

# Üç Boyutlu Yazıcı ve Tarayıcı ile Hastaya Özel Medikal Ortez Tasarımı ve Geliştirilmesi

Levent AYDIN<sup>1</sup>, Serdar KÜÇÜK<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü,  
Umuttepe Kampüsü, 41380, Kocaeli, Türkiye  
(Geliş/Received : 25.03.2016 ; Kabul/Accepted : 19.10.2016)

## ÖZ

Üç boyutlu (3b) yazıcılar, günümüzde birçok alanda kullanılan ve hızla gelişen bir teknolojidir. Bu çalışmada, öncelikle bir üç boyutlu yazıcı açık kaynak kodlu donanımın geliştirilmesiyle imâl edildi ve açık kaynak kodlu yazılımının iyileştirilmesiyle kontrol edildi. Daha sonra bu üç boyutlu yazıcıyı kullanarak ayak bileği ortezi (ankle foot orthosis, AFO) üretildi.

İnsan yürümesi için son derece önemli olan ayak bileği ortezleri deformasyonları önlemek ve bilek hareketini kontrol etmek için üretilir. Bir AFO genellikle zayıf bacağı korumak, bilek ve ayağı doğru pozisyonda tutmak ve adım atmayı düzeltmek için kullanılır. Son kullanıcı farklı boyutlarda bilek ve farklı tipte deformasyonlara sahip olabileceğinden bir AFO son kullanıcının ayağına tam uygun bir şekilde üretilmelidir. Dolayısıyla seri üretilen AFO'lar her bir son kullanıcı için uygun olmayabilir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda üç boyutlu yazıcılar kişiselleşmiş biyomedikal ekipman üretiminde öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, özel bir AFO öncelikle bir CAD yazılımı ile modellendi ve daha sonra bu model geliştirilen yazıcıyla üretildi. Bu çalışma ülkemiz literatüründe bilinen ve üç boyutlu yazıcı ile üretilen ilk ayak bileği ortezidir. Ayrıca bu çalışma üç boyutlu yazıcılarla biyomedikal malzemelerin daha kısa zamanda ve daha ekonomik bir şekilde üretilebileceğini kanıtlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** 3b Yazıcı, Ayak Bileği Ortezi, Reprap.

## Design and Construction of Ankle Foot Orthosis By Means Of Three Dimensional Printers

### ABSTRACT

Three dimensional (3d) printer technologies are rapidly developing and increasingly being used in several fields. In this study, as a first step a 3d printer is constructed by modifying open source hardware and controlled by improving open source software. Subsequently, an ankle foot orthosis (AFO) is designed and constructed by using this 3d printer.

The ankle foot orthosis, very important for human walking, is designed to control motion of the ankle and prevents deformities. An AFO can generally be used for following purposes: brace weak limbs, grasp ankle and foot in the right position and correct the foot drop. Since the users have different sizes of ankles and different types of deformities, an AFO must be produced to match in size to the end-user. Therefore off-the-shelf AFOs may not suitable for the each end user. Considering these factors, 3d printers are of great importance for producing individualized biomedical equipment. In this study, a distinctive ankle foot orthosis is first modelled by using CAD software and then produced by using constructed 3d printer. This AFO is the first ankle foot orthosis produced by a 3d printer in the literature of our country. This study is a proof that biomedical equipments can be produced in a shorter time and less costly by using 3d printers.

**Keywords:** 3d Printer, Ankle Foot Orthosis, Reprap.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

3b baskı [1], herhangi bir yerden hazır olarak bulunabilen ya da kişisel olarak oluşturulan 3 boyutlu modelin, katı formda çıktısının alındığı işlemdir. Elde edilen bu maddesel çıktı, iki boyutlu (2b) katmanların üst üste sıralanmasıyla oluşmaktadır. 3b baskı, günümüz endüstrisinde de kullanılmakta olan; kesme ve delme yöntemleri ile malzemenin çıkarılmasına dayanan gele-

neksel işleme tekniklerinden farklı kabul edilmektedir [1]. Bunun nedeni 3b baskı teknolojisinin, üretim sürecinde talaş kaldırma yöntemi yerine sadece gerektiği kadar malzemeyi kullanarak gerçekleştirmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 1'de görüldüğü gibi 3b yazıcı, bilgisayar kontrolü altında 3b nesne oluşturabilen bir robot türüdür [2].

3b baskı teknolojisi, 1986'dan bu yana var olmasına rağmen 2010'dan sonra piyasada yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır. 3b yazıcılar, önceleri pahalı ve kullanımı beceri gerektiren cihazlardı [3]. İlk çalışan

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: skucuk@kocaeli.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 1-8

3b yazıcı, Chuck Hull tarafından 1984 yılında oluşturuldu [4]. Özellikle 2010'dan günümüze kadar bu makinelerin satışlarında büyük bir artış olmuş ve bunların fiyatları önemli ölçüde düşmüştür [5].

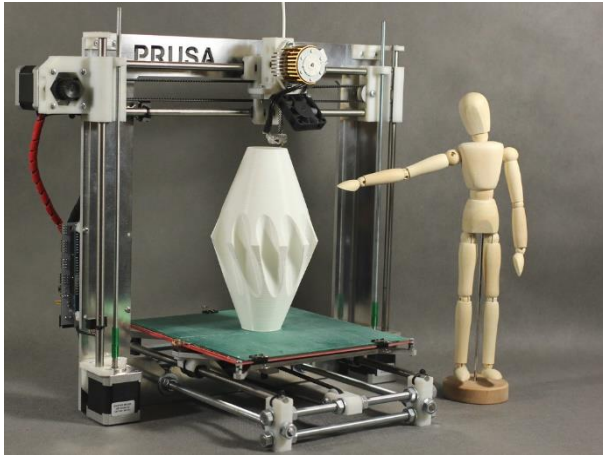
3b yazıcılar, günümüzde hemen hemen bütün 3b modelleme yazılımlarından ortak olarak çıktı alınabilen STL uzantısını kullanmaktadır.

3b baskı teknolojisi, endüstriyel tasarım, mühendislik, mimarlık, askeri, medikal sektörü, biyoteknoloji, moda, gıda ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır [6].

3b baskı teknolojisinde yazdırma işlemi, Erimiş Birikimi Modelleme (FDM), Mürekkep Püskürtmeli (ink-jet), sinterleme (SLS - Seçici Lazer Sinterleme, DLMS - Doğrudan Lazer Metal Sinterleme), Seçici Lazer Ergitme (SLM), Laminalı Nesne İmalatı (LOM) ve benzeri üretim teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir [7].

Açık kaynak kodlu yazıcılar, kendi parçalarını üretebilmektedir [8]. Ayrıca 3b yazıcılar ile tek seferde çalışan mekanik parçaların (el aletleri, İngiliz anahtarları ve iç içe geçmiş olan dişli çarklar gibi) çıktısı da alınabilmektedir [1].

3b yazıcılar, tüketimi azaltarak üretimi arttırmaktadır [9].



Şekil 1. RepRap Prusa (RepRap Prusa) [2]

## 2. TEMEL KAVRAMLAR (BASIC CONCEPTS)

Katkılı üretim terimi, sıralı katmanlar sayesinde 3 boyutlu nesne oluşturma teknolojilerini ifade etmektedir. Eksiltme ile imalat terimi, bir maddenin, malzeme çıkarmaya dayalı olarak işlenmesidir.

Stereolitografi terimi, Charles W. Hull tarafından 1984 yılındaki bir patentinde üç boyutlu nesnelerin, enine kesitler oluşturularak üretilmesine yönelik bir işlem olarak tanımlanmıştır [4].

Dövme, perçinleme ve kaynak işleme katkılı üretim tekniklerine, delme, taşlama ve frezeleme de eksiltme ile imalat tekniklerine örnektir. 3b baskı ise katkılı üretim tekniklerinin stereolitografi işlemi ile gerçekleştirilmesidir.

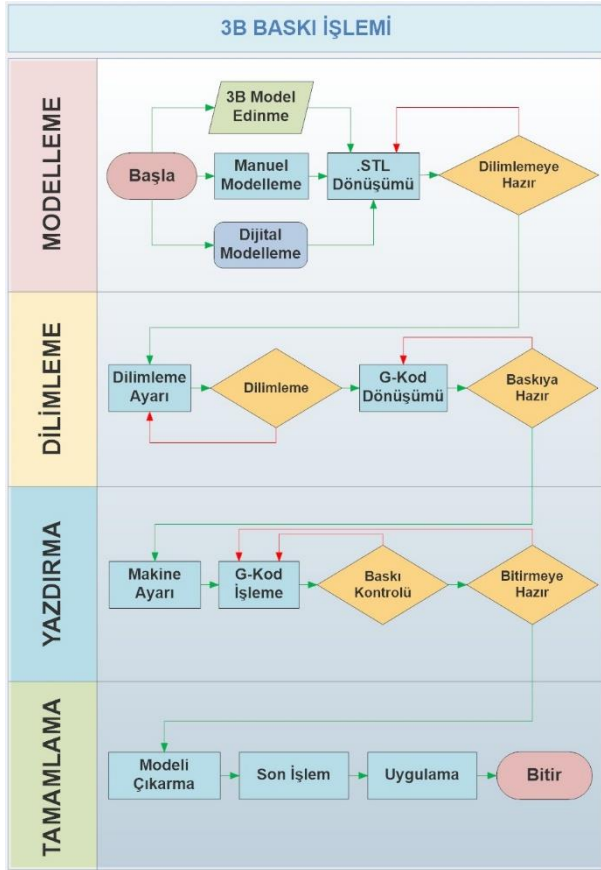
3b yazdırılabilir modeller, bir bilgisayar destekli tasarım yazılımı ya da 3b tarayıcı aracılığıyla oluşturulan, nesneye ait dijital çizimlerdir. Elle modelleme süreci, gerçek nesneye ait geometrik verileri ve 3b tarama da gerçek nesneye ait dijital 3 boyutlu noktalar kümesini ifade etmektedir [6].

3b modellerin manuel (el) ya da otomatik (3b tarayıcı) oluşturulması herkes için mümkün olmamaktadır. Son yıllarda birkaç 3b baskı pazarının ortaya çıkması bundandır. Bu platformlar insanlara ücretli ya da ücretsiz olarak milyonlarca 3b yazdırılabilir model sunmaktadır. En popülerleri arasında Shapeways, Thingiverse ve Threeding yer almaktadır [1].

Şekil 2'de akış diyagramı verilen üç boyutlu yazıcı ile yazdırma işlemi modelleme, dilimleme, yazdırma ve tamamlama olmak üzere dört ana başlıktan oluşmaktadır. Modelleme adımı, bir bilgisayar destekli tasarım programı ya da bir 3b tarayıcı kullanılarak gerçek nesneye ait 3b model oluşturulmaktadır. Bu model daha sonra pek çok CAD/CAM yazılımlarında ortak olarak bulunan STL dosya uzantısıyla kaydedilmektedir [6]. Dilimleme adımı, STL olarak kaydedilen 3b model, bir dilimleme algoritması kullanılarak belirli kalınlıklarda enine 2b kesitlere ayrılmaktadır. Bu kesitler, pek çok otomasyon işlemlerinde ortak olarak kullanılan ve G-Kod olarak adlandırılan kodlara dönüştürülmektedir. Bu kodlar, makinenin anlayacağı dilde her bir 2b katman için belirlenen noktalarda ve belirlenen miktarlarda malzeme işlenmesini sağlayan kod bilgilerini içermektedir [6]. Yazdırma adımı, 3b yazıcı G-Kod'lar vasıtasıyla, her bir 2b katmanı birbiri ardına sıralayarak 3b gerçek nesnenin el ile tutulabilen katı modelini oluşturmaktadır. Bu katı modellerin oluşturulmasında isteğe bağlı olarak sıvı, toz ya da katı herhangi bir polimer malzeme kullanılabilir [6]. Tamamlama adımı, 3b yazdırma işlemi sonrasında oluşan katman çizgileri ısı işlemler, gaz ve çözelti gibi yöntemler kullanılarak yok edilmektedir. Böylece malzeme yüzeyinin pürüzsüzleştirilmesi sağlanmaktadır.

Yazıcı çözünürlüğü, katman kalınlığı ve dpi (inç başına nokta) olarak ya da mikrometre ( $\mu\text{m}$ ) ile ifade edilmektedir. Bir model basımı, kullanılan yöntem, modelin boyutuna ve karmaşıklığına bağlı olarak, birkaç saatten birkaç güne kadar sürebilmektedir [1]. Bazı katkı üretim teknikleri parçaların üretimi süresince birden fazla malzeme kullanma yeteneğine sahiptir. Bazıları aynı anda birden fazla renk ve renk kombinasyonları yazdırabilmektedir. Bazıları da oluşturulurken destekler kullanmaktadır. Bu destekler yapım sırasında sarkan yapıları desteklemek için kullanılmaktadır. Destekler baskı tamamlanınca çıkartılabilir veya eriyebilir türden seçilmelidir [1].

Enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel teknikler, ürünlerin seri imalatı için uygun maliyetli olabilir ancak katkılı üretim, nispeten küçük miktarlarda parçalar üretilirken daha hızlı, daha esnek ve daha ucuzdur [1].



Şekil 2. 3b baskı işlemi akış diyagramı (3d printing flowchart) [6]

Yazıcı ile üretilen nesnelerin çözünürlükleri pek çok uygulama için yeterli olmasına rağmen, nesne, istenen boyutta ölçeklendirilebilir ya da daha yüksek çözünürlükte yazdırılabilmektedir [10].

Günümüzde çok sayıda katkılı üretim yöntemleri mevcuttur. Selektif lazer eritme (SLM) ya da doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), selektif lazer sinterleme (SLS), erimiş birikimi modelleme (FDM) gibi bazı yöntemler katmanların üretilmesi için malzemeyi eritirken ya da yumuşatırken, diğer metotlar stereolitografi (SLA) gibi farklı gelişmiş teknolojileri kullanarak sıvı malzemeleri (reçine) birleştirmektedir [7].

Çizelge 1’de görüldüğü gibi baskı teknolojileri sınıflandırılabilir [7]. Her yöntemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır [11].


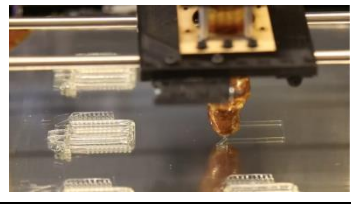
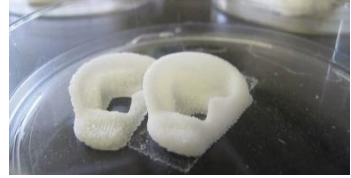
Katkılı üretimin amacı, yeni parça ve cihaz prototiplerinin geliştirilmesinde maliyet ve üretim çıktılarının tesliminde zaman kazandırmaktır. Eskiden sadece malzeme çıkarma özelliğine sahip olan yöntemlerle üretilen parçalar, şimdi katkılı üretimle daha uygun bir şekilde üretilmektedir [12].


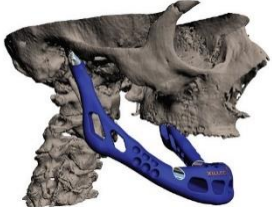

Uygulama alanları, endüstriyel tasarım, prototiplendirme, metal dökümü, mimarlık, sağlık, coğrafya, eğitim ve eğlenme alanları gibi pek çok alanı içermektedir. Çizelge 2’de 3b baskı teknolojileri kullanılarak sağlık alanında üretilen çözümler yer almaktadır.

Çizelge 1. 3b baskı teknolojileri (3d printing technologies) [7]

Tip	Teknolojiler	Malzemeler
Ekstrüzyon	Kaynaşmış birikim modelleme (FDM)	Polilaktikasit (PLA), Akriilonitril bütadien stiren (ABS)
Bağlama	Elektron ışını serbest fabrikasyon (EBF <sub>3</sub> )	Neredeyse bütün metal alaşımlar
Granüler	Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)	Neredeyse bütün metal alaşımlar
	Elektron ışını eritme (EBM)	Titanyum alaşımları
	Seçici lazer eritme (SLM)	Titanyum alaşımları, paslanmaz çelik, alüminyum
	Seçici ısı sinterleme (SHS)	Termoplastik toz
Toz yatak ve mürekkep püskürtmeli 3b baskı	Seçici lazer sinterleme (SLS)	Termoplastik, metal tozları, seramik tozları
	Alçı tabanlı 3b baskı (PP)	Alçı
Katmanlı	Lamine nesne imalatı (LOM)	Tabaka, metal folyo, plastik folyo
Işık polimerize	Stereolitografi (SLA)	Fotopolimer
	Dijital ışık işleme (DLP)	Fotopolimer

Çizelge 2. Sağlık alanında 3b baskı teknolojileri (3d printing technologies in medicine field)

Uygulamalar	Ref.
	[13]
	[14]
	[15]

	Pelvis kemiği	[16]
	Alt çene implantı	[17]
	Protez	[18]

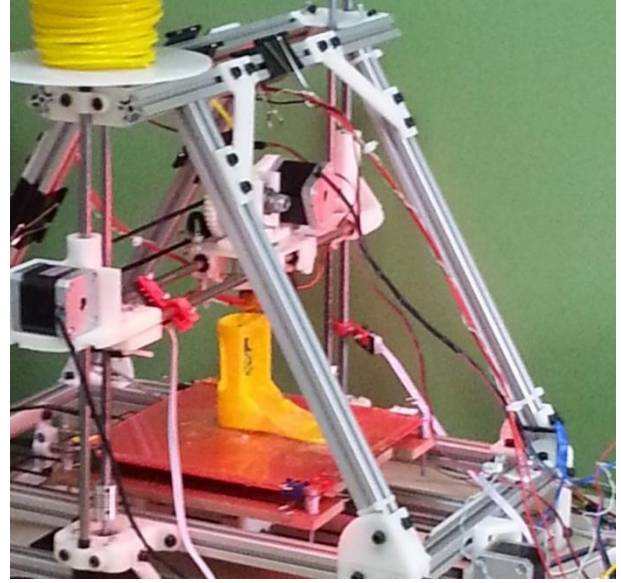
### 3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

S. Scott Crump tarafından icat edilen FDM baskı teknolojisinin patent koruma süresinin sona ermesi ile açık kaynak kodlu donanım ve yazılım kullanımı yaygınlaşmıştır [19]. Açık kaynak kod geliştirici topluluklar oluşarak, 3b baskı teknolojilerinin açık ve anlaşılır hâle getirilmesi sağlanmıştır [1]. RepRap (Replicating Rapid-prototyper), insanlara pek çok 3b yazıcıyı açık kaynak kodlu donanım hâlinde sunan ve günümüzde de giderek yaygınlaşan en büyük açık kaynak kodlu projelerden birisidir. Bu proje, araştırmacılara kişiselleştirilmiş 3b yazıcı tasarımı ve üretimi imkânı sağlamaktadır [1].

MendelMax (MM) Maxbots tarafından 2011'in Kasım ayında tasarlanan açık kaynak kodlu bir RepRap 3b yazıcısıdır [1]. Şase bileşenleri olarak ucuz alüminyum ekstrüzyon ve basılı destekler kullanılmaktadır [1]. Bileşenleri dünya genelinde çeşitli tedarikçilerden sağlanabilmektedir. MM 1.5, MM 3b yazıcısının iyileştirilmiş bir versiyonudur.

#### 3.1. Montaj Aşaması (Assembly Stage)

Bu çalışmada 3b baskı için kit olarak temin edilen MM 1.5 üzerinde bazı mekânîk, elektronik ve yazılımsal değişiklikler yapılmıştır. Şekil 3'te montajı tamamlanan MM 1.5 3b yazıcısı görülmektedir.



Şekil 3. MM 1.5 (MM 1.5)

Mekanik bileşenlerde yapılan değişiklikler [1]:

1. X eksen plastik bileşenleri standart kit dahilinde olmayan daha rijit plastik bileşenler ile değiştirilmiştir. Y ve Z eksenlerinde bulunan ve lineer hareketliliğe yardımcı 608ZZ rulmanlar yerine LM8UU rulmanlar kullanılmıştır. Böylece o eksen üzerinde ki hareketli parçalarda eksen kaçıklıkları azaltılarak daha doğrusal hareket etmeleri sağlanılmıştır.
2. 12 dişli T5 zamanlayıcı kasmağı ve kayışı yerine 16 dişli GT2 zamanlayıcı kasmağı ve kayışı kullanılmıştır. Böylece yazıcının çözünürlüğü artırılmıştır.
3. Kontrol kartını ve motor sürücülerini soğutmak için fan eklenilmiştir.
4. Sigma profillerin içeride kalan boş kanallarına aydınlatma amaçlı led yerleştirilmiştir.

Elektronik bileşenlerde yapılan değişiklikler [1]:

1. RAMPS 1.4 kontrol kartı yerine daha fazla bileşenin (termokupl, hassas motor sürücülerini) kullanımını destekleyen Megatronics v2 kullanılmıştır.
2. A4988 step motor sürücülerini (1/16) daha hassas çalışan DRV8825 (1/32) step motor sürücülerini ile değiştirilmiştir. Böylece yazıcının çözünürlüğü artırılmıştır.
3. 1.8° Nema 17 step motorlar daha hassas çalışan 0.9° Nema 17 step motorlar ile değiştirilmiştir. Böylece yazıcının çözünürlüğü artırılmıştır.
4. 100K NTC termistörler yerine daha hassas sıcaklık ölçümü yapan K-Tip termokupl kullanılmıştır.

Yazılımda yapılan değişiklikler [1]:

1. K-Tip termokupl ve pinleri Firmware içerisinde tanımlanmıştır.
2. Fanlar ve pinleri Firmware içerisinde tanımlanmıştır.

3. Host yazılımı, Slic3r ve Firmware parametreleri optimize edilmiştir.

Çizelge 3'te 3b baskı için kullanılmış EEPROM parametreleri görülmektedir.

**Çizelge 3.** EEPROM parametreleri (Eeprom parameters)

NO	ADI	DEĞER
1	Baudrate	115200
2	Filament printed (m)	-
3	Printer active (s)	-
4	Max. inactive time (ms, 0=off)	0
5	Stop stepper after inactivity (ms, 0=off)	360000
6	X-axis steps per mm	160.0000
7	Y-axis steps per mm	160.0000
8	Z-axis steps per mm	5120.0000
9	X-axis max. feedrate (mm/s)	150.000
10	Y-axis max. feedrate (mm/s)	150.000
11	Z-axis max. feedrate (mm/s)	2.000
12	X-axis homing feedrate (mm/s)	40.000
13	Y-axis homing feedrate (mm/s)	40.000
14	Z-axis homing feedrate (mm/s)	2.000
15	Max. jerk (mm/s)	20.000
16	Max. Z-jerk (mm/s)	0.300
17	X home pos (mm)	0.000
18	Y home pos (mm)	0.000
19	Z home pos (mm)	0.000
20	X max length (mm)	200.000
21	Y max length (mm)	200.000
22	Z max length (mm)	200.000
23	X-axis acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	500.000
24	Y-axis acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	500.000
25	Z-axis acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	0.000
26	X-axis travel acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	250.000
27	Y-axis travel acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	250.000
28	Z-axis travel acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	0.000
29	Autolevel active (1/0)	0
30	Bed heat manager (0-3)	0
31	Bed PID drive max	255
32	Bed PID drive min	80
33	Bed PID P-gain	196.000
34	Bed PID I-gain	33.000
35	Bed PID D-gain	290.000
36	Bed PID max value (0-255)	255
37	Extr. 1 steps per mm	675.000
38	Extr. 1 max. feedrate (mm/s)	20.000
39	Extr. 1 start feedrate (mm/s)	15.000
40	Extr. 1 acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	2000.000
41	Extr. 1 heat manager (0-3)	3

42	Extr. 1 PID drive max	230
43	Extr. 1 PID drive min	40
44	Extr. 1 PID P-gain/dead-time	7.0000
45	Extr. 1 PID I-gain	2.0000
46	Extr. 1 PID D-gain	40.0000
47	Extr. 1 PID max value (0-255)	255
48	Extr. 1 X-offset (steps)	0
49	Extr. 1 Y-offset (steps)	0
50	Extr. 1 temp. stabilize time (s)	1
51	Extr. 1 temp. for retraction when heating (C)	150
52	Extr. 1 distance to retract when heating (mm)	0
53	Extr. 1 extruder cooler speed (0-255)	255

3b yazıcıları kullanabilme, bu alanla ilgili beceri gerektirmektedir. Host (3b yazıcı ile bilgisayar arasında iletişimin sağlanması) yazılımının ayarlarının yapılması, cihazın bilgisayara tanıtılması ve manuel kontrolün nasıl gerçekleştiği bilinmelidir.

Montaj tamamlandıktan sonra donanımsal kalibrasyonların yapılması gerekmektedir. Bu işlem yazıcılara göre değişmektedir.

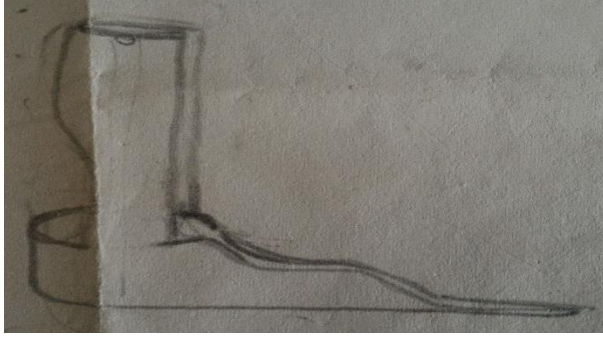
Kalibrasyon yapıldıktan sonra sırasıyla Firmware'in oluşturulması ve cihaz ile bilgisayar arasında iletişimi sağlayacak olan Host yazılımının konfigürasyonu gelmektedir. Bütün bu adımlar gerçekleştirildikten sonra 3b yazıcıdan çıktı alınabilmektedir.

Üç boyutlu baskı teknolojileri dünya genelinde popüler olarak çalışılan ve özellikle sağlık alanında umut vaat eden çözümler üreten bir teknolojidir. Bu teknolojilerden yararlanabilme bu alanda beceri ve deneysel çalışmayı gerektirmektedir. Yapılan bu değişiklikler ile mevcut 3b yazıcıdan daha kaliteli bir çıktı alınabilmesi ve dolayısı ile hasta üzerinde olumsuz bir etkinin oluşmaması amaçlanmıştır. Bu olumsuz etkiyi en aza indirmek adına, çıktı yüzeyinde baskı işlemi sonrası oluşan katman çizgilerinin vücut ile doğrudan temas etmemesi düşünülmüş ve herhangi bir kimyasal son işlem (aseton banyosu vb.) gerekmeksizin çıktı kalitesinin artırılması üzerinde durulmuştur.

### 3.2. AFO Modeli (Ankle-Foot Orthosis Model)

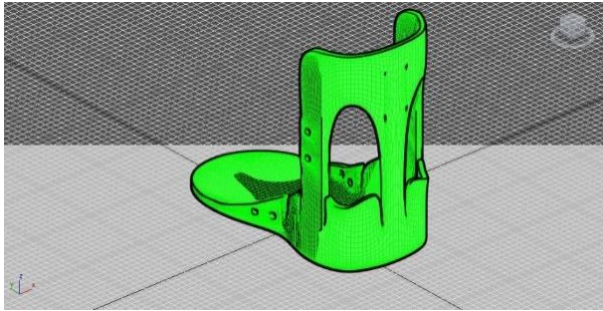
AFO (Ankle-Foot Orthosis - Ayak Bileği Ortez), ayak bileğini sabitlemeye, yürümeyi kolaylaştırmaya ve vücut dengesini sağlamaya yarayan ortezdir [20]. Ameliyat sonrasında da ekstremitayı korumak ve sabitlemek amacıyla kullanılabilir [18]. Bu ortezler ilgili kısma vücudun dışından uygulanmaktadır. Ortez seçimini etkileyen pek çok parametre vardır. Şüphesiz kişiye özel olarak üretilerek, amacına tam uygunluk göstermesi ve ideal olması önemlidir [21].

Bu çalışmada ayak bileği ortezi ilk olarak kâğıt üzerinde şekillendi. FDM baskı teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen baskıda tek parça çıktı alınmasına karar verildi ve bu sebeple rijit AFO tasarlandı. Şekil 4'te kâğıt üzerinde tasarlanan AFO modeli görülmektedir.



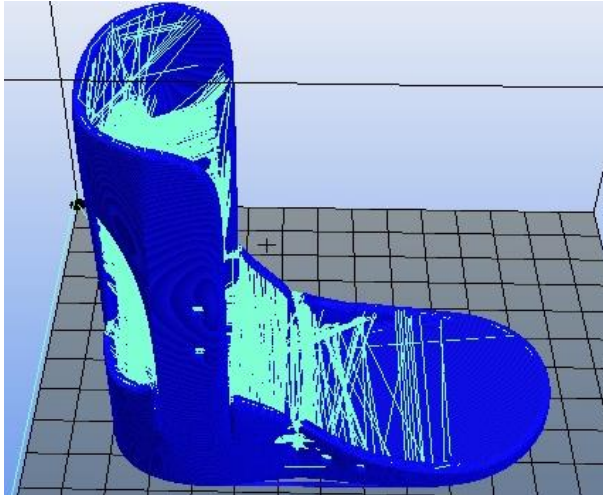
Şekil 4. AFO'nun kağıt üzerinde tasarımı (AFO prototype sketch)

Kağıt üzerinde tasarlanan model, 3ds Max ile 3b modellendi. Şekil 5'te 3b AFO modeli görülmektedir.



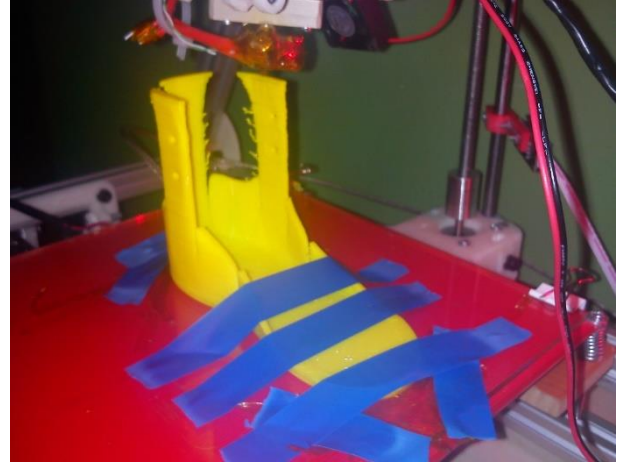
Şekil 5. AFO'nun 3b modellenmesi (Modelling AFO prototype)

Modelleme adımı tamamlandıktan sonra Slic3r ile 3b AFO modeli 2b ince katmanlara ayrılarak G-Kod dönüşümü gerçekleştirildi. Şekil 6'da 2b ince katmanlara ayrılan AFO modeli görülmektedir.



Şekil 6. AFO modelinin dilimlenmesi (Slicing 3d model of the AFO)

Dilimleme adımı tamamlanan model Repetier Host yazılıma aktarılarak baskıya hazır hale getirildi. Polilaktik asit malzeme kullanılarak yaklaşık 8 saat süren yazdırma işleminde çözünürlük 200 mikron olarak ayarlandı. Şekil 7'de AFO modelinin basımı görülmektedir.



Şekil 7. AFO'nun yazdırılması (3d printing of the AFO prototype)

Çıktının AFO olarak kullanılabilmesi adına medikallerde bulunan mevcut AFO'ların yapısı ve kalitesi incelendi. Elde edilen bu çıktının altına kaymaz ayak altlığı, tabanına ortopedik ayak tabanlığı, içine cilde zarar vermeyen yumuşak deri malzeme ve son olarak da ayağı bilekten ve üstten olmak üzere 2 ayrı noktadan da dengeli bir şekilde kavramaya ve sabitlemeye yarayan cırt bant eklendi. Şekil 8'de AFO çıktısı görülmektedir.



Şekil 8. AFO prototipi (Final AFO prototype)

Bu çalışmada üretilen medikal ortez herhangi bir hastaya özel üretilmemiş olup, prototip niteliğindedir. Mevcut tasarım, özgün olmakla birlikte, AFO prototipi herhangi bir hastanın uzvuna uygulanabilme özelliğine sahiptir. Hasta uzvunun üç boyutlu görüntülenmesinde üç boyutlu tarama teknolojileri kullanılmaktadır. Tarama sonucunda elde edilen noktalar kümesi, işlenebilir modele

dönüştürüldükten sonra mevcut ortez modeli, referans uzvun anatomisine göre şekillendirilmektedir. Şekil 9'da bu işlemler sıra ile görülmektedir.

Bu esnada hasta uzvunun özellikle gerçek zamanlı tarama teknolojisine sahip bir 3b tarayıcı ile taranması, hedef geometrinin modellenmesinde kayıp yüzeyler için yüzey tamamlama algoritmalarının kullanılmasından kaynaklanan geometri bozukluklarının önlenmesinde etkilidir.

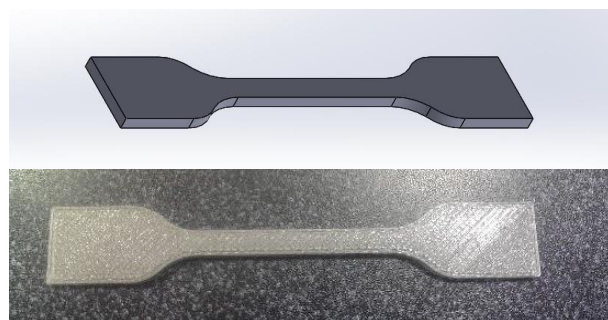
#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Üç boyutlu yazıcılarla istenilen ölçü ve malzemede biyomedikal ekipman oluşturulabilmektedir. Bu teknoloji yeni yeni gelişmekte olup bu alanda ilerleyen zamanlarda insanlara çok daha fazla yarar sağlayacağı kaçınılmazdır.

Bu çalışmada yer alan AFO modeli, uzun sabitlenmesinde kullanılacağından, statik yük testlerinin gerçekleştirilmesinde referans olarak kullanılacak olan yük hastanın ağırlığı kadar olup ortezin iç yüzeyi üzerine uygulanması gerekmektedir. Ortez, üretim esnasında farklı basım parametreleri ile iç doluluk oranı, 2b katmanlarda yer alan termoplastik polimerin üst üste yapışma açısı ve pek çok farklı özellikleri ayarlanabilmektedir. Bu da doğrudan kullanılan malzeme miktarını etkilemekle birlikte ortez dayanımını ve baskı parametrelerini hasta ağırlığına göre belirleme imkânı sağlayacaktır. Şekil 10'da, malzeme dayanımını belirlemek için gerçekleştirilen çekme testinde kullanılmak üzere 3b yazıcı ile belirli baskı parametrelerinde hazırlanabilecek test numuneleri görülmektedir.



Şekil 9. a) 3b tarama işlemi (3d scanning process), b) Referans hedef uzvun anatomisi (3d model of target limb anatomy), c) Ortez tasarımının hasta anatomisine göre şekillendirilerek uygulanması (Customization of the model)



Şekil 10. a) Test numunesinin 3b modeli (3d model of specimen), b) Test numunesinin 3b yazıcıdan alınan çıktısı (3d printed specimen)

Malzeme analizinde sıklıkla kullanılan çekme ve darbe testlerinde ki numunelerin, medikal ortez üretiminde kullanılan baskı parametreleriyle aynı üretilmesi ve bu şekilde dayanıklılık testlerinin gerçekleştirilmesi, termoplastik malzemenin dayanımını ve üst üste oluşan 2b katmanlardaki yapışma miktarını gerçeğe en yakın şekilde belirlemeyi sağlayacaktır. Ayrıca sağlamlık testi için, hasta ağırlığının statik yük olarak ortez üzerine uygulanması gerek SolidWorks Simulation kullanılarak gerekse de bir hidrolik pres makinesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu şekilde medikal ortez dayanımının ve malzeme özelliklerinin test sonuçlarına göre hastaya uygunluğu belirlenebilmektedir. Hasta ağırlığına göre basım parametreleri kullanılarak fazla malzeme kullanımının önlenmesi doğrudan üretim sürecinde harcanan zamanı düşürmektedir.

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

İnsan yürümesi için son derece önemli olan ayak bileği ortezleri deformasyonları önlemek ve bilek hareketini kontrol etmek için üretilir. Bir AFO genellikle zayıf bacağı korumak, bilek ve ayağı doğru pozisyonda tutmak ve adım atmayı düzeltmek için kullanılır. Son kullanıcı farklı boyutlarda bilek ve farklı tipte deformasyonlara sahip olabileceğinden bir AFO son kullanıcının ayağına tam uygun bir şekilde üretilmelidir. Dolayısıyla seri üretilen AFO'lar her bir son kullanıcı için uygun olmayabilir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda üç boyutlu yazıcılar kişiselleşmiş biyomedikal ekipman üretiminde öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, özel bir AFO öncelikle bir CAD yazılımı ile modellendi ve daha sonra bu model geliştirilen yazıcıyla üretildi. Bu çalışma

ülkemiz literatüründe bilinen ve üç boyutlu yazıcı ile üretilen ilk ayak bileği ortezidir.

#### 6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Aydın L, "Üç boyutlu yazıcıyla ayak bileği ortezinin tasarımı ve geliştirilmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014).
- 2) *Wikipedia C*, "3d Printing" [Online], Ziyaret tarihi: 22 Eylül 2015. [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing)
- 3) Bird J, "Exploring the 3D printing opportunity." *Financ. Times* (2012).
- 4) Hull C W, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography", *U.S. Patent 4 575 330 A*, (1984).

- 5) Lipson H and Kurman M, "Fabricated", Indianapolis, IN: **Wiley**, (2013).
- 6) Aydın L, Küçük S, and Kenar H, "Design and construction of a 3d bioprinter for bioprinting of tissues and organs", **Tip Tekno 2015**, Vogue Hotel Bodrum, Muğla, 153-157, (2015).
- 7) Aydın L and Küçük S, "Design and construction of ankle foot orthosis by means of three dimensional printers" **Tip Tekno 2014**, Perissia Hotel & Convention Center, Kapadokya, 129-132, (2015).
- 8) **CNN**, [Online], Ziyaret tarihi: 16 Kasım 2015. <http://whatsnext.blogs.cnn.com/2013/07/31/study-at-home-3-d-printing-couldsave-consumers-thousands>
- 9) Wittbrodt B T, Glover A G, Laureto J, Anzalone G C, Oppliger D, Irwin J L and Pearce J M, "Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers", **Mechatronics**, 23(6): 713-726, (2013).
- 10) **Theengineer**, [Online], Ziyaret tarihi: 11 Ekim 2015. <http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/the-rise-of-additivemanufacturing/1002560.article>
- 11) **Economist**, [Online], Ziyaret tarihi: 11 Ekim <http://www.economist.com/node/10105016>
- 12) **Wikipedia C**, "3d Printing" [Online], Ziyaret tarihi: 10 Eylül 2015. [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing)
- 13) Murphy S V and Atala A, "3d bioprinting of tissues and organs", **Nature Biotechnology**, 32 (8): 773-785, (2014).
- 14) Bellan L M, Singh S P, Henderson P W, Porri T J, Craighead H G and Spector J A, "Fabrication of an artificial 3-dimensional vascular network using sacrificial sugar structures", **Soft Matter**, 5(7): 1354-1357, (2009).
- 15) Williams R, "3D Printing Human Tissue and Organs to 'Spark Ethics Debate'", **The Telegraph**, 27, (2014).
- 16) Gerrand C, "3D Printing: a clinician's experience", **Bulletin of The Royal College of Surgeons of England**, 96(7): 230-231, (2014).
- 17) Singare S, Dichen L, Bingheng L, Zhenyu G and Yaxiong L, "Customized design and manufacturing of chin implant based on rapid prototyping", **Rapid Prototyping Journal**, 11(2): 113-118, (2015).
- 18) Jin Y A, Plott J, Chen R, Wensman J and Shih A, "Additive Manufacturing of Custom Orthoses and Prostheses—A Review", **Procedia CIRP**, 36, 199-204, (2015).
- 19) Crump S S, Stratasys, Inc., assignee, "Apparatus and method for creating three-dimensional objects", **U.S. Patent** 5121329 A, (1989).
- 20) Pallari J H P vd., "Design and additive fabrication of foot and ankle-foot orthoses", **Proceedings of the 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference**, Austin, Texas, USA, 834-845, (2010).
- 21) Mavroidis C vd., "Patient specific ankle-foot orthoses using rapid prototyping", **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, 8(1): 1, (2011).