gösterimi
(Indicating of cylindrical samples on three-point testing)

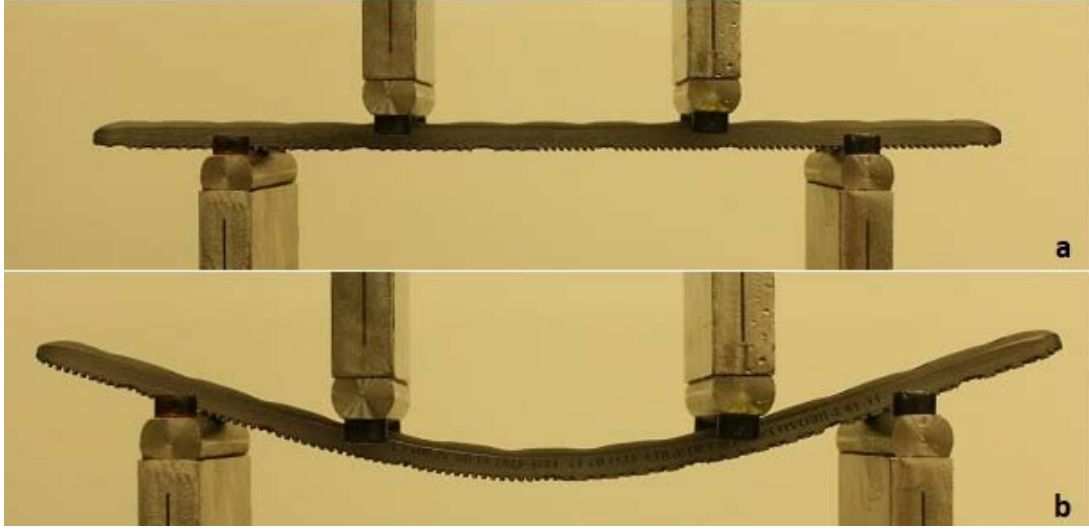
2.3. Kemik Plakalarının Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

(Manufacturing of Bone Plates and Investigation of Their Mechanical Properties)

Ekleme yöntemi ile kemik plakası üretimi için ideal üretim koşullarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerin tamamlanmasının ardından, belirlenen koşullarda kemik plakası üretimleri gerçekleştirilmiştir. Humerus kemiğinin sabitlemesinde kullanılan 12 delikli kemik plakaları DMLS yöntemiyle dik konumda ön ısıtılmış olarak üretilmiş ve gerekli ısıtma işlem süreçlerinin tamamlanmasından sonra ASTM F382 standardının ilgili bölümlerine göre statik ve dinamik olarak dört nokta eğme deneylerine tabi tutulmuştur [16]. Dört nokta eğme deneyleri, 60 mm destek açıklığı ve 30 mm yüklemeye destek açıklığında 10 mm çapında destek silindireleri kullanılarak tamamlanmıştır. Statik olarak gerçekleştirilen dört nokta eğme deneyi, 5 mm/min durağan hızda ve hız kontrollü olarak, 4 numune kullanılarak yapılmıştır. Yorulma deneyleri ise 5Hz frekans değerinde ve R=0,10 yük oranında (sinüzoidal yüklemeye koşulunda) 5 farklı yük değeri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Statik olarak gerçekleştirilen dört nokta eğme deneyi sonunda numunelerin eğilme moment değerleri elde edilirken, bu değerler yorulma deneylerinde yüklemeye koşullarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Üretimleri gerçekleştirilen kemik plakalarının deney cihazı üzerindeki ve yorulma deneyi sonundaki kırılmış görünümü sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSION)

İdeal deney koşullarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen aksel çekme deneyleri ve statik olarak gerçekleştirilen üç nokta eğme deneylerinde elde edilen yük değerleri, yer değiştirme değerleri ve bunlara ilişkin standart sapma değerleri sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. Farklı yüklemeye durumlarında elde edilen yorulma davranışları ise Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda; 1.000.000 çevrime dayanabilen deney numuneleri başarılı olarak belirtilirken, diğerlerinin ise kırıldığı andaki çevrim sayısı verilmiştir. Bunun yanında, elde edilen yük dağılımlarının birbirlerine göre istatistiksel olarak anlamlı olup olmadıklarının belirlenmesi için gerçekleştirilen Student T test analizleri sonucunda elde edilen p değerleri tablolar halinde düzenlenmiştir. Aksel çekme deney sonuçları için hesaplanan değerler Tablo 6'da, statik olarak gerçekleştirilen eğme deneyi sonuçları için hesaplanan değerler ise Tablo 7'de verilmiştir. Elde edilen p değerleri 0,05'ten küçük olduğunda; dağılımlar istatistiksel olarak anlamlı kabul edilirken, büyük olanlar anlamsız olarak kabul edilmektedir. Diğer yandan, silindirik deney numuneleri ile aynı koşullarda üretilen kemik plakaları; statik ve dinamik olarak dört nokta eğme deneylerine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar ilgili şekil ve tabloda gösterilmiştir. Kemik plakaların deneyleri ASTM F382 standardına göre gerçekleştirildiğinden deney numunelerinin eğilme dayanım değerleri incelenmiştir. Statik olarak gerçekleştirilen



Şekil 4. Kemik plakasının dört nokta eğme deneyinde gösterimi; deneyden önce a) ve sonra b)
(Indicating of bone plate on four-point testing; before (a) and after (b) the test)



Şekil 5. Kemik plakasının yorulma deneyi sonrası görünümü
(Indicating of bone plate after fatigue testing)

Tablo 3. Eksenel çekme deneyi sonuçları (The results of axial tensile testing)

	N000Y		N145Y		N245Y		N090Y	
	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma
Yük (kN)	16,424	0,442	16,066	0,474	15,136	0,479	17,464	0,456
Yer Değiştirme (mm)	1,493	0,145	1,541	0,157	1,287	0,126	1,631	0,099

	N000V		N145V		N245V		N090V	
	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma
Yük (kN)	16,230	0,712	15,667	0,373	15,824	0,587	15,507	2,761
Yer Değiştirme (mm)	2,318	0,349	2,055	0,124	2,605	0,175	2,761	0,439

Tablo 4. Üç nokta eğme deneyi (statik) sonuçları (The results of three point bending testing (statically))

	N000Y		N145Y		N245Y		N090Y	
	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma
Yük (kN)	18,249	0,491	18,052	0,533	17,200	0,545	19,191	0,501
Yer Değiştirme (mm)	2,986	0,289	3,145	0,321	2,682	0,263	3,197	0,195

	N000V		N145V		N245V		N090V	
	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma	Değer	Std Sapma
Yük (kN)	17,835	0,782	17,604	0,419	17,982	0,667	17,230	0,648
Yer Değiştirme (mm)	4,545	0,685	4,193	0,253	5,426	0,365	5,522	0,878

deneylerde elde edilen eğilme dayanım ile eğilme dayanıklılık değerleri ve bunlara ait ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 8’de, dinamik olarak gerçekleştirilen deneylerde elde edilen yorulma davranışı ise Şekil 6’da

verilmiştir. Kemik plakalar belirlenen ideal koşullarda üretildiklerinden herhangi bir ilave istatistiksel analiz yapılmasına gerek duyulmamıştır. Bu çalışmanın ilk aşamasında; daha sonra üretilmesi öngörülen kemik

Tablo 5. Yorulma deneyi sonuçları (The results of fatigue testing)

	N000Y	N145Y	N245Y	N090Y	N000V	N145V	N245V	N090V
1,5						Başarılı		
1,9						Başarılı		
2					Başarılı	815.258	Başarılı	
2,5					Başarılı		Başarılı	
2,8					446.465		170.600	
3	Başarılı	Başarılı	Başarılı	Başarılı	124.715	325.630	144.394	Başarılı
3,35	Başarılı	Başarılı	127.859					172.493
3,5	122.789	182.832	155.353	Başarılı				132.154
3,8				208.866				
4	43.042	76.629	87.256	116.931				47.647
5	41.058	37.958	63.190	65.701	30.875	32.494	61.090	25.126

Tablo 6. Eksenel çekme deneyi sonucunda elde edilen dağılımlara ilişkin hesaplanan p değerleri (p values for strength distributions determined after axial tensile testing)

	N145Y	N245Y	N090Y	N000V	N145V	N245V	N090V
N000Y	0,041	0,009	0,009	0,514			
N145Y		0,025	0,005		0,035		
N245Y			0,002			0,010	
N090Y							0,001
N000V					0,205	0,270	0,206
N145V						0,455	0,490
N245V							0,330

Tablo 7. Üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen dağılımlara ilişkin hesaplanan p değerleri (p values for strength distributions determined after three-point bending testing)

	N145Y	N245Y	N090Y	N000V	N145V	N245V	N090V
N000Y	0,217	0,028	0,017	0,239			
N145Y		0,047	0,002		0,035		
N245Y			0,001			0,010	
N090Y							0,002
N000V					0,604	0,698	0,317
N145V						0,155	0,187
N245V							0,079

plakaları için ideal üretim koşullarının belirlenmesi amacıyla farklı üretim konumlarında ve ön ısıtma koşullarında silindirik deney numuneleri üretilmiş ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Üretimleri gerçekleştirilen silindirik numuneler, DMLS yöntemi ile aynı üretim parametreleri kullanılarak üretildikten sonra belirlenen aynı ısıl işlem koşullarında gerilim giderme işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla eksenel çekme, üç nokta eğme ve yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada üretim konumunun ve ön ısıtma işleminin numunelerin mekanik özelliklerine olan etkisi incelenerek, ideal üretim koşulları tespit edilmeye çalışılmıştır. Dört farklı konumda üretilen silindirik numuneler ön ısıtma ve ön ısıtmazsız durumlarda deneylere tabi tutulmuştur. Eksenel çekme ile üç nokta eğme deneyleri sonunda elde edilen yük değerlerinin birbiri ile tutarlı olduğu belirlenmiştir. Deneylerde ulaşılan en yüksek yük değeri ile bu değere karşılık gelen numunedeki yer değiştirme değerleri ilgili tablolarda verilmiştir. Ön ısıtma olmayan durumda dikey olarak yerleştirilen N090Y numunesinin

eksenel çekme ve eğme deneylerinde en yüksek yük değerine sahip olduğu belirlenirken, bu numuneyi yataya paralel olarak üretilen N000Y numunesi, yatayla 45°'lik açı oluşturan N145Y numunesi ve iki eksenle 45°'lik açı oluşturan N245Y numunesinin izlediği belirlenmiştir. Numunelerin dayanım değerlerinin her iki deney için de istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan, ön ısıtma durumunda da konumlandırma durumu ile benzer şekilde eksenel çekme ile eğme deneyi sonunda yük değerlerinin birbiri ile tutarlı olduğu görülürken; en yüksek yük değerinin N000V numunesinde, en yüksek yük değerinin ise N090V numunesinde olduğu görülmektedir. Ancak, ön ısıtma durumunda elde edilen yük değerleri incelendiğinde; farklı üretim konumlarında yük değeri dağılımlarının istatistiksel olarak anlamlı olmadığı tespit edilmiştir. Bunun yanında, her bir konum için ön ısıtma işlemi öncesi ve sonrasında elde edilen dağılımların kendi içinde anlamlı olup olmadığı incelendiğinde ise; yatay konumda üretilen numuneler haricindekilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda yük

değerlerine ve dağılımların birbirlerine göre durumlarına bakıldığında aksel ve çekme deneyleri sonunda ideal üretim konumunun dikey konum olduğu görülmektedir. Dikey konumda üretilen numunelerde aksel kesit alanı diğer konumlardaki kesit alanından daha küçük olması, üretim esnasında katmanların daha iyi sinterlemeye tabi olmasına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle eğilme yükü altında avantaj sağlamaktadır. Kesit alanının geniş olması ısıl gradyanların daha geniş alanda etkili olmasına neden olacağından numunenin mekanik özelliklerinin azalmasına etkili olmaktadır. Açılı üretimlerde ise oluşan basamak etkisi yüzey kalitesini olumsuz etkilediğinden numunelerin karşı koyabileceği yük seviyesi düşmektedir [17]. Girardin vd. [18], üretim konumunun DMLS yöntemi ile üretilen Co-Cr-Mo numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. 90°'lik açı oluşturan numunenin en yüksek dayanım değerlerine sahip olduğunu tespit etmelerine rağmen, 0° ve 45°'lik açı ile üretilen numunelere ait dayanım değerleri arasında anlamlı farkların olmadığını ortaya koymuştur. Farklı konumlarda üretilen numunelerin birbirlerine yakın yer değiştirme değerlerine sahip olmalarının yanında; yer değiştirme değerlerinin dayanım değerleri ile paralellik göstermediği görülmektedir. Diğer yandan ön ısıtma işlemi ile birlikte yer değiştirme değerlerinin belirgin biçimde artış gösterdiği görülmektedir. Yer değiştirme değerlerindeki belirgin artış; numunelerin gerçekleştirilen ön ısıtma işlemi ile tokluk ve süneklik özelliklerinin artması ile açıklanabilir. Birçok araştırmacı ön ısıtma işleminin malzemede kalıntı gerilmelerin giderilmesinde oldukça etkili olduğunu ve bunun üretim sonrası bir tavlama ısıl işlemi gibi etki ettiğini ortaya koymuştur [11, 13]. Ali vd. [11], Ti6Al4V için platform sıcaklığının faz dönüşüm sıcakları altında ise ön ısıtma işleminin mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisini olmadığını tespit ederken, artan ön ısıtma sıcaklığı ile birlikte malzemede uzama değerlerinin artış gösterme eğilimi içerisinde olduğunu ortaya koymuştur. Süneklik ve gevreklik, doğrudan soğuma hızına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yüksek soğuma hızları malzeme içerisinde daha fazla kalıntı gerilmeler oluştururken, aynı zamanda mikro düzeyde yapının da martenzitik hale gelmesine neden olmaktadır. Ön ısıtma ile azaltılan soğuma hızı, yapının nispeten daha sünek hale gelmesinde etkili olmaktadır [11, 19]. Aksel çekme ve üç nokta eğme deneylerinin tamamlanmasının ardından, silindirik numuneler üç nokta eğme deney düzeneği kullanılarak yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Yorulma deneyleri, eğme deneylerinde elde edilen yük değerleri göz önünde bulundurularak belirlenen yükleme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ön ısıtmasız durumda 3 kN yükleme değerinde tüm numunelerin 1.000.000 çevrime dayanabildiği, ancak yükleme değerinin artırılmasına bağlı olarak numunelerin dayanabildikleri çevrim sayıları azalmaya başlamıştır. N090Y numunesinin diğer numunelere göre daha başarılı bir davranışa sahip olduğu belirlenirken, bunun yanında aynı yükleme değerinde diğer numunelere kıyasla daha fazla çevrim sayısına karşı koyabilmesi bunu doğrulamaktadır. Bunun yanında ön ısıtma durumunda numunelere uygulanan yükleme değerleri ön ısıtmasız duruma göre belirgin biçimde azalmış olmasına

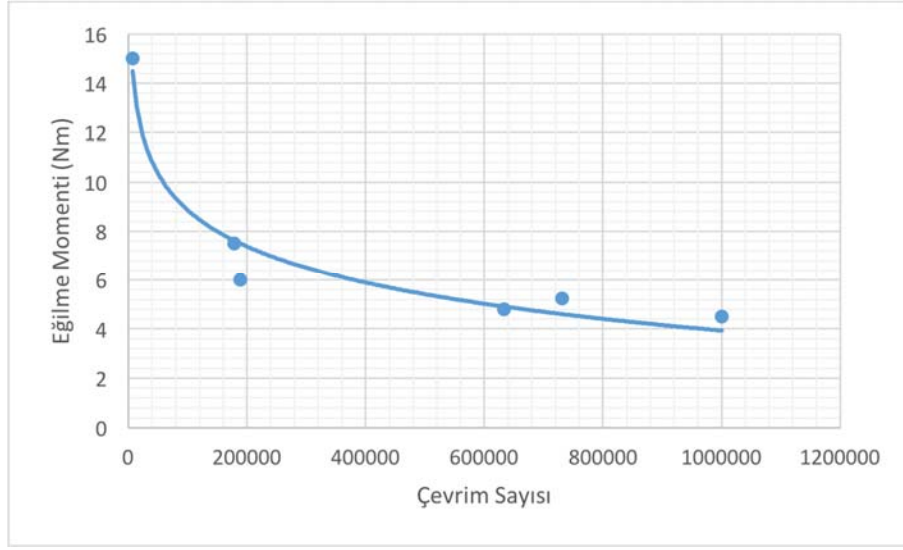
rağmen numunelerin genel yorulma davranışları değişmemiştir. 1,5 kN yükleme değerinde numunelerin tamamı kırılma göstermezken, bu değer 2,0 kN'a çıkarıldığında numunelerde kırılma görülmeye başlanmıştır. Benzer şekilde N090V numunesi 3 kN yükleme değerinde diğer numuneler kırılırken 1.000.000 çevrim sayısını geçmeyi başarmıştır. Numunelerin tamamı aynı yükleme değerinde deney tabi tutulduğunda; en yüksek çevrim sayısına N245V numunesinin sahip olduğu belirlenmiştir. Ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız durumlar için belirlenen aynı yükleme değerinde gerçekleştirilen deneyler sonunda; ön ısıtmasız durumda üretilen numunelerin diğerlerine göre daha düşük çevrim sayılarında kırıldıkları fakat her iki durum arasında belirgin farkların olmadığı belirlenmiştir. Brendl vd. [19] çalışmalarında; konumlandırmanın mikroyapı, yorulma dayanımı ve yorulma davranışına etkisini incelemiştir. 90°'de üretilen numunelerin en yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu belirlenirken, yorulma dayanım değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca ön ısıtma işlemi ile birlikte numunelerin ulaştıkları en yüksek çevrim sayılarında azalma eğilimi olduğu da ortaya konulmuştur. DMLS yöntemiyle üretilen Ti6Al4V numunelerin kırılma mekanizmasının belirlenmesi ile ilgili olarak yorulma deneylerine tabi tutulmuş ve konumlandırmanın yorulma kırığının ilerlemesi noktasında belirgin bir etkisinin olmadığı ortaya konulmuştur [10]. Farklı konumlarda üretilen silindirik numunelerin aksel çekme, üç nokta eğme ve yorulma deneyleri neticesinde genel olarak benzer davranışlar sergiledikleri görülmektedir. Dikey olarak üretilen numunelerin diğerlerine göre daha iyi sonuçlara sahip olmasına rağmen, değerler arasında genel olarak anlamlı farkların olmadığı görülmüştür. Geçmişte gerçekleştirilen çalışmalarda eğilme davranışı ile yorulma davranışının büyük ölçüde birbiri ile paralellik gösterdiği, ayrıca yorulma dayanıklılık sınırı ve çekme dayanımının yapılan istatistiksel analizler sonucunda birbiri ile önemli ölçüde korelasyona sahip oldukları ortaya konmuştur [19].

Tablo 8. Kemik plakalarının dört nokta eğme deney sonuçları

(The four point bending testing results of bone plates)

	Eğilme Dayanımı (Nm)	Eğilme Dayanıklılığı, K (N/mm)
	21,93	324,82
	22,79	308,18
	21,03	303,4
	22,62	333,55
Ortalama	22,09	317,49
Standart Sapma	0,80	14,11

Farklı konumlarda ve ön ısıtma durumlarında üretilen silindirik numunelerin deneylerinden sonra dikey ve ön ısıtmalı durum ideal üretim koşulu olarak belirlenmiş ve humerus kırıklarının tedavisinde kullanılan kemik plakaları bu koşullarda üretilmiştir. Üretilen plakalar ilgili ısıl işlem süreçlerinden sonra ASTM F382 standardına göre statik ve



Şekil 6. Kemik plakalarının yorulma davranışı (Fatigue behavior of bone plates)

dinamik olarak dört nokta eğme deneylerine tabi tutulmuştur. Statik olarak gerçekleştirilen eğme deneyleri sonunda kemik plakalarının eğilme dayanımlarının ortalaması, 0,80 standart sapma ile 22,09 Nm olarak, eğilme dayanıklılığı ise 14,11 standart sapma ile 317,49 N/mm olarak tespit edilmiştir. Üretilen 12 delikli numunelerin ortalama eğilme dayanımının aynı malzemeden ve aynı üretim yöntemi kullanılarak üretilen 8 delikli kemik plakaların dört nokta eğme deneyleri sonundaki eğilme dayanımından (14,38 Nm) daha yüksek olması; belirlenen üretim koşullarında başarılı sonuçlar alınabileceğini göstermiştir [14]. Ayrıca aynı çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile üretilen numunelerin, talaşlı imalat yöntemi ile üretilenlere kıyasla daha yüksek dayanım değerlerine sahip oldukları ortaya konulmuştur. Kemik plakalarda yorulma dayanımı, kemik dokudaki kırığın iyileşme süreci ile yakından ilişkilidir. Kemik doku ortalama yaklaşık olarak 3 ila 4 ay arasında tam olarak iyileşme göstermektedir. Kemik dokunun günlük ortalama 5000 ila 14000 çevrime maruz kaldığı dikkate alınır, iyileşme süreci içerisinde 0,5 ila 1,6 milyon çevrime maruz kalacağı öngörülmektedir [14, 15]. Yorulma deneyleri sonunda kemik plakaların 4,5 Nm yükleme değerinin altındaki koşullarda herhangi bir kırılma durumu ile karşılaşmayacağı belirlenmiştir. Bu koşullarda 4,5 Nm yükleme durumu plakaların yorulma dayanıklılık sınırı olarak kabul edilebilir. Kemik plakaların sahip oldukları yorulma davranışı ile klinik olarak kullanılabileceği görülmektedir. Bunun yanında yorulma deneyi sonrasında kemik plakaların beklendiği gibi orta noktaya yakın delik çevrelerinden kırıldıkları belirlenmiştir. Deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonunda 6 ve 10 delikli plakaların orta noktaya yakın iki delikten birine yakın biçimde kırıldıkları tespit edilmiştir [20]. Humerus kırıklarının tedavisinde kullanılması planlanan kemik plakaların, eğilme dayanımları ve yorulma davranışları göz önüne alındığında, geleneksel üretim yöntemi ile üretilen kemik plakalarına iyi bir alternatif olabileceği ve cerrahi operasyonlarda başarılı olacağı öngörülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Gerçekleştirilen aksenal çekme, üç nokta eğme ve yorulma deneyleri sonunda; dikey konumda üretilen numunelerin en iyi mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiş olmasına rağmen konumlandırmanın mekanik özellikler üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı ortaya konulmuştur. Bunun yanında ön ısıtma işlemi dayanım değerlerini düşürmüş olmasına rağmen, numunelerin tokluk ve süneklik özelliklerini artırmıştır. Dikey konumda ön ısıtmalı olarak üretilen numunenin mekanik başarımından dolayı, ideal üretim koşulu olarak bu seçenek belirlenmiştir. Belirlenen koşullarda üretilen kemik plakaların eğme ve yorulma başarımlarının istenen düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Deney numunelerinin üretilmesi ve ısıl işlem süreçlerini gerçekleştiren GÖR Grup firmasına ve mekanik deneylerin yapılmasında destek olan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Benli, S., Aksoy, S., Havıtcıoğlu, H. ve Küçük, M., Evaluation of bone plate with low-stiffness material in terms of stress distribution. *Journal of Biomechanics*, 41, 3229-3235, 2008.
2. Ganesh, V., Ramakrishna, K. ve Ghista, D., Biomechanics of bone-fracture fixation by stiffness-graded plates in comparison with stainless-steel plates. *BioMedical Engineering*, 4, 46, 2005.
3. Dutta, B. ve Froes, F., The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys. *Metal Powder Report*, 72 (2), 96-106, 2017.

4. Wycisk, E., Solbach, A., Siddique, S., Herzog, D., Walther, F. ve Emmelmann, C., Effects of Defects in Laser Additive Manufactured Ti-6Al-4V on Fatigue Properties. *Physics Procedia*, 56, 371-378, 2014.
5. Huang, S. H., Peng, L., Mokasdar, A., ve Hou, L., Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *Int J Adv Manuf Technol*, 67, 1191-1203, 2013.
6. Kruth, J., Leu, N., ve Nakagawa, T., Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 47, 525-540, 1998.
7. Popovich, A., Sufiiarov, V., Polozov, I., Borisov, E., ve Masaylo, D., Producing hip implants of titanium alloys by additive manufacturing. *International Journal of Bioprinting*, 2, 78-84, 2016.
8. Salmi, M., Tuomi, J., Paloheimo, K.-S., Björkstrand, R., Paloheimo, M., Salo, J., Kontio, R., Mesimäki, K. ve Mäkitie, Patient-specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 18 (3), 209-214, 2012.
9. Wycisk, E., Emmelmann, C., Siddique, S., ve Walther, F., High Cycle Fatigue (HCF) Performance of Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting. *Advanced Materials Research*, 816-817, 34-139, 2013.
10. Konečná, R., Kunz, L., Bača, A., ve Nicoletto, G., Long fatigue crack growth in Ti6Al4V produced by direct metal laser sintering. *Procedia Engineering*, 160, 69-76, 2016.
11. Ali, H., Ma, L., Ghadbeigi, H., ve Mumtaz, K., In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of Selective Laser Melted Ti6Al4V. *Materials Science & Engineering A*, 95, 211-220, 2017.
12. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J.-P., ve Humbeek, J., Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 177-185, 2012.
13. Mower, T. ve Long, M., Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science & Engineering A*, 651, 198-231, 2016.
14. Xie, P., Ouyang, H., Deng, Y., Yang, Y., Xu, J. ve Huang, W., Comparison of conventional reconstruction plate versus direct metal laser sintering plate: an in vitro mechanical characteristics study. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 12, 128-137, 2017.
15. Aluede, E., McDonald, E., Jergesen, H., Penoyar, T., ve Calvert, K., Mechanical behaviour of low-cost dynamic compression plates correlates with manufacturing quality standards. *Int Orthop.*, 38, 141-147, 2014.
16. ASTM F382, Standard Specification and Test Method for Metallic Bone Plates, ASTM, USA, 2014.
17. Król, M., ve Tomasz, T., Surface Quality Research for Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Alloy. *Arch. Metall. Material*, 61, 945-950, 2016.
18. Girardin, E., Barucca, G., Mengucci, P., Fiori, F., Bassoli, E., Gatto, A., Iuliano, L. ve Rutkowski, B., Biomedical Co-Cr-Mo components produced by Direct Metal Laser Sintering. *Materials Today: Proceedings*, 3, 889-897, 2016.
19. Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., ve Buchbinder, D., Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials and Design*, 34, 159-169, 2012.
20. Shirurkar, A., Tamboli, A., Jagtap, P., Dondapati, S., ve Davidson, J., Mechanical Behavior of ZM21 Magnesium Alloy Locking Plates – An Experimental and Finite Element Study. *Materials Today: Proceedings*, 4 (6), 6728-6736, 2017.