2019

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih Şamil ULUDAĞ



T.C.
ANKARA YILDIRIM BEYAZIT ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RADYOTERAPİDE 3B MODELLEME YAPILARAK 3B YAZICI İLE FARKLI FİLAMENTLER KULLANARAK BOLUS ÜRETİMİ VE KIYASLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih Şamil ULUDAĞ

SAĞLIK FİZİĞİ

Ankara, 2019

T.C.
ANKARA YILDIRIM BEYAZIT ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RADYOTERAPİDE 3B MODELLEME YAPILARAK 3B YAZICI İLE FARKLI FİLAMENTLER KULLANARAK BOLUS ÜRETİMİ VE KIYASLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih Şamil ULUDAĞ

SAĞLIK FİZİĞİ

Ankara, 2019

İthaf

Bu tez çalışmasını, bilim için çabalayan ve bu yolda her şeye rağmen ilerlemeye çalışan bilim insanlarına ithaf ediyorum…

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını yapmam için beni yönlendiren, yardımcı olan ve destekleyen değerli hocam sayın Prof. Dr. Güven ÇANKAYA'ya; tecrübe ve yardımlarıyla bana sürekli destek olan sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan OFLAZ'a; malzeme çekimlerimi yapmama yardımcı olduğu için Ankara Ulus Numune Eğitim ve Araştırma Hastanesi Radyasyon Onkolojisi Bölümüne teşekkürlerimi bir borç bilim.

Her zaman yanımda olan, beni destekleyen, araştırmalarımda yardımcı olmak isteyen ve benim gibi bir bilim insanı olan sevgili eşim Esra'ya ve aramıza yeni katılan canım oğlum Beyazıt Miraç'a da teşekkürlerimi can-ı gönülden iletmek isterim…

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **vi**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **vii**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **ix**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL BİLGİLER **2**
2.1. Radyoterapi Nedir? Ne İşe Yarar? 2
2.1.1. Linac Cihazı Çalışma Prensibi 3
2.2. Bolus Nedir? Ne İşe Yarar? 4
2.3. Radyoterapi ve Bolus Kullanımı 5
2.4. Üç Boyutlu Modelleme Nedir? 6
2.5. Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi 6
2.6. Yazıcı Çeşitleri ve Özellikleri 7
2.6.1. FDM Yazıcılar 7
2.6.2. SLA Yazıcılar 8
2.6.3. DLP Yazıcılar 9
2.6.4. SLS Yazıcılar 10
2.6.5. LOM Yazıcılar 11
2.6.6. SLM Yazıcılar 12
2.6.7. EBM Yazıcılar 13
2.7. FDM Yazıcıda Kullanılan Filament Çeşitleri ve Özellikleri 14
2.7.1. ABS 14
2.7.2. Bronzefill 15
2.7.3. HIPS 16
2.7.4. PETG 17
2.7.5. PLA 18
2.7.6. PLA Flex 18
2.7.7. PolyFlex TM 19
2.7.8. PP 20
2.7.9. STH 21
2.7.10. TPU 21

3. MATERYAL VE YÖNTEM 23
3.1. Malzeme Tasarımı ve Modelleme 23
3.2. Kullanılan Cihazlar ve Özellikleri 23
3.2.1. Ölçüm Cihazları 23
3.2.2. Üç Boyutlu Yazıcılar 28
3.3. Parçaların Tasarımı ve Yazımı 30
3.3.1. ABS 31
3.3.2. Bronzefill 32
3.3.3. HIPS 33
3.3.4. PETG 34
3.3.5. PLA 35
3.3.6. PLA Flex 36
3.3.7. PolyFlex TM 37
3.3.8. PP 38
3.3.9. STH 39
3.3.10. TPU 40
3.4. Linac Ölçümleri ve Değerlendirme 41
3.5. Tüm Verilerin Toplanması 46
4. BULGULAR 48
4.1. Bolus Verileri 48
4.2. Filament Verileri 49
4.2.1. ABS 49
4.2.2. Bronzefill 50
4.2.3. HIPS 50
4.2.4. PETG 50
4.2.5. PLA 51
4.2.6. PLA Flex 52
4.2.7. PolyFlex ™ 52
4.2.8. PP 52
4.2.9. STH 53
4.2.10. TPU 54
4.3. Bolus ile Diğer Filament Verilerinin Karşılaştırılması 54
5. TARTIŞMA 57
5.1. Standart Ölçüm Sonucu 57

5.2. Alana Bağlı Ölçüm Sonucu 58
5.3. Derinliğe Bağlı Ölçüm Sonucu 59
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 60
7. KAYNAKLAR 62
8. EKLER 64
EK-1. ÖZGEÇMİŞ 64

ÖZET

Radyoterapide 3B Modelleme Yapılarak 3B Yazıcı ile Farklı Filamentler Kullanarak Bolus Üretimi ve Kıyaslanması

Bolus malzemesi, radyoterapide sıklıkla kullanılmakta olan bir malzemedir. Asıl amacı; tedavi uygulanacak olan bölgenin hem derinliği hem de çevresinin fazla doza maruz kalmasını engellemektir. Neredeyse her tedavide kullanılmakta olan ticari bolus malzemesi, hasta açısından büyük önem taşımaktadır.

Gün geçtikçe 3 boyutlu (3B) yazıcı teknolojisi hızla gelişmektedir ve sağlık sektörü de dâhil olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Birçok farklı yazıcı teknolojisinin kullanıldığı 3B yazıcı sektöründe yazıcı çeşidine göre de farklı yazım malzemeleri kullanılmaktadır.

Bizim amacımız bu iki başlığı tek bir çatı altında toplayarak, radyoterapide kullanılan bolus malzemesinin yerine alternatif olabilecek bir malzemeyi 3B modelleme yaparak 3B yazıcı yardımı ile daha ucuza ve istenilen geometrilerde üretip kullanmaktır. Bu sayede radyoterapide kullanılan ticari bolus malzemesi yerine hastaya özgü olacak biçimde ve istenilen geometrilerde alternatif bir bolus malzemesi üreterek tedavinin kısmen daha güvenilir bir şekilde yapılabilmesini sağlamaktır.

Bu çalışmada ticari bolus malzemesiyle birlikte 10 adet farklı filament kullanılarak üretilen test numuneleri üzerinden ölçümler alındı. Ticari bolus malzemesi ile aynı şekle sahip 3B üretilen malzemelerin, linac cihazı kullanarak ölçümleri yapıldı ve elde edilen verileri kıyaslanarak, ticari bolus malzemesine alternatif olabilecek bir malzemenin üretilip kullanılabilirliği test edildi.

Anahtar Kelimeler: 3b tarama, 3b tasarım, 3b yazıcı, bolus, radyoterapi, sağlık fiziği

ABSTRACT

3D Bolus Modelling and Production with Different Filaments by Using 3D printer and Comparison in Radiotherapy

Bolus material is a material that is frequently used in radiotherapy. Its main purpose is to prevent exposure from overdoses in both the depth and surrounding area of treatment area. The commercial bolus material, which is used in almost every treatment, has great importance to patients.

3D printer technology is rapidly evolving day by day and is being used in many areas, including the healthcare sector. In the 3D printer industry, where many different printer technologies are used, different writing materials are used according to the type of printer.

Our aim is to collect all know-hows under these two titles and produce a new kind bolus in Radiotherapy with the help of 3D modelling and 3D printing technology to make them cheaper and effective. In this way, instead of the commercial bolus material used in radiotherapy, it is to make the treatment possible in a more reliable way by producing an alternative bolus material in the desired geometries and specific to the patient.

10 different filaments were used to produce bolus samples and those 10 different bolus samples were tested and compared with the commercial bolus in this study. 3D manufactured boluses in the same shape as commercial bolus were compared by using the linac device. According to results that it may be said that new bolus samples can be alternative material in the Radiotherapy.

Keywords: 3d design, 3d printer, 3d scan, bolus, health physics, radiotherapy

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

3B / 3D	:	3 boyut / 3 dimensional
FDM	:	Erimiş birikim modelleme / Fused deposition modelling
SLA	:	Stereolithography
DLP	:	Dijital ışık işleme / Digital light processing
SLS	:	Seçici lazer sinterleme / Selective laser sintering
LOM	:	Lamine nesne imalatı / Laminated object manufacturing
SLM	:	Seçici lazer eritme / Selective laser melting
EBM	:	Elektronik ışın erime / Electron beam melting
ABS	:	Acrylonitrile butadiene styrene
PLA	:	Polylactic acid
PP	:	Polipropilen / Polypropylene
PetG	:	Polyethylene terephthalate glycol
TPE	:	Termoplastik elastomerler
HIPS	:	High impact polystyrene
TPU	:	Termoplastik poliüretan
Linac	:	Lineer hızlandırıcı / Linear particle accelerator
nC	:	nanoCoulomb
SSD	:	Kaynak yüzey arası uzaklık / Source skin distance
MU	:	Monitor unit / Monitör ünitesi
MV	:	Mega voltage / Megavolt
Cm	:	Santimetre

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Linac cihazı kullanılarak uygulanan bir tedavi örneği. 2
Şekil 2.2. Linac cihazı çalışma diyagramı. 3
Şekil 2.3. Alternatif bolus ile standart bolus kıyaslaması. 4
Şekil 2.4. Yaygın olarak kullanılan ticari bolus malzemesi. 5
Şekil 2.5. Radyoterapide bolus kullanımı. 5
Şekil 2.6. Üç boyutlu modelleme. 6
Şekil 2.7. Tasarlanan modelin 3B yazıcıda yazılmış hal. 7
Şekil 2.8. FDM yazıcı örnekleri. 8
Şekil 2.9. SLA yazıcı örneği. 9
Şekil 2.10. DLP yazıcı örneği. 10
Şekil 2.11. SLS yazıcı örneği. 11
Şekil 2.12. LOM yazıcı örneği. 12
Şekil 2.13. SLM yazıcı örneği. 13
Şekil 2.14. EBM yazıcı örneği. 14
Şekil 2.15. ABS filament ile yazdırılmış lego parça örnekleri. 15
Şekil 2.16. Bronzfill filament ile yazdırılmış parça örneği. 16
Şekil 2.17. HIPS filament ile yazdırılmış parça örneği. 17
Şekil 2.18. PETG flament ile üretilmiş şişe örneği. 17
Şekil 2.19. PLA filament ile yazdırılmış parça örnekleri. 18
Şekil 2.20. PLA flex filament ile yazdırılmış parça. 19
Şekil 2.21. PolyFlex^{TM} filament ve yazdırılmış örnekler. 20
Şekil 2.22. PP filament ile yardırılmış örnekler. 20
Şekil 2.23. STH filament ile yazdırılmış örnekler. 21
Şekil 2.24. TPU filament ile yazdırılmış parça örneği. 22
Şekil 3.1. Linac cihazı. 24
Şekil 3.2. İyon odası. 25
Şekil 3.3. Elektrometre. 25
Şekil 3.4. Rw3 katı su fantomu 26
Şekil 3.5. Bilgisayar, kontrol ve takip sistemi. 27
Şekil 3.6. Massportal Pharaoh ED 3B yazıcı. 28
Şekil 3.7. Raise3D N2 Plus 3B yazıcı. 29
Şekil 3.8. 100x100x10 mm Boyutlarındaki tasarlanan parça 30

Şekil 3.9. Raise3D ve Massportal cihazlarındaki yazıma hazır görüntü 30
Şekil 3.10. ABS filamentten üretilen parça. 31
Şekil 3.11. Bronzefill filamentten üretilen parça. 32
Şekil 3.12. HIPS filamentten üretilen parça. 33
Şekil 3.13. PETG filamentten üretilen parça. 34
Şekil 3.14. PLA filamentten üretilen parça. 35
Şekil 3.15. PLAflex filamentten üretilen parça. 36
Şekil 3.16. PolyFlex^{TM} filamentten üretilen parça. 37
Şekil 3.17. PP filamentten üretilen parça. 38
Şekil 3.18. STH filamentten üretilen parça. 39
Şekil 3.19. TPU filamentten üretilen parça. 40
Şekil 3.20. 10 Farklı filamentten üretilen parçalar ve standart bolus malzemesi 41
Şekil 3.21. Kolimatörlerin kapalı hali 42
Şekil 3.22. Kolimatörlerin açık hali 42
Şekil 3.23. SSD mesafesinin 100 cm ye ayarlanması 43
Şekil 3.24. Katı su fantomlarının içerisine iyon odasının yerleştirilmesi 43
Şekil 3.25. İyon odası ile elektrometrenin bağlantısı. 44
Şekil 3.26. Deney düzeneğinin kurulmuş hali. 44
Şekil 3.27. ABS filamentten üretilen parçanın ölçümleri için hazırlık 45
Şekil 3.28. Linac cihazı ayar görselleri 46
Şekil 5.1. Standart ölçüm sonuçlarının oran grafiği 57
Şekil 5.2. Alan ölçüm sonuçlarının oran grafiği 58
Şekil 5.3. Derinlik ölçüm sonuçlarının oran grafiği 59

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. ABS filament yazım ayarları. 31
Tablo 3.2. Bronzefill filament yazım ayarları. 32
Tablo 3.3. HIPS filament yazım ayarları. 33
Tablo 3.4. PETG filament yazım ayarları. 34
Tablo 3.5. PLA filament yazım özellikleri. 35
Tablo 3.6. PLAflex filament yazım ayarları. 36
Tablo 3.7. PolyFlex TM filament yazım ayarları. 37
Tablo 3.8. PP filament yazım ayarları. 38
Tablo 3.9. STH filament yazım ayarları. 39
Tablo 3.10. TPU filament yazım ayarları. 40
Tablo 4.1. Bolus ile yapılan standart ölçümlerin sonuçları. 48
Tablo 4.2. Bolusun alan bağımlılığı için yapılan 5x5 cm lik ölçümler. 49
Tablo 4.3. Bolusun derinlik değeri için yapılan ölçümler. 49
Tablo 4.4. ABS ile yapılan standart ölçüm sonuçları. 49
Tablo 4.5. Bronzefill ile yapılan standart ölçüm sonuçları. 50
Tablo 4.6. HIPS ile yapılan standart ölçüm sonuçları. 50
Tablo 4.7. PETG ile yapılan standart ölçüm sonuçları. 48
Tablo 4.8. PLA ile yapılan standart ölçüm sonuçları. 51
Tablo 4.9. PLA filamentin alan bağımlılığı için yapılan 5x5 cm lik ölçümler. 51
Tablo 4.10. PLAflex filament ile yapılan standart ölçüm sonuçları. 49
Tablo 4.11. PolyFlex ^{TM} filament ile yapılan standart ölçüm sonuçları. 52
Tablo 4.12. PP filament ile yapılan standart ölçüm sonuçları. 53
Tablo 4.13. STH filament ile yapılan standart ölçüm sonuçları. 53
Tablo 4.14. STH Filamentin alan bağımlılığı için yapılan 5x5 cm lik ölçümler. 53
Tablo 4.15. STH filamentin derinlik değeri için yapılan ölçümler. 51
Tablo 4.16. TPU filament ile yapılan standart ölçüm sonuçları. 54
Tablo 4.17. Bolus ile diğer filamentlerden üretilen malzemelerin standart ölçümlerinin karşılaştırılması. 52
Tablo 4.18. Bolus, PLA ve STH filamentin alan bağımlılığı için yapılan 5x5 cm lik ölçümler. 53
Tablo 4.19. Bolus ve STH filamentin derinlik değeri için yapılan ölçümler. 53

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile gitgide hayallerin gerçeklerle buluştuğu şu günlerde 3 boyutlu (3B) yazım teknolojisi de hayatımızdaki yerini almış bulunmakta. Gerek günlük yaşantımızda olsun gerek endüstride, 3B yazım teknolojisini hemen hemen her alanda kullanmaya devam ediyoruz. Bu teknoloji sayesinde aklımıza gelen her türlü proje hayata geçebilmektedir. Bu teknolojinin kullanım alanlarından biri de sağlık sektörüdür. Hastanelerde birçok kullanım alanı olan 3B teknolojisi, bizim için de radyoloji bölümlerinde hayat bulmuştur.

Hâlihazırda radyolojik tedavilerde kullanılmakta olan ticari bolus malzemesi yerine 3B modelleme yaparak hastaya en uygum malzemeyi üretip tedavisine yardımcı olmak için bu çalışmayı yaptık. Ticari bolus malzemesine alternatif olabilmesini incelemek için elimizde bulunan 10 filamentten test malzemeleri tasarladık ve 3B yazıcılarda bu malzemeleri yazdırdık. Daha sonra ürettiğimiz bu malzemelerimizden Linac cihazında ölçümler yaparak veriler elde ettik. Ticari bolus malzemesi ile alınan veriler ile bu malzemeleri kıyaslayarak, alternatif bir bolus malzemesinin uygulanabilirliğini test ettik.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Radyoterapi Nedir? Ne İşe Yarar?

Işın tedavisi olarak da adlandırılan radyoterapi, iyonize radyasyon kullanılarak kanserli hücrelerin tedavi edilmesinde kullanılmakta olan bir tedavi yöntemidir. Tedavinin mantığı radyasyonun yok edici gücünü kanserli hücrelere uygulayarak, bu hücrelerin çoğalmasını engellemek ve yok edilmelerini sağlamaktır. Bu tedavi kanser hücreleri gibi oldukça hızlı büyüyen yapıları durdurmakta oldukça etkilidir.

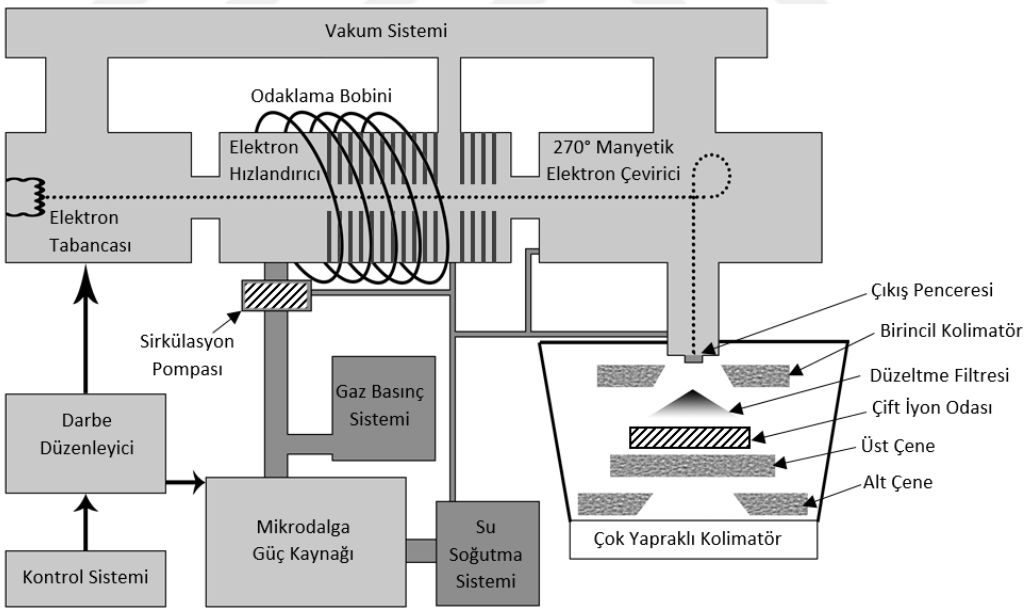
Şekil 2.1. de radyoterapide kullanılan lineer hızlandırıcı (Linac) cihazının bir görseli verilmiştir.



Şekil 2.1. Linac cihazı kullanılarak uygulanan bir tedavi örneği.

2.1.1. Linac Cihazı Çalışma Prensibi

Kontrol ünitesinden verilen komut ile çalışmaya başlayan sistemde, elektrik akımı hem darbe düzenleyicide depolanır hem de mikrodalga oluşturur. Düzenleyiciden çıkan yüksek voltajlı darbeler aynı zamanda elektron tabancasına iletilir. Burada elektron tabancasından elde edilen elektronlar, 50 keV ile hızlandırıcı bakır tüpe girer, elektromanyetik dalgalara bindirilir ve odacıktan odacığa kanal boyunca doğrusal olarak hızlanarak ilerler. Bir odacık içinde gitmekte olan bir parçacık, AC geriliminin periyotunun yarısına eşit bir zaman için, alan olmayan bir bölgeye sürüklenir. Bu yolla gerilim kutuplaşması, parçacığın sürüklenme tüpü içinde tersine çevrilir ve daha sonra parçacık bir sonraki boşluğa geçerken hızlandırılır. Son odacıktan çıktığında elektronların hızları her odacıkta aldıkları hızların toplamına eşit olur. Böylelikle en baştaki hızdan oldukça yüksek bir hıza sahip parçacıklar elde etmiş oluruz. Daha sonra bu parçacıklar manyetik çevirici ile 270° çevrilir ve çıkış penceresine iletilir. Şekil 2.2. de Linac cihazının çalışma prensibinin bir görseli yer almaktadır (1).

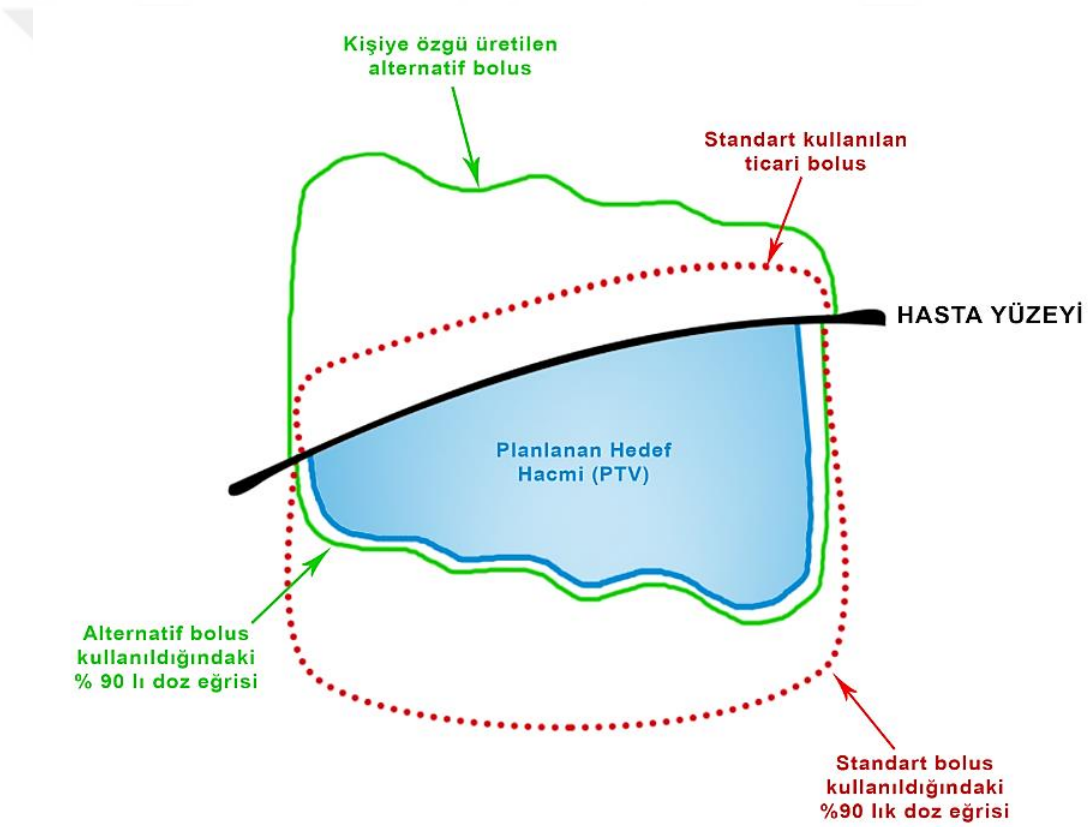


Şekil 2.2. Linac cihazı çalışma diyagramı.

2.2. Bolus Nedir? Ne İşe Yarar?

Bolus ya da ticari bolus olarak adlandıracağımız bu malzeme, radyoterapide yüzey dozunu artırmak yani cilt dozunu eşitlemek için kullanılan bir malzemedir.

Bir hastanın tedavisinde derinin altında 2 cm derinlikte bir tümör olduğunu varsayalım. Kullandığımız ışın minimum 3 cm derinliğe iniyor. Burada 1 cm'lik bolus kullanılarak ışınların 2 cm'den derine ulaşması engellenerek sağlıklı olan hücrelerin zarar görme durumu ortadan kalkıyor. Şekil 2.3. de kişiye özgü üretilen bolus ile standart bolus kullanımının oluşturduğu doz eğrisinin kıyaslanması görülmektedir (1).



Şekil 2.3. Alternatif bolus ile standart bolus kıyaslaması.

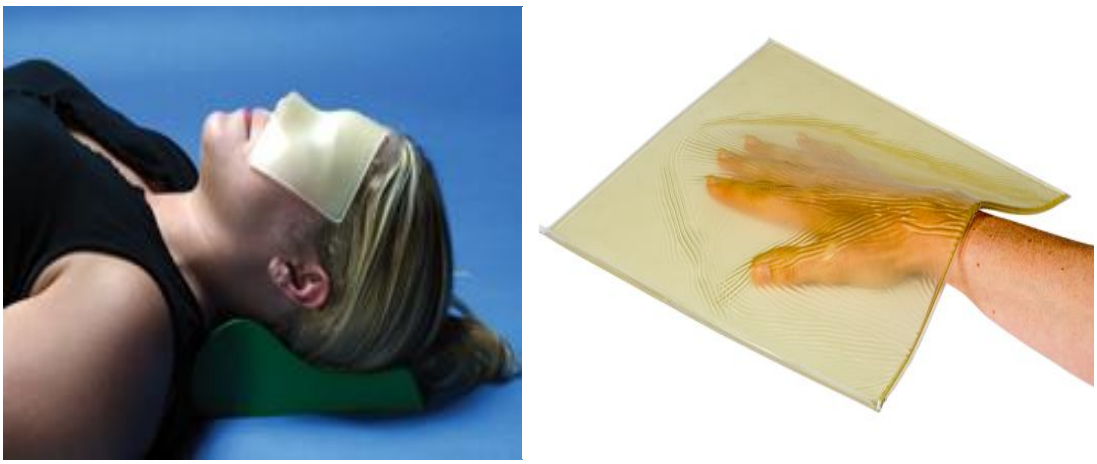
Şekil 2.3. de görüldüğü gibi standart kullanımda planlanmış hedef hacmine yakın bir eğri oluşmuştur. Ancak alternatif bolus kullanıldığında ise hedef hacminin neredeyse tamamı düzgün bir şekilde tedavi edilebilecektir. Şekil 2.4. de yaygın olarak kullanılan bolus malzemesinin bir örneği yer almaktadır.



Şekil 2.4. Yaygın olarak kullanılan ticari bolus malzemesi.

2.3. Radyoterapi ve Bolus Kullanımı

Radyoterapideki hasta, tedavi sırasında fotonlara maruz kalmaktadır. Bu malzeme sayesinde hastanın ışın uygulanan bölgesinde hesaplanan derinlikten daha fazla derinliğe radyasyon gitmesini engellemekte ve ayrıca etrafa yayılan ışınları da soğurduğundan tedavi edilen bölgenin çevresine yayılan ışınları da bir nebze keserek en uygun tedaviyi gerçekleştirmemizi sağlamaktadır (2-5). Şekil 2.5. de radyoterapide bolus malzemesinin kullanımının örnekleri mevcuttur.

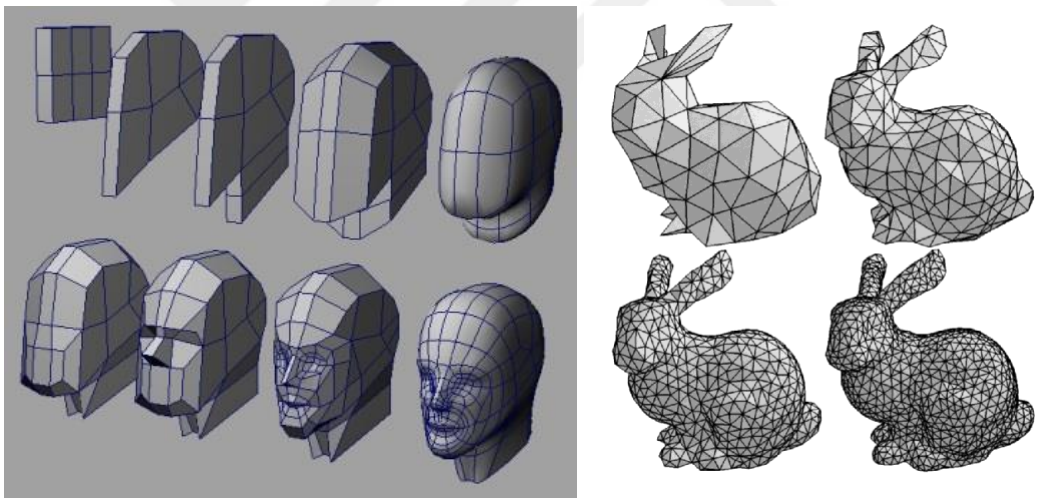


Şekil 2.5. Radyoterapide bolus kullanımı.

2.4. Üç Boyutlu Modelleme Nedir?

3 boyutlu modelleme, genel olarak bilgisayar kullanarak 3B modelleme için özel programlar ile canlı veya cansız bir nesnenin üç boyutlu matematiksel modelinin geliştirilmesi sürecine denir. 3B modelleme süreci ile hazırlanan 3B modeller çoğu zaman 3B rendering denilen modelin gerçekçi bir görünüme kavuşmasını sağlayan araçlarla birlikte eş zamanlı olarak kullanılır. 3B modelleme sürecinde bilgisayar grafiklerinin verileri genellikle kullanıcı tarafından tıpkı heykel ve plastik sanatlara benzer şekilde adım adım işlenerek elde edilir.

Çoğu zaman kullanıcı tarafından elle yapılan 3B modelleme, bazı durumlarda otomatik de yapılabilir. Otomatik yapılan 3B modellemeler, daha önce yapılmış algoritmalara belli değerlerin girilmesiyle veya 3B tarayıcı gibi çeşitli tarama cihazlarıyla yapılabilir. Örneğin hastanelerde kullanılan MR cihazları da bir çeşit 3B tarayıcı görevi görmektedir. Şekil 2.6. da 3B modelleme örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.6. Üç boyutlu modelleme.

2.5. Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi

Sanal ortamda tasarlanmış 3 boyutlu nesneleri katı formda somut nesnelere dönüştüren makinelere 3 boyutlu yazıcı denir. 3B baskı teknolojisi ile ihtiyaç duyduğunuz bir aparat basabilir, 3B tarayıcı ile taradığınız bir cismin çıktısını alabilir, çizdiğiniz bir tasarımı prototipleyebilir, hatta kendi ürününüzü oluşturabilirsiniz. Kısacası 3 boyutlu yazıcılar ile dilediğiniz her şeyi basabilirsiniz.

Şekil 2.7. de son derece kullanışlı olan 3B yazıcılardan biri olan MakerBot marka yazıcının bir görseline yer verilmiştir.



Şekil 2.7. Tasarlanan modelin 3B yazıcıda yazılmış hal.

İlk 3B yazıcı teknolojisi Charless Hull tarafından 1984 yılında ortaya çıkmıştır. 1986 yılında 3D Systems adlı ilk 3B yazıcı şirketinin kurulmasıyla yeni bir sektör doğmuştur. 90'lı yıllarda bu teknoloji hızla ilerlemiş, Amerika'da ilk renkli baskı alınmıştır. 2005 yılında başlayan ve 2007 yılında ilk açık kaynak kodlu, kendi parçalarını dâhil prototipleyebilen yazıcıları çıkaran RepRap projesi ile 3B yazıcılar evlerimize kadar ulaştı. Bu girişimin amacı maliyeti azaltarak kullanımı yaygınlaştırmaktı. Günümüzde ne kadar büyük bir başarıya ulaştığını görüyoruz.

2.6. Yazıcı Çeşitleri ve Özellikleri

2.6.1. FDM Yazıcılar

FDM Teknolojisi İngilizce 'de Fused Deposition Modeling olarak, dilimizde ise Eriyik Yığma Modelleme olarak bilinmektedir. 1980 yılında Stratasys firmasının kurucusu olan Scott Crump'ın bulduğu ve Katmanlı Üretim Teknolojisi olarak da bilinen FDM teknolojisi, 3B yazıcılarda kullanılan baskı teknikleri arasında uygulanması bakımından kolay ve hızlı olmasının yanı sıra yüksek çözünürlükte baskı çözümleri sunmaktadır. FDM teknolojisinin, 3B yazıcıların yaklaşık olarak %70'inde kullanıldığı tahmin edilmektedir. Masaüstü yazıcıların büyük

çoğunluğunda da kullanılmaktadır. İlk kullanıldığı alanlardan biri havacılık sanayisi iken, zamanla savunma sanayisinde de kullanılmaya başlanan 3B baskı teknolojisinin giderek tüm sanayi dallarına yayıldığı görülmektedir. Şekil 2.8. de FDM teknolojisi kullanılan yazıcıların görselleri yer almaktadır.



Şekil 2.8. FDM yazıcı örnekleri.

2.6.2. SLA Yazıcılar

Basit olarak SLA teknolojisi belirli bir dalga boyundaki ışık kaynağının özel tipte bir reçineyi sertleştirmesi yoluyla 3B baskılar alınması metodudur. 1980'li yıllarda keşfedilmiş ve 1986 yılında Chuck Hull tarafından patentlenmiştir. Bilinenin aksine 3B baskı metodu kullanan ilk firma bu şekilde 3D Systems adıyla kurulmuştur. Merak edenler tarihi araştırma yapabilirler. SLA yazıcı denince 3B baskı meraklılarının aklına reçineli yazıcılar genel olarak gelmektedir ancak DLP tipi yazıcılar ışık kaynağı olarak "Digital Light Processing" metodunu kullandığı için SLA yazıcılardan ayrılmaktadır. Bu tip yazıcıları ilerleyen günlerdeki makalemizde yazacağız. Asıl SLA yazıcılar bir lazer kaynağının reçinenin üstüne odaklanması ile sertleşmenin sağlanmasını kullanarak 3B imalat yapmaktadır. Şekil 2.9. de SLA yazıcılara bir örnek verilmiştir.



Şekil 2.9. SLA yazıcı örneği.

2.6.3. DLP Yazıcılar

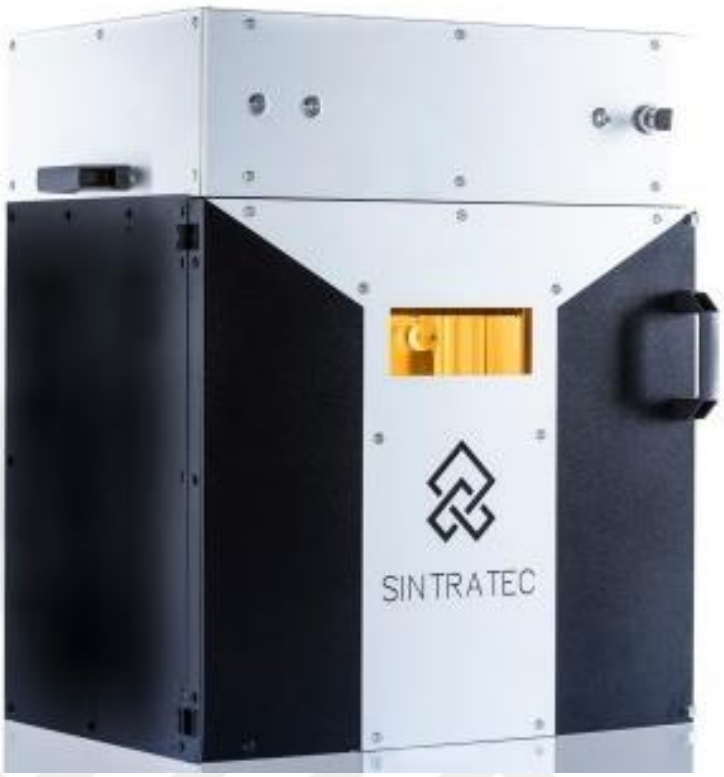
DLP teknolojisini kullanan 3B Yazıcılarda 3 boyutlu modeller hammadde olarak kullanılan foto polimerin projektör yardımıyla katılaştırılmasıyla oluşturulur. SLA teknolojisine oldukça benzeyen DLP'nin farklı yanı ise ultraviyole ışın yerine projektör kullanmasıdır. Bunun haricinde 3 boyutlu modeller SLA teknolojisinde olduğu gibi fotopolimer maddesinin katman katman katılaştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Projektör ilk katmanı dondurduktan sonra üretim tablası bir kat yukarıya hareket etmekte ve diğer katman oluşturulmaktadır. Üretimin sonunda ise obje baş aşağı olacak şekilde elde edilmektedir. FDM teknolojisine kıyasla DLP ile edilen 3B Baskılarda katmanların çözünürlüğü daha yüksektir. SLA teknolojisine kıyasla 3B Baskılar DLP'de daha hızlı üretilebilmektedir. Bunun nedeni ise SLA'de her katman nokta nokta dondurulurken DLP teknolojisinde projektörün katmanlar tek seferde katılaştırmaktadır. SLA teknolojisinde kullanılan foto polimerler DLP teknolojisinde de kullanılabilir. DLP ile üretilen objelerin dayanıklılığı SLA teknolojisiyle aynıdır. Yine SLA ile benzer olarak DLP teknolojisi mücevherat, sanat gibi yüksek detay gerektiren alanlarda kullanılmaktadır. Şekil 2.10. de DLP yazıcı örneği görülmektedir.



Şekil 2.10. DLP yazıcı örneği.

2.6.4. SLS Yazıcılar

Katmanlı imalat teknolojilerinden bir diğeri olan SLS'de lazer toz halde bulunan hammaddeyi sinterleyerek 3 boyutlu modeli oluşturmaktadır. SLS teknolojisini kullanan 3B Yazıcılarda üretim platformunda toz halde bulunan hammaddeden (genellikle polyamid) çok ince bir tabaka lazer tarafından sinterlenir. Daha sonra üretim platformu mikron seviyesinde aşağıya iner ve diğer katman lazer tarafından oluşturulur. Bu süreç objenin tamamı üretilene kadar devam eder. Diğer teknolojilerle kıyaslandığında örneğin SLA ve FDM, SLS teknolojisinde destek malzemesi kullanılmasına gerek yoktur. Çünkü toz halde bulunan materyal katmanlar arasında destek görevi görmektedir. Bu da karmaşık geometrilerin üretilmesine olan sağlamakladır. SLS teknolojisinden alınan çıktılar prototip, mimari, hareketli parçalar, tüketici ürünleri, heykel gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Şekil 2.11. da SLS türü yazıcının örneği görülmektedir.



Şekil 2.11. SLS yazıcı örneği.

2.6.5. LOM Yazıcılar

LOM (Katmanlı Mal İmalatı) tekniğinde ısı ve basınç yardımıyla üst üste birleştirilmiş kâğıt, plastik veya metal laminatlardan oluşan hammaddeler kullanılır. Hammadde ısı ve basınç ile eritilir, bilgisayar kontrollü bir bıçak veya lazer ile kesilerek şekillendirilir. Hızlı prototipleme imkânı sağlar. Şekil 2.12. da LOM yazıcılara bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.12. LOM yazıcı örneği.

2.6.6. SLM Yazıcılar

SLM (Seçici Lazer Eritme) tekniği birçok yerde SLS tekniği olarak addediliyor. Bu teknikte toz metaller yüksek güçte bir lazer ile 3B baskı haline getiriliyor. Bu teknoloji havacılık ve medikal sektörlerinde kullanılmaktadır. Alüminyum, paslanmaz çelik ve titanyum gibi malzemeler kullanılabilir. Şekil 2.13. de SLM yazıcıya bir örnektir.



Şekil 2.13. SLM yazıcı örneği.

2.6.7. EBM Yazıcılar

EBM (Elektron Hüzme Eritmesi) tekniği, toz taban füzyonu konusunda SLM tekniğine çok benziyor fakat iki tekniği birbirinden ayıran en önemli nokta kullanılan güç kaynakları. EBM teknolojisinde güç kaynağı olarak bir vakumun içindeki elektron demeti kullanılır ve çok yüksek sıcaklıklarda işlem yapar. Bunun haricinde SLM ile çalışma prensibi neredeyse aynıdır. EBM teknolojisinde de hammadde olarak metal kullanılır. Şekil 2.14. de EBM yazıcı örneği yer almaktadır.

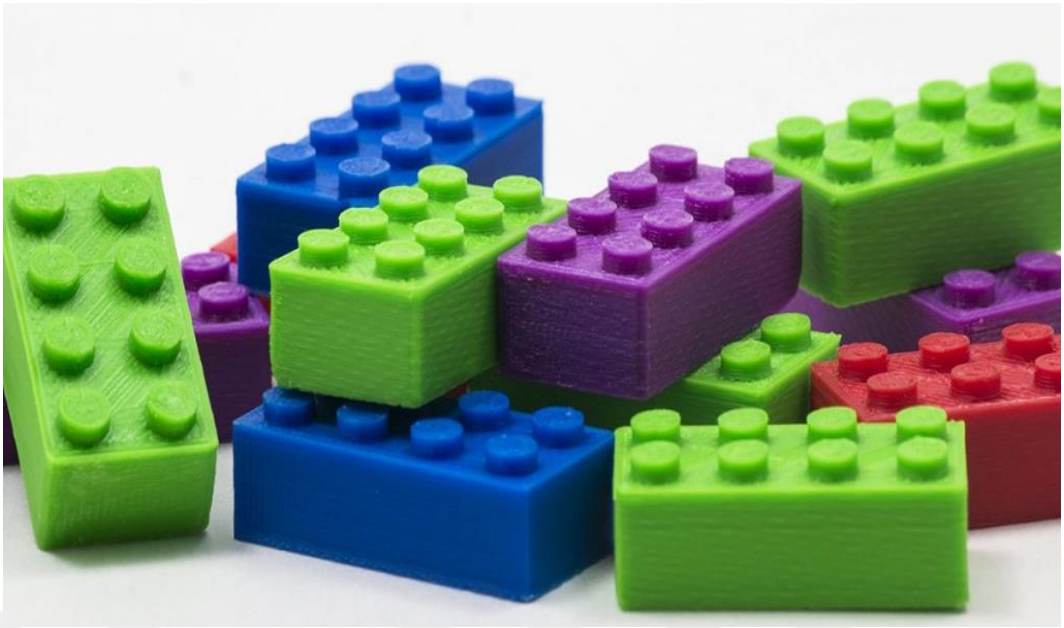


Şekil 2.14. EBM yazıcı örneği.

2.7. FDM Yazıcıda Kullanılan Filament Çeşitleri ve Özellikleri

2.7.1. ABS

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), mukavemeti yüksek ve petrol bazlı bir termoplastiktir. FDM teknolojisini kullanan ve tabla ısıtıcıya sahip bir 3B Yazıcı ABS baskı yapabilir. Tamamen kapalı kasaya sahip 3B yazıcılarla sorunsuz ve kaliteli baskılar alabilirsiniz. Ayrıca, LEGO parçaları da ABS'dir. Şekil 2.15. de ABS filament kullanılarak üretilmiş olan lego parçaları görülmektedir.



Şekil 2.15. ABS filament ile yazdırılmış lego parça örnekleri.

2.7.2. Bronzefill

Metalik tozlar ve PLA karışımı ile elde edilen malzemelerdir. Tozların etkisiyle PLA'ya göre çok daha ağırdırlar ve ısıyı daha iyi iletirler. Bu nedenle, davranış olarak plastikten çok metaldirler. Yüzey işleminden (cilalama ve eskitme gibi) geçtikten sonra bronz, pirinç veya bakırdan oyularak yapılmış hissi veren objelere dönüşmektedirler. Şekil 2.16. de bronz katkılı filament ile üretilen ve işlem uygulandıktan sonra nasıl bir değişimin görüldüğü model bize bu tarz katkılı filamentlerin çok kullanışlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.16. Bronzfill filament ile yazdırılmış parça örneği.

2.7.3. HIPS

Yüksek etkili polistiren veya HIPS, polistiren ve kauçuk bir malzemenin karışımıdır. Limonen çözeltisinde çözündüğü için, genellikle destek malzemesi olarak kullanılır, aşındırıcılar, kesici aletler veya baskınızı mükemmelleştirmeden daha az bırakan diğer şeyler yoluyla çıkarılması gereğini ortadan kaldırır. Limonen, limon kabukları ile hazırlanan bir çözeltidir ve kolayca elde edilir. Ne yazık ki bu, diğer materyaller limonen tarafından zarar gördüğünden ABS baskılarını desteklemek için kullanmanızı sınırlar.

HIPS, ABS'ye çok benzer, aslında daha güçlüdür. Dolayısıyla, bir destek malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra, kendi malzemesi olarak da çok yetenekli ve kullanışlıdır. HIPS kolayca boyanır, işlenebilir ve çok sayıda yapıştırıcı ile çalışır. Ayrıca gıda güvenliği, toksik olmayan, tamamen geri dönüştürülebilir ve hidroskobik değildir, yani nemli ortamlarda bozulmayacağı anlamına gelir. Şekil 2.17. de HIPS filament aracılığı ile yazdırılmış tek parça rulman görseli yer almaktadır.



Şekil 2.17. HIPS filament ile yazdırılmış parça örneği.

2.7.4. PETG

PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol), termoplastik bir malzemedir. Meşrubat, yiyecek ve içecek kapları, mutfak gereçleri, kurabiye kalıpları ve sentetik fiber gibi kullanım alanları vardır. ABS ve PLA'ya alternatif olan PETG, ABS'den daha güçlü ve esnek bir yapıya sahiptir. Basımı PLA gibi kolaydır ve tamamen geri dönüştürülebilir. Şekil 2.18. de günlük hayatta da sıklıkla kullandığımız PETG malzemesinin su şişesi olarak kullanıldığı bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 2.18. PETG filament ile üretilmiş şişe örneği.

2.7.5. PLA

PLA (Polylactic Acid), mısır nişastası ve şeker kamışından üretilen organik bir biyopolimer ve termoplastiktir. Bu nedenle, insan sağlığına zararlı değildir. ABS ile kıyaslandığında daha parlak bir görüntüye sahiptir. FDM teknolojisini kullanan bir 3B yazıcı PLA baskı yapabilir. 3B yazıcı dışında; bazı paketleme malzemeleri, streç filmler, plastik kaplar ve plastik su şişelerinde de bulunmaktadır. Şekil 2.19. de farklı renkte PLA filamentlerinin kullanılması ile yazdırılmış örnekler yer almaktadır.



Şekil 2.19. PLA filament ile yazdırılmış parça örnekleri.

2.7.6. PLAflex

PLAflex, dayanıklı kauçuk özelliklere sahip esnek bir filamenttir. Esnek olması gereken parçalar için kullanışlıdır, büküldüklerinde kırılmazlar ve dayanıklıdırlar. Standart PLA çok serttir ve bükülmez, ancak PLAflex malzemesi esnektir, darbelere dayanıklıdır ve birçok endüstriyel ve evsel uygulama için uygundur. PLAflex, esnek parçalar için en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Diğer esnek filamentlere karşı PLAflex filamentinin temel farkı güçlü ve dayanıklı olmasıdır.

PLAflex ile yazdırılan malzemeler, standart PLA' ya benzer. PLAflex, kauçuk veya TPE (termoplastik elastomer) ve saf beyaz bir kaplamaya benzer. Bu filament mısır gibi yenilenebilir kaynaklardan yapılmış bir biyoplastiktir, biyobozunurdur ve geleneksel 3B baskı malzemelerinin yarısından daha az bir karbon ayak izi vardır. Şekil 2.20. de PLAflex malzemesi kullanılarak üretilen esnek bir malzeme görseline yer verilmiştir.



Şekil 2.20. PLA flex filament ile yazdırılmış parça.

2.7.7. Polyflex™

PolyFlex™ yüksek kaliteli esnek malzemelerin bir ailesidir. Yüksek esneklik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için mükemmel çözüm sunar. PolyFlex™, çoğu masaüstü 3B yazıcıda çalışmak üzere özel olarak tasarlanmış termoplastik poliüretan (TPU) bazlı bir filamenttir. Orijinal uzunluğunun 3 katından fazla uzayabilir. Şekil 2.21. da PolyFlex™ filament ve bu filamentten üretilen parçalar görülmektedir.



Şekil 2.21. PolyFlex^{TM} filament ve yazdırılmış örnekler.

2.7.8. PP

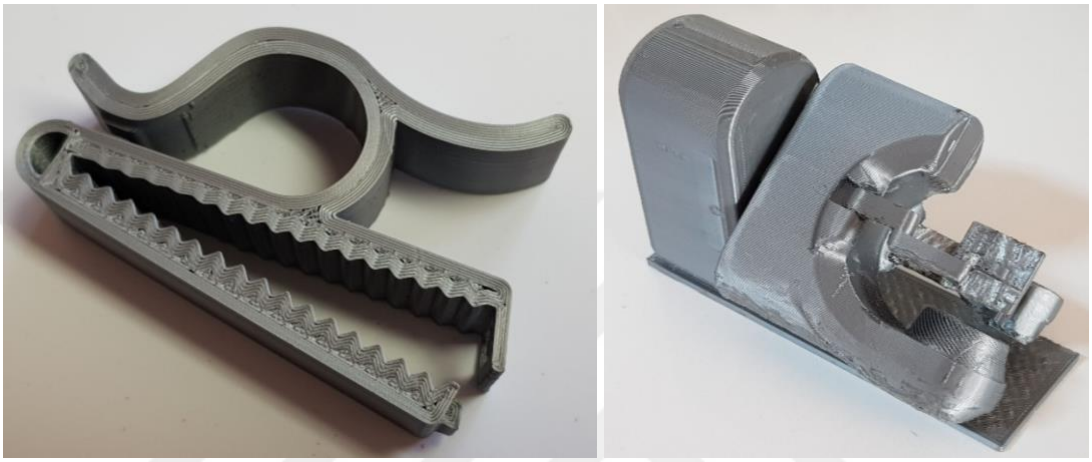
Polipropilen, otomotiv sanayinde kullanılan parçalardan, tekstil ve yiyecek paketlemesine kadar çok geniş kullanım alanı olan termoplastik bir polimerdir. Monomer propilenin polimer hale getirilmesi ile elde edilen polipropilen kimyasal solventlere karşı aşırı derecede dirençlidir. PP filament ile üretilen malzemelerin kullanım alanı Şekil 2.22. de görüldüğü gibi oldukça geniştir.



Şekil 2.22. PP filament ile yardırılmış örnekler.

2.7.9. STH

STH filament; bitkisel tabanlı, endüstriyel amaçla üretilmiş biyopolimerdir. ABS' den daha yüksek darbe dayanımı ve PLA' nın neredeyse iki katı ısı dayanımı sunar. Eşsiz yüzey kalitesi ve kolay baskı özellikleriyle ticari amaçlı sunulan en gelişmiş biyopolimerdir. Şekil 2.23. de STH filament kullanarak üretilmiş olan görseller yer almaktadır.



Şekil 2.23. STH filament ile yazdırılmış örnekler.

2.7.10. TPU

Termoplastik poliüretan malzeme (TPU), ısıtıldığında yumuşayan, soğutulduğunda sertleşebilen ve bu özellikleri ile ekstrüzyon, enjeksiyon gibi ısılişlem proseslerinde rahatça işlenebilen bir özelliğe sahiptir. Ayrıca, kendine has moleküler yapısı ile iyi bir performans gösterir ve formülasyonundaki polieter ve poliester yapılarının düzenlenebilmesi ile farklı kimyasal özellik ve dayanımlara da sahip olmaktadır. Şekil 2.24. de esnek filamentlerden olan TPU ile üretilmiş malzemeler görülmektedir.



Şekil 2.24. TPU filament ile yazdırılmış parça örneği.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzeme Tasarımı ve Modelleme

Radyoterapide kullanılan ticari bolus malzemesi, hemen hemen her tedavide kullanılmaktadır. Ancak ticari bolus malzemesi kullanılırken; yüzey pürüzlülüklerinden dolayı hastanın derisi ile aralarında oluşan hava boşluklarının ve ticari bolusun sahip olduğu sabit kalınlıktaki geometrisinin sebep olduğu hatalar gibi bazı sorunlar için, alternatif olabilecek bir malzeme tasarımı ve üretimi için bir adım attık. Bu çalışmada da standart olarak kullanılan ticari bolus malzemesinin yerine kullanılabilecek alternatif bir bolus benzeri materyal üretmek ve kullanmaktır. Üreteceğimiz bu alternatif malzemeler hem ucuz hem de istenilen geometrilerde elde edilebileceğinden kullanımı son derece rahat olacaktır.

Ticari bolus ile malzeme kıyaslanması için öncelikle ölçümlerini yapabileceğimiz örnekler oluşturduk. 10x10x1 cm boyutlarına sahip bolus malzemesi ile 10 farklı filamentten ürettiğimiz aynı ebatlara sahip malzemeleri Linac Cihazında ölçümlerini yaparak karşılaştırdık.

3.2. Kullanılan Cihazlar ve Özellikleri

3.2.1. Ölçüm Cihazları

Lineer Hızlandırıcı (Linac)

Ankara Ulus Numune Eğitim ve Araştırma Hastanesi'nde Radyasyon Onkolojisi bölümünde bulunan Varian Medikal Markalı Linac cihazı Şekil 3.1. 'de görülmektedir.

Linac çalışma mantığı; X-ışın tüpünde ısı yoluyla metal telden koparılan elektronlar, daha yüksek kinetik enerjili olabilmeleri için elektromanyetik alan içerisinde hızlanırlar. Bu yüksek enerjili elektronlar direkt olarak tedavide kullanılabileceği gibi bir hedefe çarptırılarak yüksek enerjili X-ışınları da elde edilebilir. Yüksek enerjili elektronların da belirli bir üst limiti vardır. Bunu kırmak için de Linac cihazlarında yüksek frekanslı manyetik dalga odacıkları kullanılır. Bu

şekilde (-) yüklü elektronların manyetik alandan etkilenerek hızlanması sonucu, daha yüksek kinetik enerji kazanmaları mümkün olur. Bu yüksek enerjili elektronlar ise tedavi sırasında istediğimiz derinliğe inerek tedavi yapmamızı sağlar.

Biz bu çalışmada bolus ve 10 farklı filamentten ürettiğimiz malzemeleri Linac cihazımızın çekim tablasına koyarak ve gerekli ayarlamaları yaparak ölçümler aldık.



Şekil 3.1. Linac cihazı.

İyon Odası

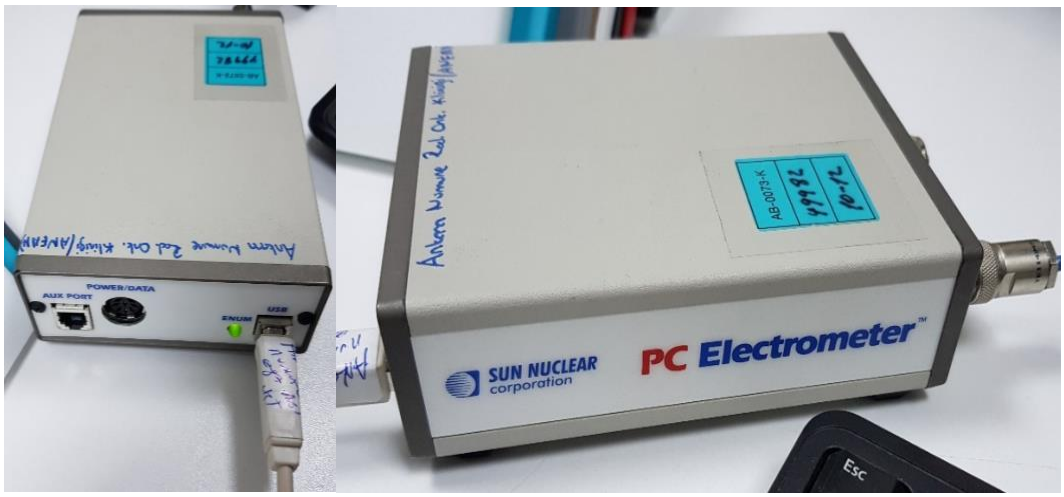
İyon odası, Linac cihazının verdiği dozu ölçmek için fantomların içerisine yerleştirilir ve o şekilde ölçümler alınır. Bu çalışmada kullandığımız PTW FREIBURG marka iyon odası Şekil 3.2. de görülmektedir.



Şekil 3.2. İyon odası.

Elektrometre

Linac ölçümlerine başladığımızda iyon odasından gelen verileri bilgisayara aktarmak için kullanılan SUN NUCLEAR marka elektrometre Şekil 3.3. de görülmektedir. Bu cihazın bir ucu iyon odasına diğer ucu ise bilgisayar kontrol sistemine bağlıdır. Bu sayede Linac cihazının hedefimize yani iyon odasına verdiği dozun ne kadar olduğunu bilgisayardan takip etmemizi ve doğruluğunu kontrol etmemizi sağlar.

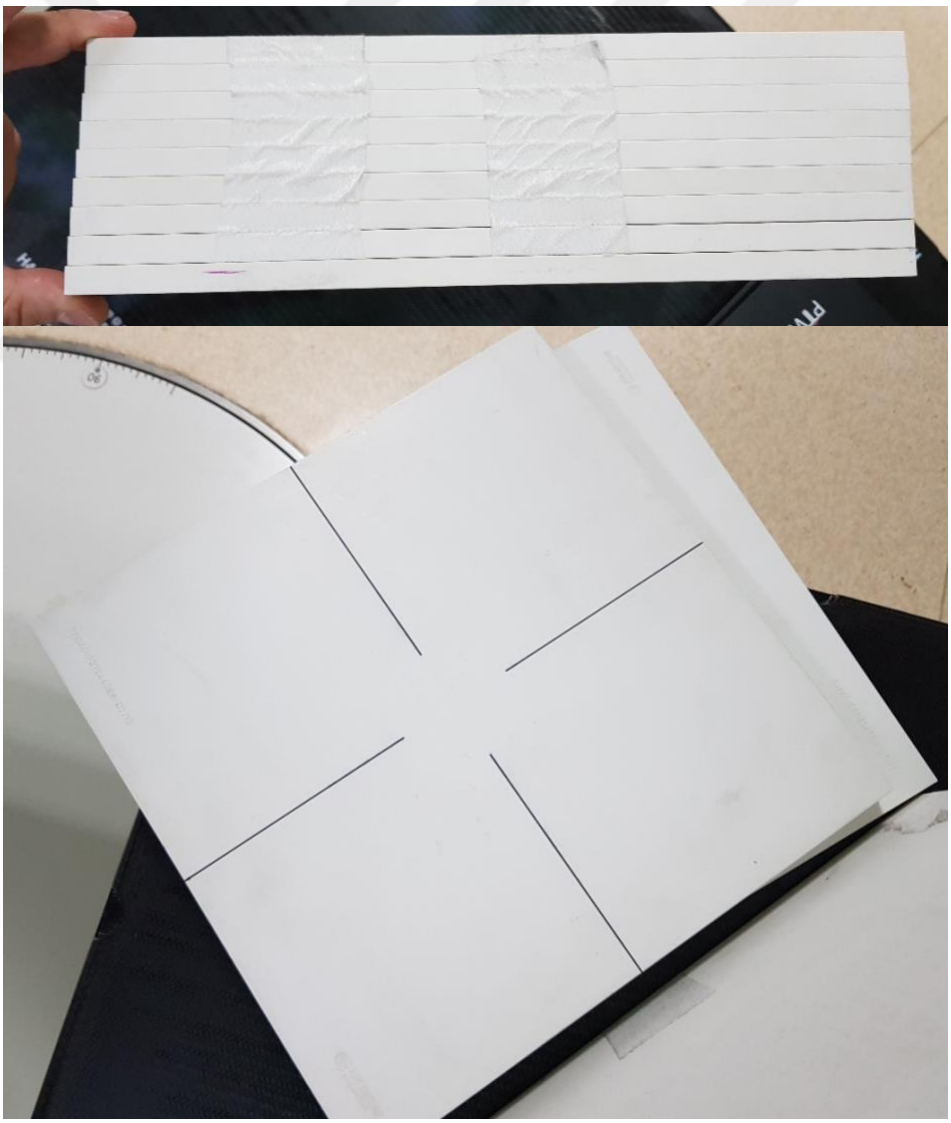


Şekil 3.3. Elektrometre.

Katı Su Fantomları

Çekimler sırasında hastalar üzerinde çalışmadığımız için, gerekli derinliği sağlamak amacıyla eşdeğer plakalar yani katı su fantomları kullanılmıştır. Biz bu çalışmamızda derinlik değerini 1cm ve 10 cm olarak belirleyerek ölçümler aldık.

Linac tedavilerinde hedef deri altında belirli bir derinlikte olduğundan dolayı çekimlerimizi yapmamız için o derinliğin bir şekilde yapay olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bu fantomlar sayesinde hedefimizi yani iyon odasını fantomların 10 cm altına yerleştirerek ölçümler aldık. Kullandığımız PTW FREIBURG marka RW3 model 30x30x1 cm'lik katı su fantomu görselleri Şekil 3.4. de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Rw3 katı su fantomu

Bilgisayar, Kontrol ve Takip Sistemi

Bu alan tüm aşamaların kontrol edildiği kısımdır. Normal bir tedavi sırasında hasta içerideyken uzaktan hastayı izleme, gerekli doz verilerinin girilmesi, süre planlaması ve Linac cihazının kontrolü bu kısımdan sağlanmaktadır. Bilgisayar sistemine gerekli veriler girilerek cihazın kontrolünü de yaptıktan sonra Linac odasının kapıları kapatılarak doz verme işlemi gerçekleşmektedir. Her çekim sırasında tüm güvenlik önlemleri alınarak işlemler tekrarlanır. Şekil 3.5. de bilgisayar, kontrol ve takip sistemi görülmektedir.



Şekil 3.5. Bilgisayar, kontrol ve takip sistemi.

3.2.2. 3B Yazıcılar

MassPortal Pharaoh ED

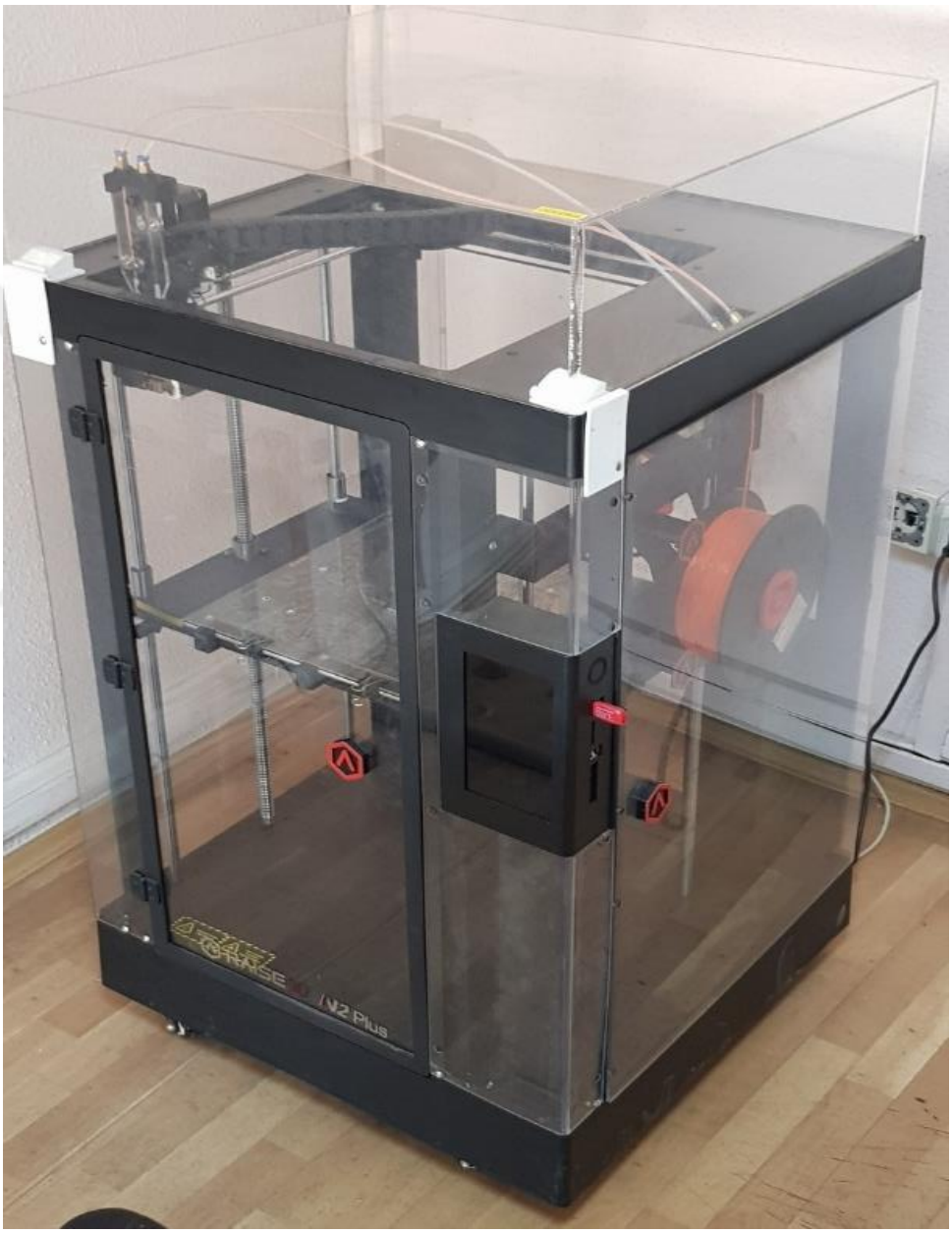
Parçaları üretmek için kullandığımız 3B yazıcıların birisi Şekil 3.6. da yer alan MassPortal marka Pharaoh ED sürümündeki yazıcıdır. Bu yazıcı FDM teknolojili ve tek beslemeli bir yazıcıdır. Diğer kullandığımız yazıcıya oranla daha hızlı bir yazıcı olup sert malzemelerin yazımında daha istikrarlı bir yazım sunmaktadır. 20 cm çapında ve 20 cm yükseklikteki parçaların yazımına uygun bir tablası olduğundan daha büyük parçaların yazımı için diğer yazıcı kullanılmaktadır.



Şekil 3.6. Massportal Pharaoh ED 3B yazıcı.

Raise3D N2 Plus

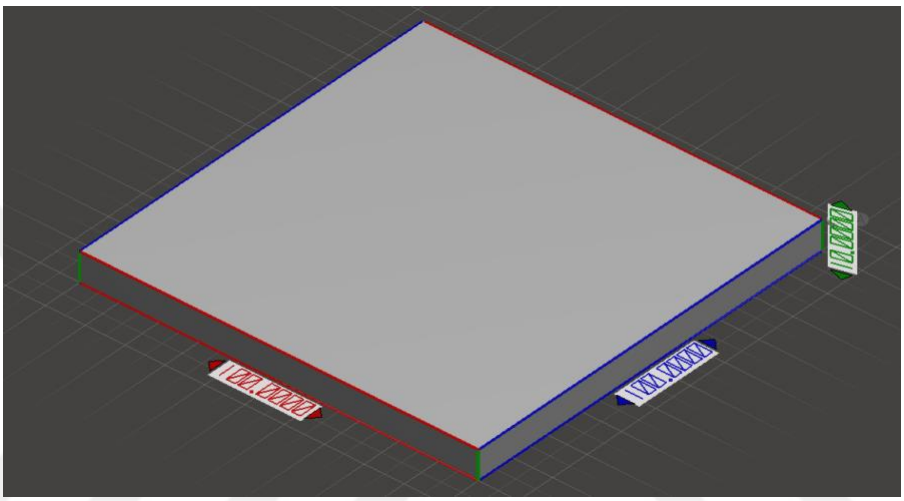
Genellikle esnek filamentlerin yazımı için kullandığımız Raise3D markasına ait N2 Plus sürümündeki yazıcı çift girişli FDM teknolojili bir yazıcıdır. Şekil 3.7. de de görüldüğü gibi 305x305x600 mm'lik boyutlarda yazım sehpasına sahip olduğundan dolayı büyük parçaların yazımı konusunda oldukça kullanışlıdır.



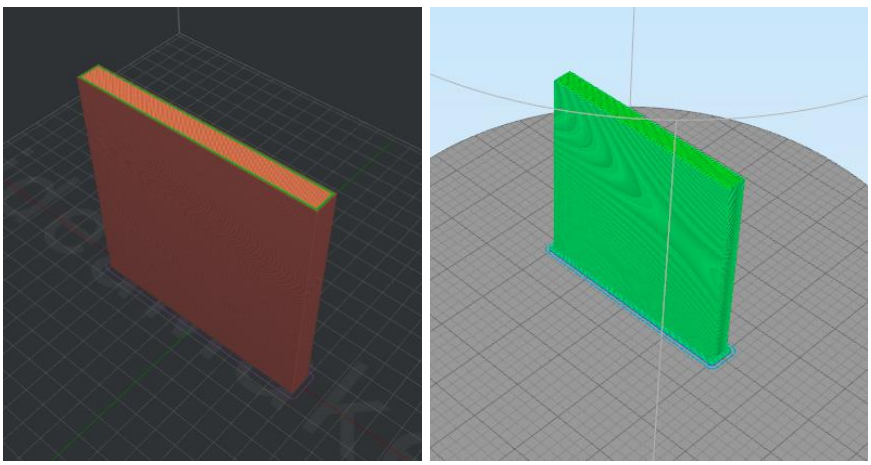
Şekil 3.7. Raise3D N2 Plus 3B yazıcı.

3.3. Parçaların Tasarımı ve Yazımı

İlk olarak linac cihazının ölçüm ayarlarına göre malzemeler tasarlamamız gerekliydi. Bunun için önceden aldığımız bilgiler doğrultusunda 100x100x10 mm boyutlarına sahip parçalar tasarladık. Bu tasarladığımız malzemelerin aynı zamanda tam dolu olması lazım ki bolus malzemesine eşdeğerliği test edebilelim. Bu bilgileri göz önünde bulundurarak tasarımlar yaptık. Şekil.3.8. de görseli yer alan parçaların tasarımını ve Şekil 3.9. da yer alan yazıma hazır hallerini görebilirsiniz.



Şekil 3.8. 100x100x10 mm Boyutlarındaki tasarlanan parça.



Şekil 3.9. Raise3D ve Massportal cihazlarındaki yazıma hazır görüntü.

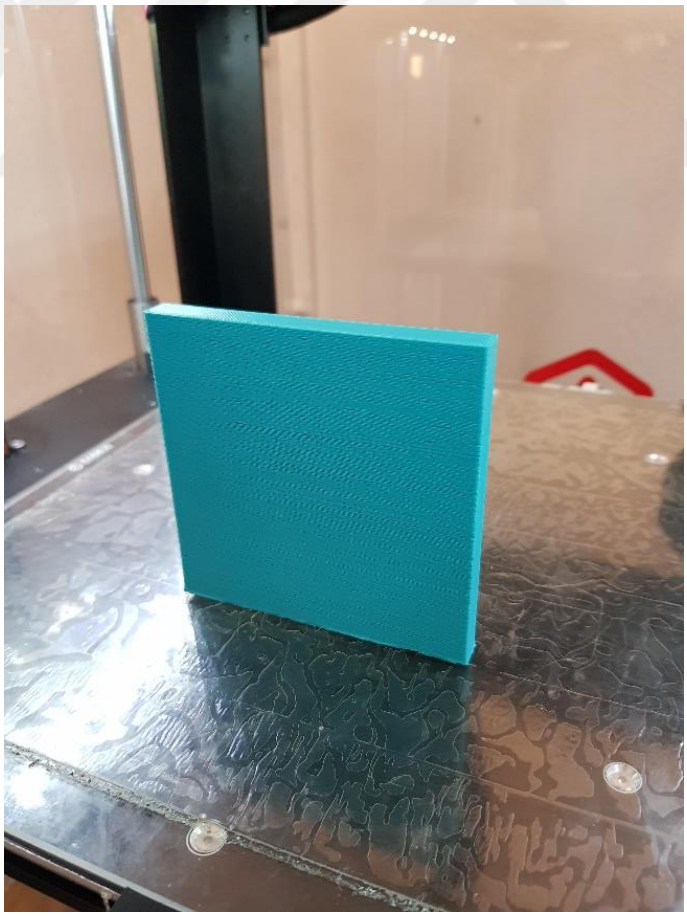
Parçaların yazımı için kullandığımız cihazların uç kalınlığı 0,4 mm dir ve sabittir. Şekil 3.8. deki tasarlanmış parçanın her filamente ait yazımı ve yazım özellikleri şu şekildedir;

3.3.1. ABS

ABS filament kullanarak ürettiğimiz parçanın yazım ayarlarının bulunduğu bilgiler Tablo 3.1. de görülmektedir.

Tablo 3.1. ABS filament yazım ayarları.

Yazım Yapılan Cihaz	Raise3D N2 Plus
Kullanılan Malzeme	ABS
Nozzle Sıcaklığı	250 °C
Taban Sıcaklığı	110 °C
Yazım Hızı	30 mm/s
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	3 mm
Doluluk Oranı	% 100
Destek Kullanımı	Yok
Tabanlık Kullanımı	Yok
Yazım Süresi	12 Saat 34 Dakika
Kullanılan Filament Miktarı	115,1 g



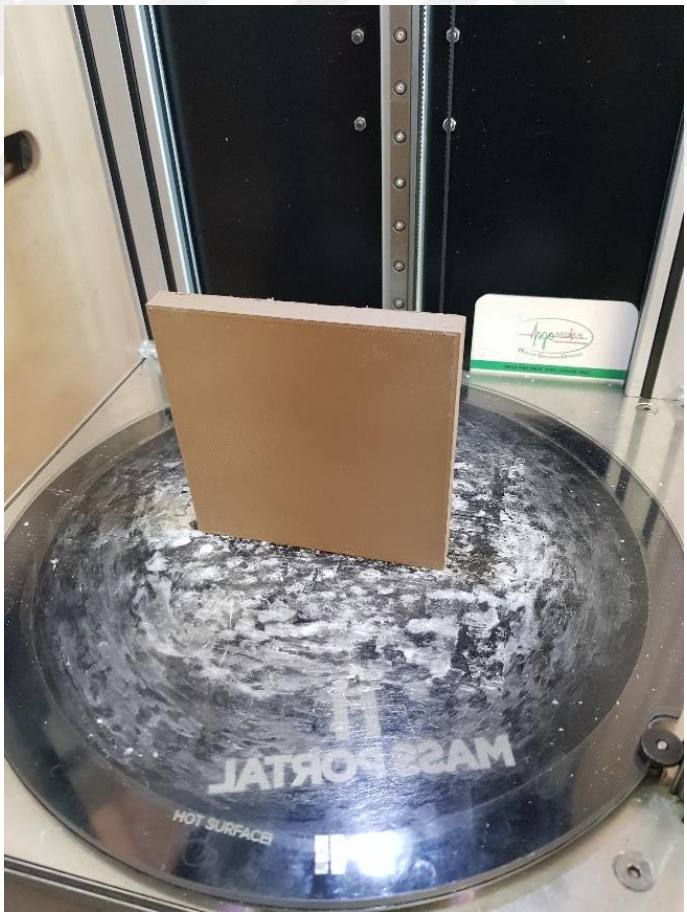
Şekil 3.10. ABS filamentten üretilen parça.

3.3.2. Bronzefill

Bronzefill filament kullanarak ürettiğimiz parçanın yazım ayarlarının bulunduğu bilgiler Tablo 3.2. de görülmektedir.

Tablo 3.2. Bronzefill filament yazım ayarları.

Yazım Yapılan Cihaz	MassPortal Pharaoh ED
Kullanılan Malzeme	Bronzefill
Nozzle Sıcaklığı	215 °C
Taban Sıcaklığı	65 °C
Yazım Hızı	40 mm/s
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	3 mm
Doluluk Oranı	% 100
Destek Kullanımı	Yok
Tabanlık Kullanımı	Yok
Yazım Süresi	8 Saat 57 Dakika
Kullanılan Filament Miktarı	125,37 g



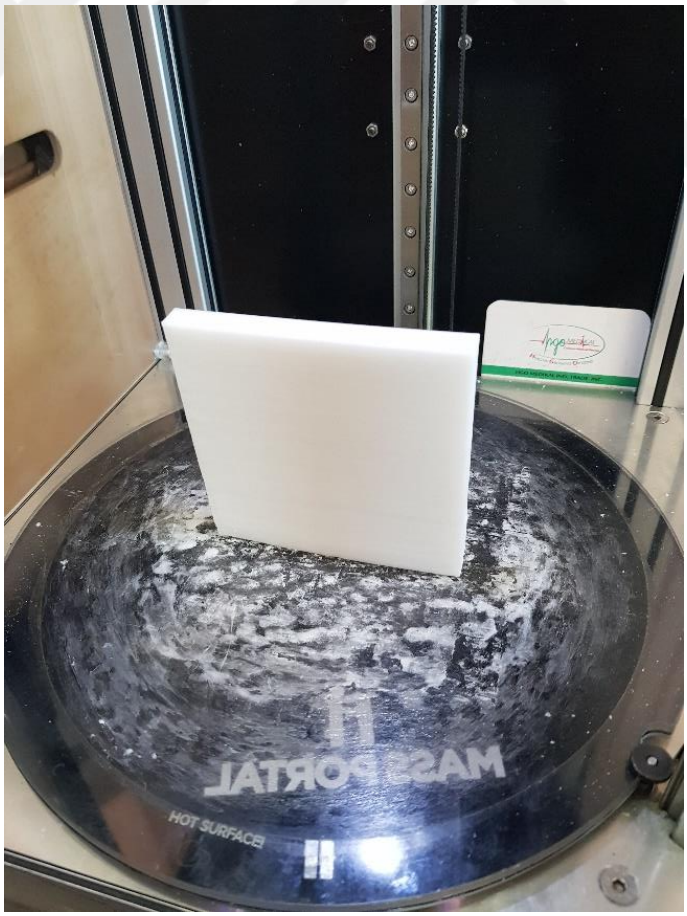
Şekil 3.11. Bronzefill filamentten üretilen parça.

3.3.3. HIPS

HIPS filament kullanarak ürettiğimiz parçanın yazım ayarlarının bulunduğu bilgiler Tablo 3.3. de görülmektedir.

Tablo 3.3. HIPS filament yazım ayarları.

Yazım Yapılan Cihaz	MassPortal Pharaoh ED
Kullanılan Malzeme	HIPS
Nozzle Sıcaklığı	245 °C
Taban Sıcaklığı	110 °C
Yazım Hızı	50 mm/s
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	3 mm
Doluluk Oranı	% 100
Destek Kullanımı	Yok
Tabanlık Kullanımı	Var
Yazım Süresi	7 Saat 30 Dakika
Kullanılan Filament Miktarı	91,36 g



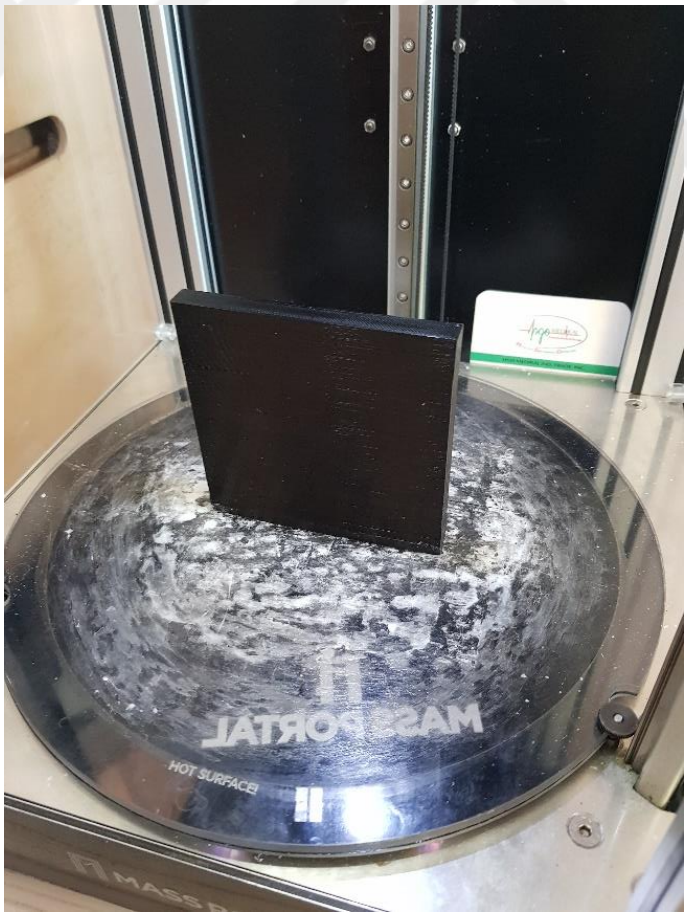
Şekil 3.12. HIPS filamentten üretilen parça.

3.3.4. PETG

PETG filament kullanarak ürettiğimiz parçanın yazım ayarlarının bulunduğu bilgiler Tablo 3.4. de görülmektedir.

Tablo 3.4. PETG filament yazım ayarları.

Yazım Yapılan Cihaz	MassPortal Pharaoh ED
Kullanılan Malzeme	PETG
Nozzle Sıcaklığı	255 °C
Taban Sıcaklığı	80 °C
Yazım Hızı	40 mm/s
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	3 mm
Doluluk Oranı	% 100
Destek Kullanımı	Yok
Tabanlık Kullanımı	Var
Yazım Süresi	12 Saat 14 Dakika
Kullanılan Filament Miktarı	126,54 g



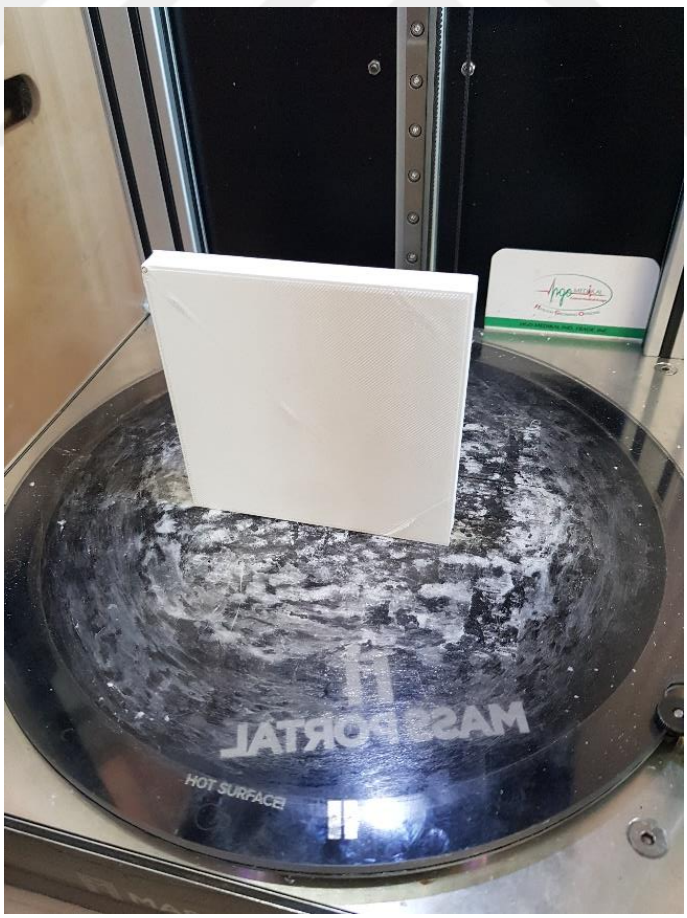
Şekil 3.13. PETG filamentten üretilen parça.

3.3.5. PLA

PLA filament kullanarak ürettiğimiz parçanın yazım ayarlarının bulunduğu bilgiler Tablo 3.5. de görülmektedir.

Tablo 3.5. PLA filament yazım özellikleri.

Yazım Yapılan Cihaz	MassPortal Pharaoh ED
Kullanılan Malzeme	PLA
Nozzle Sıcaklığı	210 °C
Taban Sıcaklığı	60 °C
Yazım Hızı	30 mm/s
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	3 mm
Doluluk Oranı	% 100
Destek Kullanımı	Yok
Tabanlık Kullanımı	Var
Yazım Süresi	12 Saat 2 Dakika
Kullanılan Filament Miktarı	124,2 g



Şekil 3.14. PLA filamentten üretilen parça.

3.3.6. PLAflex

PLAflex filament kullanarak ürettiğimiz parçanın yazım ayarlarının bulunduğu bilgiler Tablo 3.6. da görülmektedir.

Tablo 3.6. PLAflex filament yazım ayarları.

Yazım Yapılan Cihaz	MassPortal Pharaoh ED
Kullanılan Malzeme	PLAflex
Nozzle Sıcaklığı	215 °C
Taban Sıcaklığı	75 °C
Yazım Hızı	40 mm/s
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	3 mm
Doluluk Oranı	% 100
Destek Kullanımı	Yok
Tabanlık Kullanımı	Yok
Yazım Süresi	9 Saat 56 Dakika
Kullanılan Filament Miktarı	113,6 g



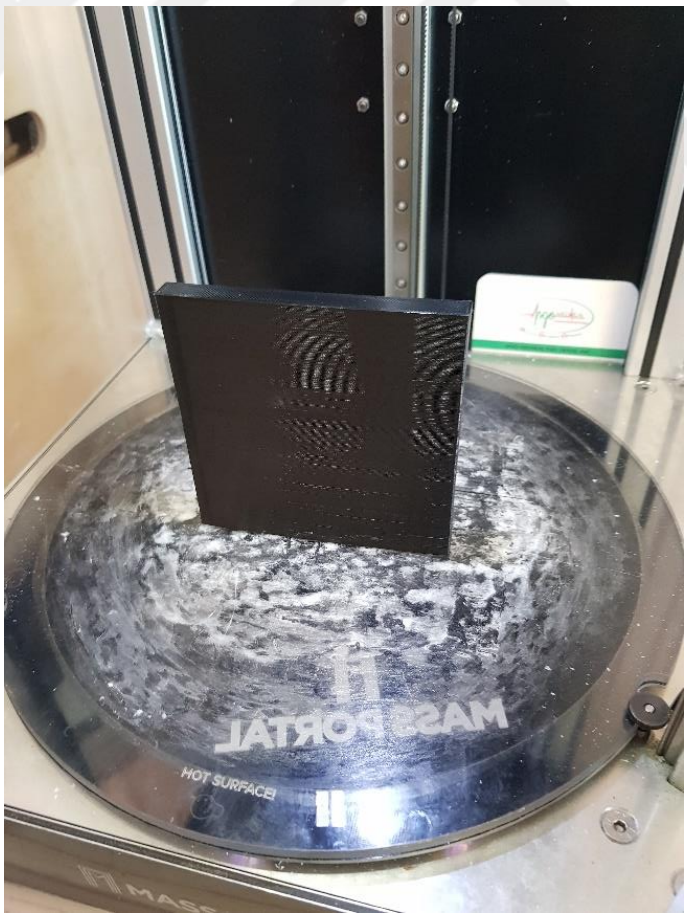
Şekil 3.15. PLAflex filamentten üretilen parça.

3.3.7. PolyFlex™

PolyFlex™ filament kullanarak ürettiğimiz parçanın yazım ayarlarının bulunduğu bilgiler Tablo 3.7. de görülmektedir.

Tablo 3.7. PolyFlex TM filament yazım ayarları.

Yazım Yapılan Cihaz	MassPortal Pharaoh ED
Kullanılan Malzeme	PolyFlex™
Nozzle Sıcaklığı	230 °C
Taban Sıcaklığı	75 °C
Yazım Hızı	30 mm/s
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	3 mm
Doluluk Oranı	% 100
Destek Kullanımı	Yok
Tabanlık Kullanımı	Var
Yazım Süresi	12 Saat 28 Dakika
Kullanılan Filament Miktarı	128,2 g



Şekil 3.16. PolyFlex™ filamentten üretilen parça.

3.3.8. PP

PP filament kullanarak ürettiğimiz parçanın yazım ayarlarının bulunduğu bilgiler Tablo 3.8. de görülmektedir.

Tablo 3.8. PP filament yazım ayarları.

Yazım Yapılan Cihaz	Raise3D N2 Plus
Kullanılan Malzeme	PP
Nozzle Sıcaklığı	230 °C
Taban Sıcaklığı	80 °C
Yazım Hızı	30 mm/s
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	3 mm
Doluluk Oranı	% 100
Destek Kullanımı	Yok
Tabanlık Kullanımı	Var
Yazım Süresi	11 Saat 49 Dakika
Kullanılan Filament Miktarı	117,1 g



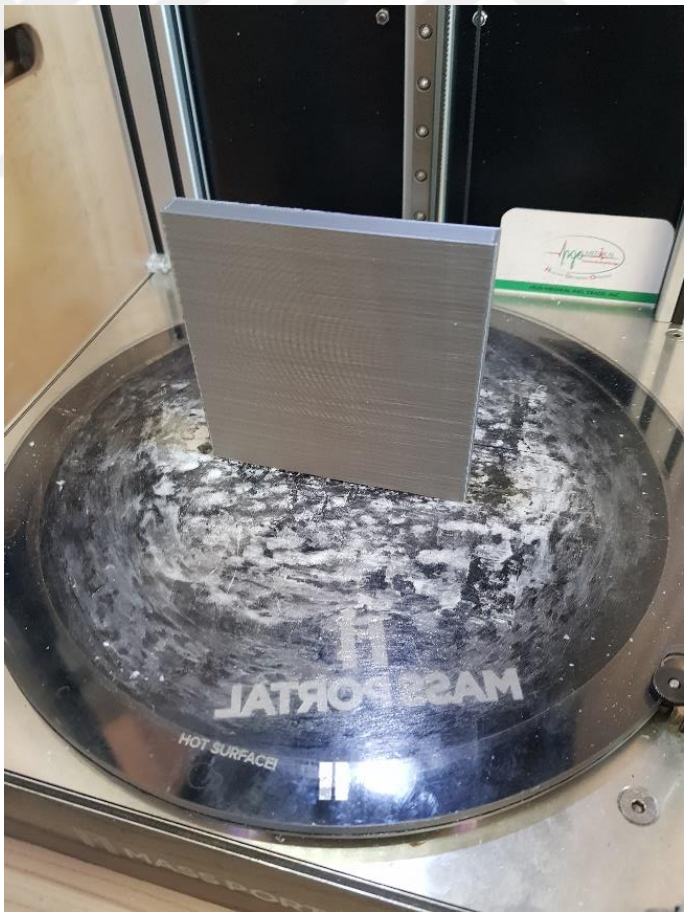
Şekil 3.17. PP filamentten üretilen parça.

3.3.9. STH

STH filament kullanarak ürettiğimiz parçanın yazım ayarlarının bulunduğu bilgiler Tablo 3.9. da görülmektedir.

Tablo 3.9. STH filament yazım ayarları.

Yazım Yapılan Cihaz	MassPortal Pharaoh ED
Kullanılan Malzeme	STH
Nozzle Sıcaklığı	200 °C
Taban Sıcaklığı	60 °C
Yazım Hızı	50 mm/s
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	3 mm
Doluluk Oranı	% 100
Destek Kullanımı	Yok
Tabanlık Kullanımı	Var
Yazım Süresi	7 Saat 30 Dakika
Kullanılan Filament Miktarı	91,4 g



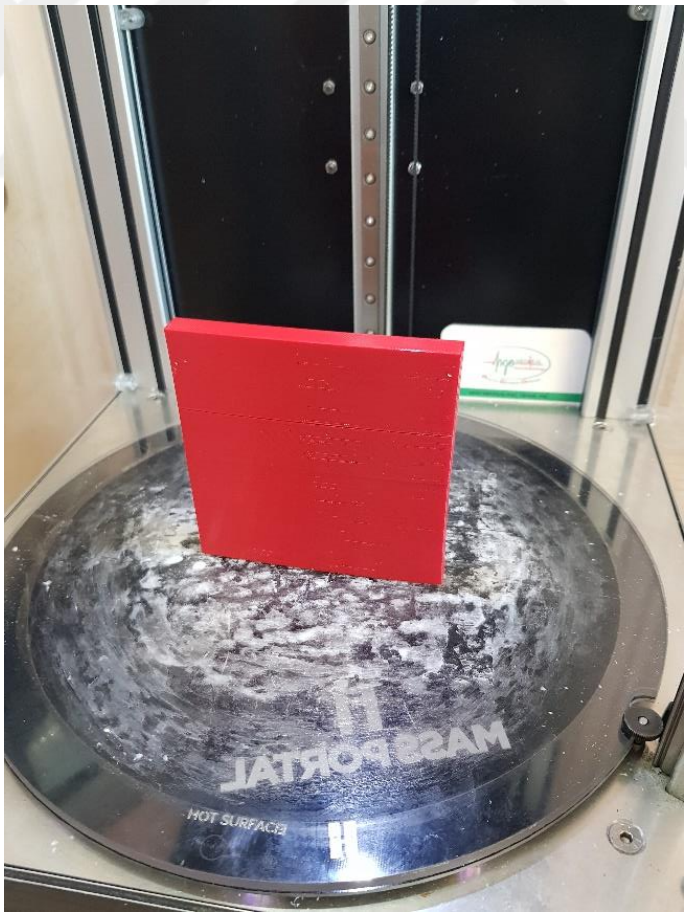
Şekil 3.18. STH filamentten üretilen parça.

3.3.10. TPU

TPU filament kullanarak ürettiğimiz parçanın yazım ayarlarının bulunduğu bilgiler Tablo 3.10. da görülmektedir.

Tablo 3.10. TPU filament yazım ayarları.

Yazım Yapılan Cihaz	Raise3D N2 Plus
Kullanılan Malzeme	TPU
Nozzle Sıcaklığı	235 °C
Taban Sıcaklığı	85 °C
Yazım Hızı	35 mm/s
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	3 mm
Doluluk Oranı	% 100
Destek Kullanımı	Yok
Tabanlık Kullanımı	Yok
Yazım Süresi	9 Saat 21 Dakika
Kullanılan Filament Miktarı	128,2 g



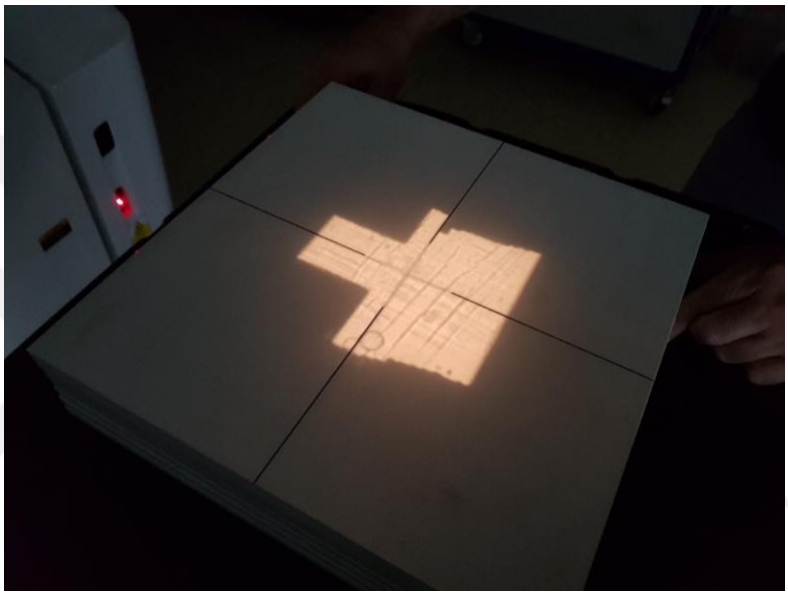
Şekil 3.19. TPU filamentten üretilen parça.



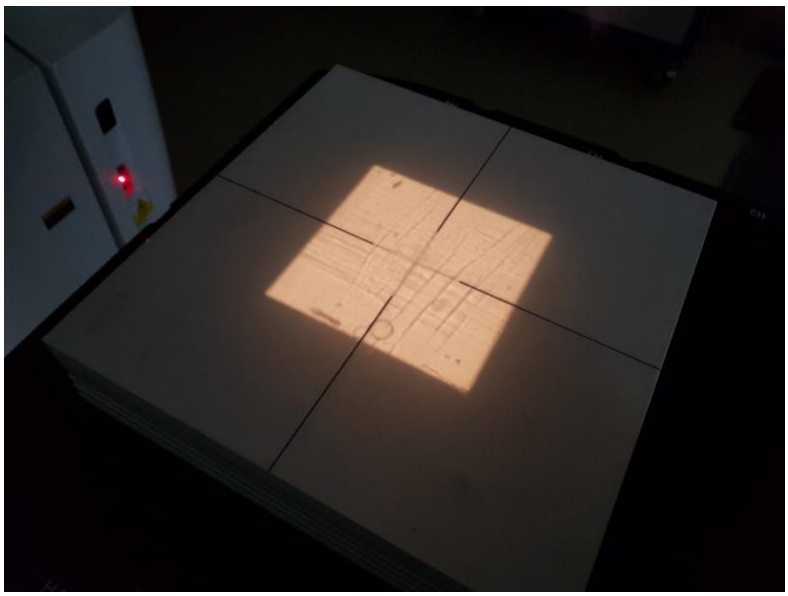
Şekil 3.20. 10 Farklı filamentten üretilen parçalar ve standart bolus malzemesi.

3.4. Linac Ölçümleri ve Değerlendirme

Tüm parçaların yazımı tamamlandıktan sonra linac cihazına deney düzeneğini kurduk. Linac cihazında bulunan kolimatörleri Şekil 3.21. daki gibi kapalı konumdan Şekil 3.22. deki gibi en açık konuma getirdik. Kolimatörlerin kapalı olmasının sebebi bir önceki tedavide, tedaviye uygun şekilde kapatılıp açılmasıdır. Deneyimize başlamadan önce 10x10 cm'lik alanı tam sağlamak amacı ile tüm kolimatörleri açık hale getirdik.

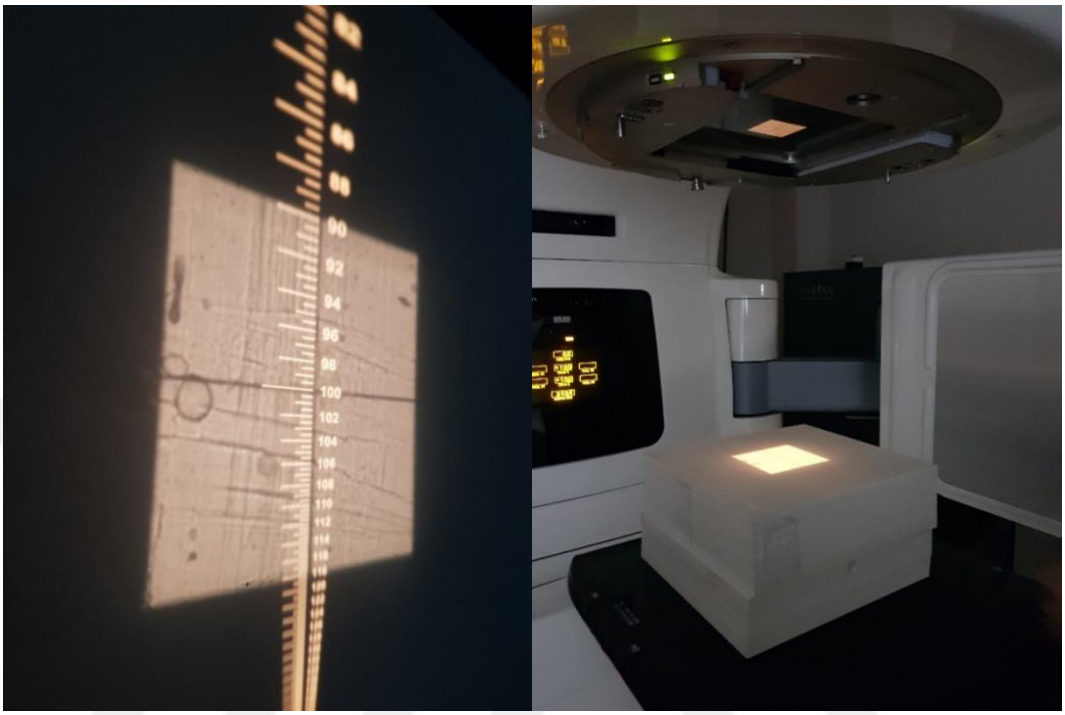


Şekil 3.21. Kolimatörlerin kapalı hali.



Şekil 3.22. Kolimatörlerin açık hali.

Daha sonra Şekil 3.23. de görüldüğü gibi kaynak-hedef arası mesafeyi (SSD) 100 cm ye ayarladık. Bunun sebebi ölçümlerimizi belirli bir referansa göre yapmaktır.



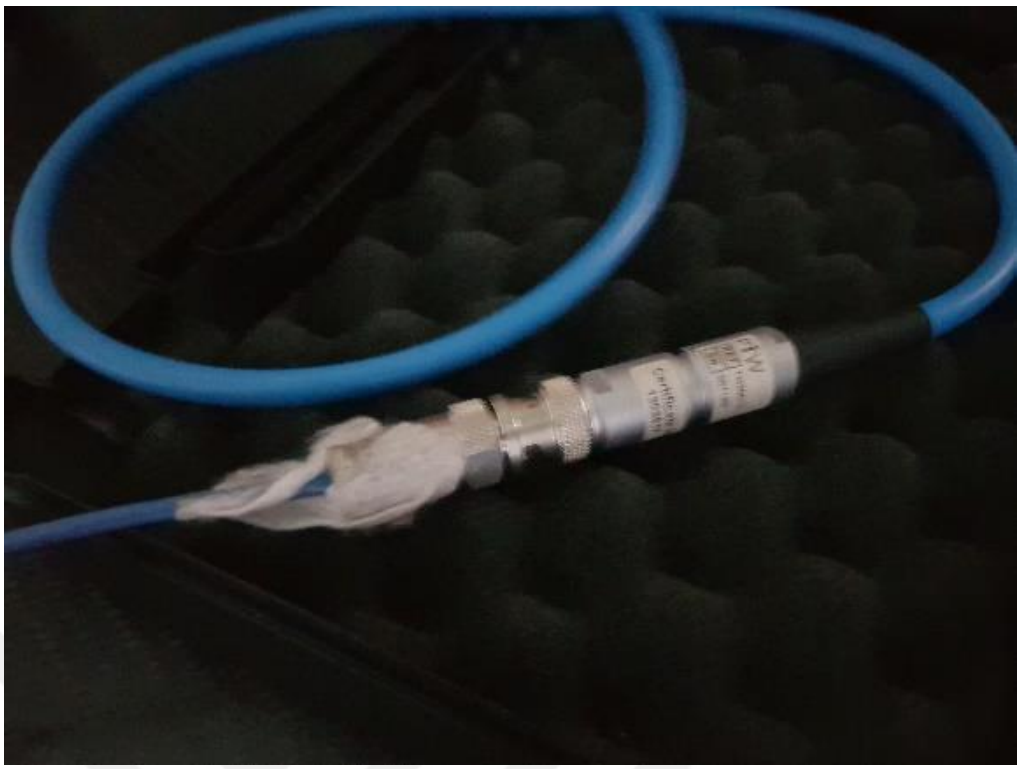
Şekil 3.23. SSD mesafesinin 100 cm ye ayarlanması.

SSD ayarı yapıldıktan sonra katı su fantomlarımızın içerisine Şekil 3.24. deki gibi iyon odasını yerleştirdik.



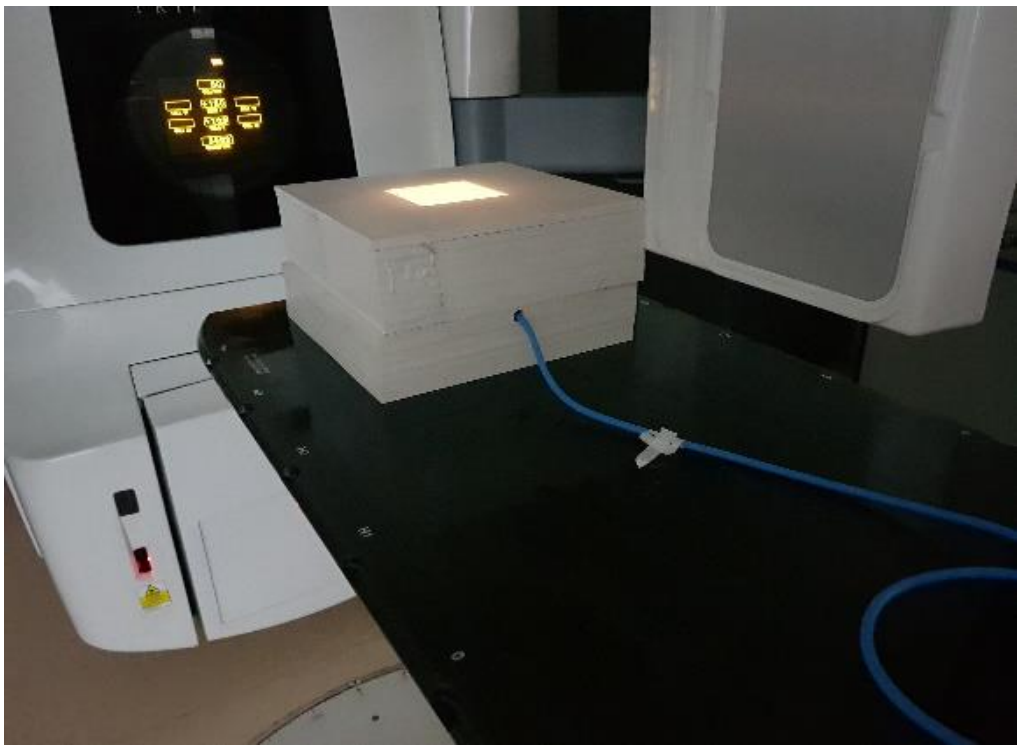
Şekil 3.24. Katı su fantomlarının içerisine iyon odasının yerleştirilmesi.

Fantomlarımızın içerisine iyon odasını yerleştirdikten sonra, Şekil 3.25. deki gibi iyon odasının elektrometre ile olan bağlantısını yaparak düzeneğimizi tamamladık.



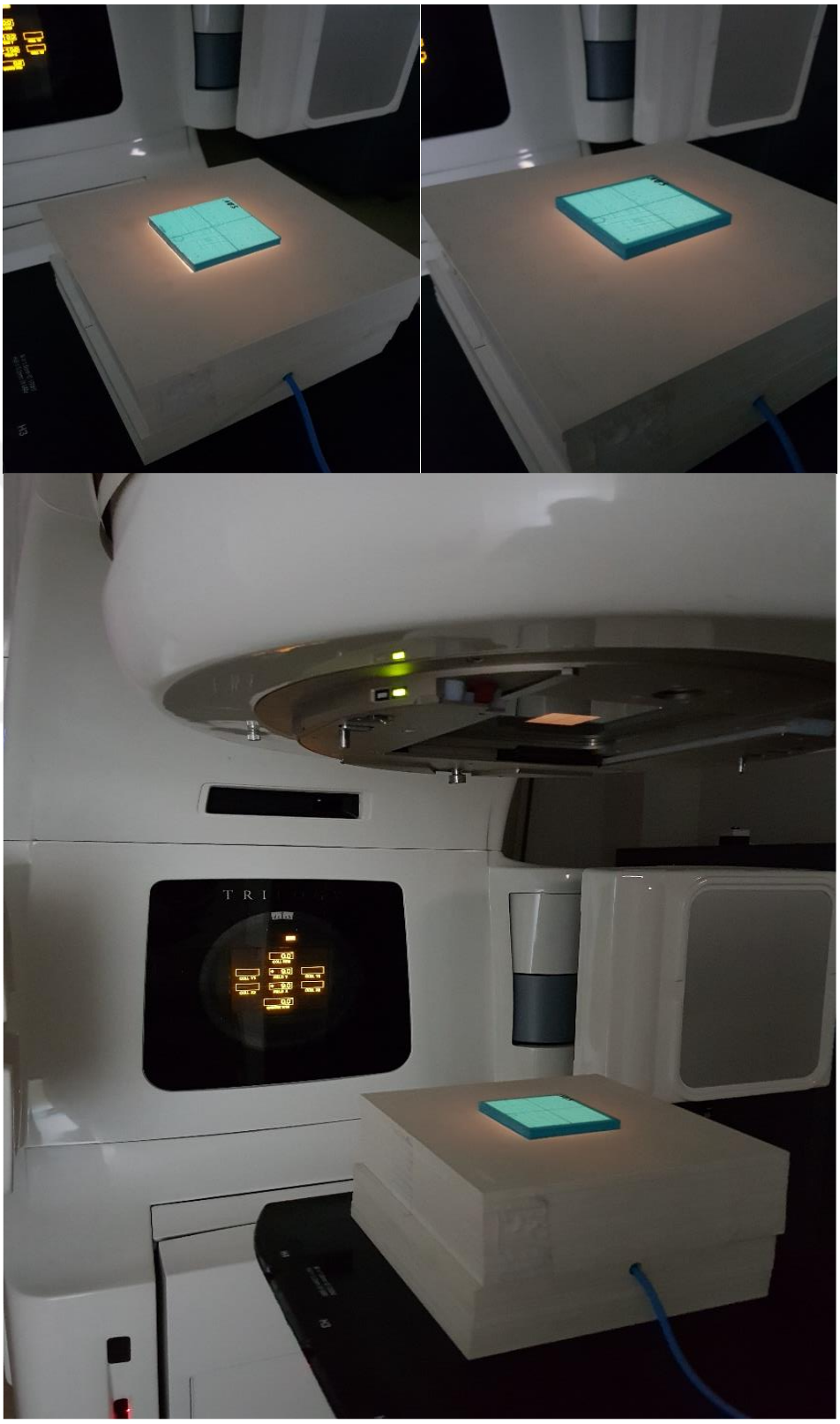
Şekil 3.25. İyon odası ile elektrometrenin bağlantısı.

Tüm ayarlamalar ve bağlantılar yapıldıktan sonra deney düzeneğimiz hazırlandı. Şekil 3.26. deki gibi deney düzeneğimizi kurduk.



Şekil 3.26. Deney düzeneğinin kurulmuş hali.

Daha sonra ilk parçamız olan ABS filamentten ürettiğimiz malzemeyi Linac düzeneğine Şekil 3.27. deki gibi yerleştirerek ölçümlere başladık.



Şekil 3.27. ABS filamentten üretilen parçanın ölçümleri için hazırlık.

3.5. Tüm Verilerin Toplanması

Foton kullanılarak sabit değerlerimiz olan SSD mesafesi 100 cm, enerji 6 MV ve doz 100 MU olarak ayarladık. Şekil 3.28. da ayar görselleri yer almaktadır.



Şekil 3.28. Linac cihazı ayar görselleri.

En başta herhangi bir malzeme olmadan sadece katı su fantomları var iken bir çekim yaptık. Bunun sebebi hem havanın değerini ölçmek hem de diğer filamentlerden ürettiğimiz malzemeler gibi ticari bolus ile kıyaslamaktır.

Boş çekim yaptıktan sonra ticari olarak kullanılan bolus malzemesini yüzeye yerleştirdik ve çekimlerini yaptık. Daha sonra sırasıyla ürettiğimiz tüm malzemelerin

çekimlerini yaptık ve her birinin verilerini kayıt altına aldık. Her malzeme için 3 adet çekim yaptık. Bu şekilde 3 çekimin ortalamasını alarak verilerin tamamını kaydettik.

Daha sonra 10x10 cm olan alanı 5x5 cm olarak belirledik ve bu şekilde 3 malzemeden 3 er adet ölçümler aldık. Bu şekilde alan bağımlılığını test etmiş olduk. 5x5 cm olan alan üzerinde daha sonra 2 malzeme ile d uzaklığını 10 cm'den 1 cm ye düşürerek derinlik ile değişimleri izledik.

6 MV enerji ile yaptığımız ölçümleri bir de 18 MV ile yapmaya karar vermiştik ancak hem aldığımız veriler sonucunda hem de önceki çalışmalarda enerji değişiminin herhangi bir şey değiştirmeyeceğinden bu ölçümleri yapmaya gerek duymadık (6).

Tüm ölçümleri ticari olarak kullanılan bolus malzemesi ile kıyaslayarak sonuçları değerlendirdik.

4. BULGULAR

4.1. Bolus Verileri

Linac cihazında ticari bolus dâhil toplamda 11 malzeme ile çekimler yaptık. Ölçümlerimizin sonuçlarını nanoCoulomb (nC) olarak göreceğiz. Derinliği d=10 cm ve ölçüm alanını 10x10 cm olarak belirlediğimiz düzeneği "STANDART" olarak adlandırdık. Bunun sebebi bu tez çalışmamızda standart ölçümlerin yanı sıra aynı zamanda alanın etkisini ölçmek için Bolus, PLA ve STH kullanarak; derinliğin de etkisini ölçmek için Bolus ve STH kullanarak denemeler yapılmıştır.

Bu arada alan bağımlılığını ölçmek için yalnızca 2 filamentten ürettiğimiz parçaları ve bolus malzemesini kullanmamızın sebebi; standart ölçümlerde yaptığımız ölçümlerin bize referans olmasıdır. Yani standart ölçümlerden elde ettiğimiz verilerden yararlanarak alan bağımlılığı için yaptığımız ölçümleri oranladık ve ürettiğimiz malzemelerin tamamının ölçümünün bir anlam taşımadığına, yalnızca kıyaslama yapmak için 2 paçanın yeterli olacağına kanaat getirdik. Aynı şekilde derinlik değerini ölçmek için de 1 malzeme kullanmamız da bu sebeptendir. Cihazın hata payı ±%1 olarak göz önüne alınmıştır.

Bolus malzemesi ile yapılan, standart ölçüm sonuçları Tablo 4.1. de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Bolus ile yapılan standart ölçümlerin sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
Bolus	1,03 g/cm³	10,456	10,452
		10,448	
		10,451	

Daha sonra bolus malzemesi ile mesafe sabit tutularak ölçüm alanının 5x5 cm olarak değiştirilmesi ile ölçümler tekrarlanmıştır. Bu sayede ölçümlerimizin alana bağımlılığını test etmiş olduk. Tablo 4.2. de alan bağımlılığına dair ölçümlerin sonuçları yer almaktadır.

Tablo 4.2. Bolusun alan bağımlılığı için yapılan 5x5 cm'lik ölçümler.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 5x5 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
Bolus	1,03 g/cm³	9,473	9,466
		9,461	
		9,464	

Alan bağımlılığı için ölçümler yapıldıktan sonra son olarak da derinlik değerini değiştirerek ölçümler yaptık. Bolus malzemesinin derinliğe bağlı olarak değerlerin değişip değişmediğini test etmek için yaptığımız ölçümlerin sonuçları da Tablo 4.3. de yer almaktadır.

Tablo 4.3. Bolusun derinlik değeri için yapılan ölçümler.

d = 1 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 5x5 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
Bolus	1,03 g/cm³	15,850	15,850

4.2. Filament Verileri

4.2.1. ABS

ABS filament kullanarak ürettiğimiz parçanın standart ölçümlerinin sonuçları Tablo 4.4. de gösterilmiştir.

Tablo 4.4. ABS ile yapılan standart ölçüm sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
ABS	1,04 g/cm³	10,524	10,535
		10,549	
		10,531	

4.2.2. Bronzefill

Bronzefill filament kullanarak ürettiğimiz parçanın standart ölçümlerinin sonuçları Tablo 4.5. de gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Bronzefill ile yapılan standart ölçüm sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
Bronzefill	2 - 4 g/cm³	9,697	9,693
		9,692	
		9,689	

4.2.3. HIPS

HIPS filament kullanarak ürettiğimiz parçanın standart ölçümlerinin sonuçları Tablo.16 da gösterilmiştir.

Tablo 4.6. HIPS ile yapılan standart ölçüm sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
HIPS	1,03 - 1,04 g/cm³	10,556	10,555
		10,554	
		10,555	

4.2.4. PETG

PETG filament kullanarak ürettiğimiz parçanın standart ölçümlerinin sonuçları Tablo 4.7 de gösterilmiştir.

Tablo 4.7. PETG ile yapılan standart ölçüm sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
PETG	1,23 g/cm³	10,492	10,487
		10,484	
		10,485	

4.2.5. PLA

PLA filament kullanarak ürettiğimiz parçanın standart ölçümlerinin sonuçları Tablo 4.8 de gösterilmiştir.

Tablo 4.8. PLA ile yapılan standart ölçüm sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
PLA	1,24 g/cm³	10,486	10,485
		10,484	
		10,485	

PLA filament kullanarak ürettiğimiz parçanın, alana bağımlığı test etmek için yaptığımız ölçüm sonuçları Tablo 4.9 da gösterilmiştir.

Tablo 4.9. PLA filamentin alan bağımlılığı için yapılan 5x5 cm'lik ölçümler.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 5x5** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
PLA	1,24 g/cm³	9,488	9,488
		9,486	
		9,489	

4.2.6. PLA Flex

PLAflex filament kullanarak ürettiğimiz parçanın standart ölçümlerinin sonuçları Tablo 4.10. da gösterilmiştir.

Tablo 4.10. PLAflex filament ile yapılan standart ölçüm sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
PLAflex	1,19 - 1,23 g/cm³	10,541	10,539
		10,538	
		10,537	

4.2.7. PolyFlex™

PolyFlex™ filament kullanarak ürettiğimiz parçanın standart ölçümlerinin sonuçları Tablo 4.11. de gösterilmiştir.

Tablo 4.11. PolyFlex™ filament ile yapılan standart ölçüm sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
PolyFlex ™	1,19 - 1,23 g/cm³	10,499	10,498
		10,496	
		10,499	

4.2.8. PP

PP filament kullanarak ürettiğimiz parçanın standart ölçümlerinin sonuçları Tablo 4.12. de gösterilmiştir.

Tablo 4.12. PP filament ile yapılan standart ölçüm sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
PP	0,9 g/cm³	10,604	10,600
		10,596	
		10,600	

4.2.9. STH

STH filament kullanarak ürettiğimiz parçanın standart ölçümlerinin sonuçları Tablo 4.13. de gösterilmiştir.

Tablo 4.13. STH filament ile yapılan standart ölçüm sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
STH	1,10 g/cm³	10,508	10,506
		10,506	
		10,504	

STH filament kullanarak ürettiğimiz parçanın, alana bağımlığı test etmek için yaptığımız ölçüm sonuçları Tablo 4.14. de gösterilmiştir.

Tablo 4.14. STH Filamentin alan bağımlılığı için yapılan 5x5 cm'lik ölçümler.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 5x5** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
STH	1,10 g/cm³	9,503	9,498
		9,501	
		9,489	

STH filamentten üretilen malzemenin derinliğe bağlı olarak değerlerinin değişip değişmediğini test etmek için yaptığımız ölçümlerin sonuçları da Tablo 4.15. de yer almaktadır.

Tablo 4.15. STH filamentin derinlik değeri için yapılan ölçümler.

d = 1 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 5x5** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
STH	1,10 g/cm³	15,960	15,960

4.2.10. TPU

TPU filament kullanarak ürettiğimiz parçanın standart ölçümlerinin sonuçları Tablo 4.16 da gösterilmiştir.

Tablo 4.16. TPU filament ile yapılan standart ölçüm sonuçları.

d = 10 cm			
Çekim Yapılan Malzeme	Malzeme Yoğunluğu	**Alan: 10x10 cm** (nC) **±%1**	Ortalama (nC)
TPU	1,19 - 1,23 g/cm³	10,513	10,507
		10,499	
		10,509	

4.3. Bolus ile Diğer Filament Verilerinin Karşılaştırılması

Tüm ölçümler tamamlandıktan sonra standart olarak yaptığımız ölçümlerin bolus malzemesine oranlı olarak karşılaştırılmasını gösteren Tablo 4.17. aşağıda yer almaktadır.

Tablo 4.17. Bolus ile diğer filamentlerden üretilen malzemelerin standart ölçümlerinin karşılaştırılması.

d = 10 cm					
Çekim Yapılan Malzeme	**Malzeme Yoğunluğu**	**Alan: 10x10 cm (nC) ±%1**	**10x10 cm Ortalama (nC)**	**1/Boşluk (nC)**	**% Fark**
Boş	-	10,944	10,944	1,000	100,00%
Bolus	1,03 g/cm³	10,456	10,452	0,955	95,50%
		10,448			
		10,451			
ABS	1,04 g/cm³	10,524	10,535	0,963	96,26%
		10,549			
		10,531			
Bronzefill	2 - 4 g/cm³	9,697	9,693	0,886	88,57%
		9,692			
		9,689			
HIPS	1,03 - 1,04 g/cm³	10,556	10,555	0,964	96,45%
		10,554			
		10,555			
PetG	1,23 g/cm³	10,492	10,487	0,958	95,82%
		10,484			
		10,485			
PLA	1,24 g/cm³	10,486	10,485	0,958	95,81%
		10,484			
		10,485			
PLA Flex	1,19 - 1,23 g/cm³	10,541	10,539	0,963	96,30%
		10,538			
		10,537			
Polyflex™	1,19 - 1,23 g/cm³	10,499	10,498	0,959	95,92%
		10,496			
		10,499			
PP	0,9 g/cm³	10,604	10,600	0,969	96,86%
		10,596			
		10,600			
STH	1,10 g/cm³	10,508	10,506	0,960	96,00%
		10,506			
		10,504			
TPU	1,19 - 1,23 g/cm³	10,513	10,507	0,960	96,01%
		10,499			
		10,509			

Tablo 4.18. Bolus, PLA ve STH filamentin alan bağımlılığı için yapılan 5x5 cm'lik ölçümler.

d = 10 cm					
Çekim Yapılan Malzeme	**Malzeme Yoğunluğu**	**Alan: 5x5 cm (nC) ±%1**	**5x5 cm Ortalama (nC)**	**1/Boşluk (nC)**	**% Fark**
Boş	-	10,944	10,944	1,000	100,00%
Bolus	1,03 g/cm³	9,473	9,466	0,865	86,49%
		9,461			
		9,464			
PLA	1,24 g/cm³	9,488	9,488	0,867	86,69%
		9,486			
		9,489			
STH	1,10 g/cm³	9,503	9,498	0,868	86,78%
		9,501			
		9,489			

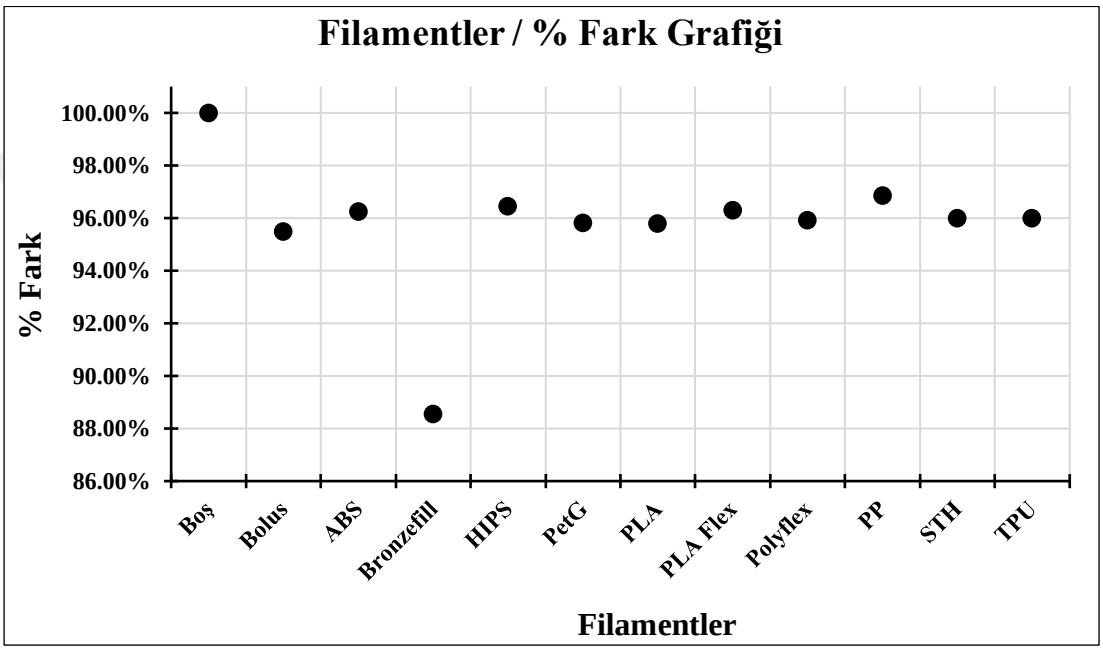
Tablo 4.19. Bolus ve STH filamentin derinlik değeri için yapılan ölçümler.

d = 1 cm					
Çekim Yapılan Malzeme	**Malzeme Yoğunluğu**	**Alan: 5x5 cm (nC) ±%1**	**5x5 cm Ortalama (nC)**	**1/Boşluk (nC)**	**% Fark**
Boş	-	10,944	10,944	1,000	100,00%
Bolus	1,03 g/cm³	15,850	15,850	1,448	144,83%
STH	1,10 g/cm³	15,960	15,960	1,458	145,83%

5. TARTIŞMA

5.1. Standart Ölçüm Sonucu

Tüm verileri elde ettikten sonra gerekli hesaplamaları yaparak vardığımız sonuçlara göre standart ölçümler sonucunda oluşan Filamentler / % Fark grafiği Şekil 5.1. de yer almaktadır.



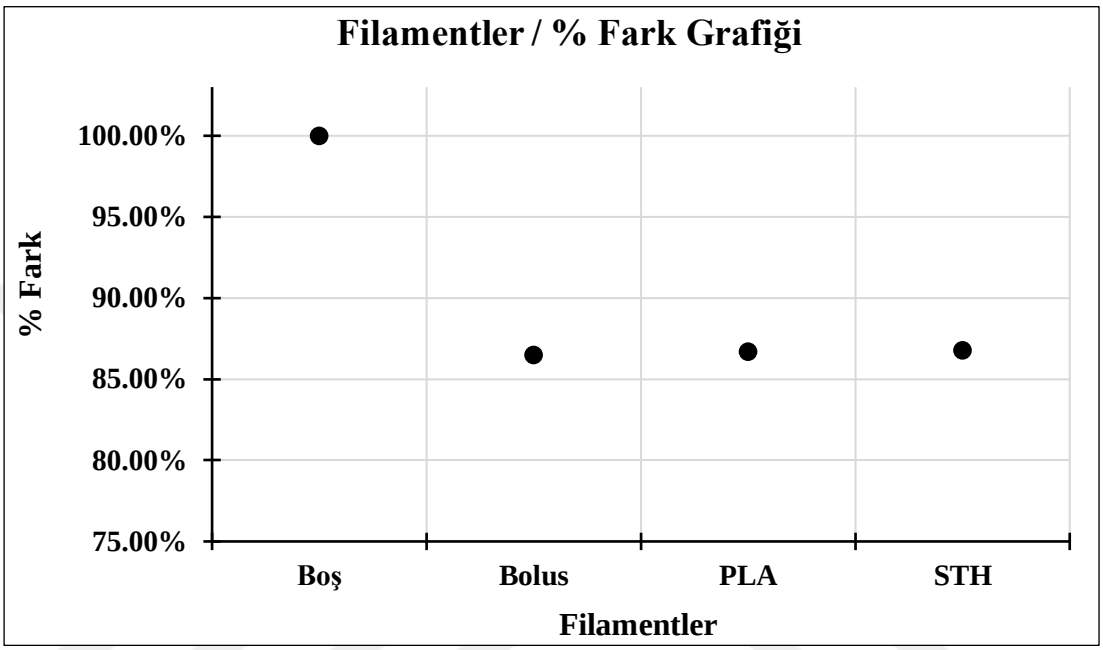
Şekil 5.1. Standart ölçüm sonuçlarının oran grafiği.

Standart ölçümler sonucunda boşlukta hedefe ulaşan doz miktarını Şekil 5.1. de görüldüğü üzere % 100 olarak belirlediğimizde, ticari olarak kullanılan bolusun ve ürettiğimiz alternatif bolus malzemelerinin boşluğa oranla % 96 civarında seyrettiği; bronzefill filamentinin ise % 88 civarında bir sonuç verdiği görülmektedir.

Ürettiğimiz alternatif bolus malzemeleri, ticari bolus malzemesinden %0.3 – %1.4 aralığında farklılık gösterdiği ve bronzefill filamentin de bolusa benzerliğinin %7 gibi bir orana sahip olunduğu gözlemlenmiştir.

5.2. Alana Bağlı Ölçüm Sonucu

Standart ölçümler sonrasında alana bağlı değişimleri gözlemlemek amacı ile yaptığımız ölçümler sonucunda oluşan Filamentler / % Fark grafiği Şekil 5.2. de yer almaktadır.



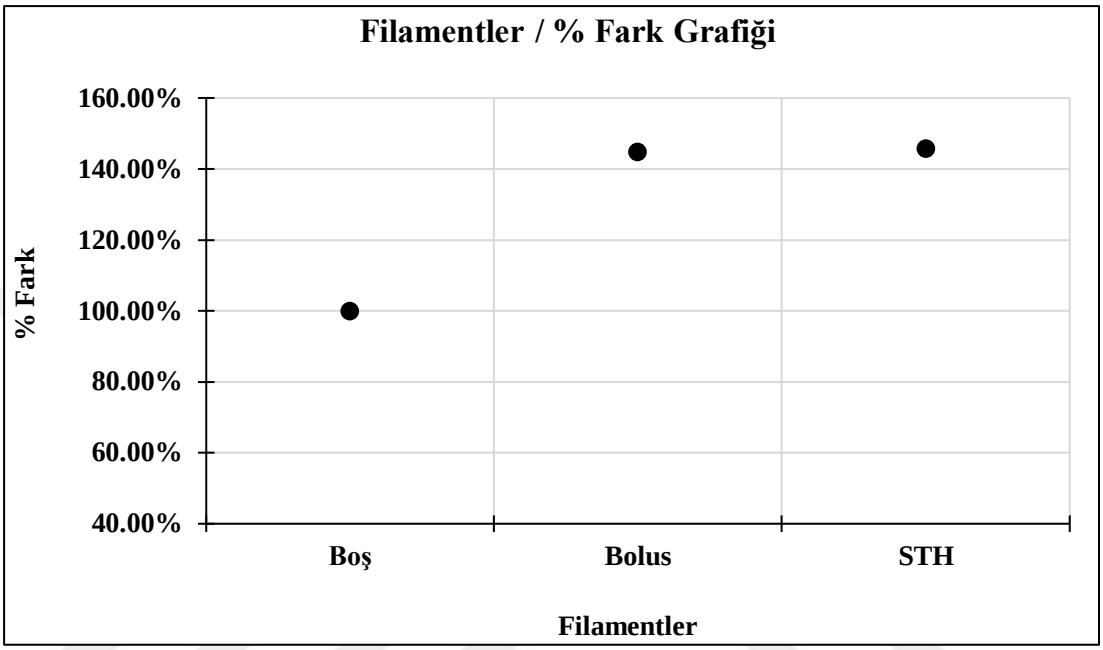
Şekil 5.2. Alan ölçüm sonuçlarının oran grafiği.

Sadece bolus, PLA ve STH filamentleri ile yapılan ve alana bağlı değişimi gözlemlemek için 5x5 cm'lik alanda 3er kez ölçümleri tekrar aldık. Alana bağlı ölçümler sonucunda boşlukta hedefe ulaşan doz miktarını Şekil 5.2. de görüldüğü üzere % 100 olarak belirlediğimizde, ticari olarak kullanılan bolusun ve ürettiğimiz alternatif bolus malzemelerinin boşluktan %14 gibi bir farklı sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Bu ölçümler sonucunda aldığımız verileri bolus malzemesi ile kıyasladığımızda ise ürettiğimiz malzemelerin ticari bolustan %0.2 – %0.3 lük bir farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir.

5.3. Derinliğe Bağlı Ölçüm Sonucu

Alana bağlı ölçümler sonrasında derinliğe bağlı değişimleri gözlemlemek amacı ile yaptığımız ölçümler sonucunda oluşan Filamentler / % Fark grafiği Şekil 5.3. da yer almaktadır.



Şekil 5.3. Derinlik ölçüm sonuçlarının oran grafiği.

Derinliğin etkisini ölçmek için alanı 5x5 cm de sabit tutarak derinlik mesafesini 10 cm den 1 cm ye indirerek bolus ve STH filamentlerden üretilmiş malzemelerle tekrar ölçümler aldık. Derinliğe bağlı ölçümler sonucunda boşlukta hedefe ulaşan doz miktarını Şekil 5.3. de görüldüğü üzere % 100 olarak belirlediğimizde, ticari olarak kullanılan bolusun ve ürettiğimiz alternatif bolus malzemesinin boşluktan % 40 gibi bir farklı sonuç vermiştir.

Derinlik için yaptığımız ölçümde ürettiğimiz alternatif bolus malzemesi ticari bolus ile kıyaslandığında ise % 0.7 gibi bir benzerlik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tüm veriler sonucunda neredeyse tüm filamentlerden ürettiğimiz parçaların alternatif bolus olarak kullanılmasına elverişli olduğu gözlemlenmiştir. Ticari bolus malzemesine benzerlik bakımından en yakın olan filamentler sırasıyla PLA, PetG, Polyflex™, STH, TPU, ABS, PLAflex, HIPS, PP ve Bronzefill olarak belirlenmiştir.

Tüm ölçümler sonucunda kendi ürettiğimiz ve hali hazırda kullanmakta olan ticari bolus malzemesinin standart, alan ve derinlik bağımlılığı için ölçüm sonuçları sırasıyla boşluğa oranla %96, %86 ve %40 şeklindedir. Tabi bu sonuçlar herhangi bir malzeme kullanılmadan alınan ölçümlere orandır. Tüm bu sonuçları bizim ürettiğimiz ile ticari olarak kullanılan bolusa göre kıyaslarsak bu sefer standart, alan ve derinlik bakımından en iyi benzerlikler sırasıyla %0.3, %0.2 ve %0.7 gibi bir sonuç ortaya çıkıyor. Bu sonuç da ürettiğimiz malzemelerin alternatif bolus olarak kullanılabilirliğini gösteriyor.

Standart ölçümler sonucunda elde ettiğimiz verilerden yararlanarak Bronzefill filametten ürettiğimiz malzeme hariç diğer malzemelerin ticari bolusa alternatif olacağı ortaya çıkmıştır. Burada da benzerlik sırasıyla kullanılabileceğini belirtmek gerekli. Özellikle PLA malzemesinin hem çok ucuz olması hem de kolay elde edilebilmesinden dolayı çok iyi bir bolus alternatifi olacağı daha önceki çalışmalarla da belirtilmiştir (7, 8). Gerek klinik çalışmalarda olsun gerekse test çalışmalarında hem foton hem de elektron radyoterapi çalışmalarında PLA malzemesinin bolus malzemesine eşdeğerlik bakımından oldukça yakın olduğu ve kullanılabilirliği göz önüne serilmiştir (9, 10).

Ayrıca yapılan bazı çalışmalar ile filamentlerden üretilen alternatif bolus malzemesinin de doluluk oranlarıyla ilgili çalışmalar da, üretilen malzemenin %100 dolulukta en uygun olduğunu göstermektedir ki biz de bu çalışmamızda tüm malzemelerimizi %100 dolulukta ürettik (11).

PLA malzemesi sert bir malzeme olmasından dolayı istenilen geometride üretildikten sonra esnekliği olmadığından hastaya tam olarak uygun olacaktır. Ancak esnek malzemelerden olan Polyflex™ malzemesi de ticari bolus malzemesine %0.4

lük gibi çok iyi bir benzerlik göstermektedir. Eğer esnek bir malzemeden hastaya uygun geometride bir alternatif bolus üretilecek ise bu malzeme çok kullanışlı olacaktır.

Bronzefill malzemesi ise bu ölçümler sonucunda bolusa alternatif olarak kullanılması uygun olmayabilir. Bunun sebebi ise cihaz boştayken yaptığımız ölçüm sonucunun bolusa oranı %4.7 iken bronzefill malzemesinden üretilmiş parça ile yapılan ölçüm sonucunun bolusla kıyaslandığında %7 gibi az bir sonuç vermesidir. Bu ise hedefin, herhangi bir malzeme olmadan aldığı dozdan daha azdır. Yani hedefin, tedavisi için belirlediğimiz dozdan daha az doza maruz kalarak gerek istenilen derinliğe fotonların ulaşamaması gerekse yeterli miktarda fotona maruz kalamaması ile açıklanır. Tabi tedavi edilecek bölgeye göre farklı şekillerde bronzefill malzemesi kullanılarak da tedavi yöntemine katkı sağlanabilir ancak bu malzemenin bolus eşdeğeri olduğu söylenemez.

7. KAYNAKLAR

1. Su S, Design And Production Of 3D Printed Bolus For Electron Radiation Therapy, Master Of Science, Halifax Nova Scotia, Dalhousie University, 2014
2. S. Burleson, J. Baker, A. T. Hsia, Z. Xu, "Use of 3D printers to create a patient-specific 3D bolus for external beam therapy", *Journal Of Applied Clinical Medical Physics,* volume 16, number 3, 2015.
3. S. Su, K. Moran, J. L. Robar, "Design and production of 3D printed bolus for electron radiation therapy", *Journal Of Applied Clinical Medical Physics*, volume 16, number 4, 2014.
4. Y. Zhao, K. Moran, M. Yewondwossen, J. Allan, S. Clarke, M. Rajaraman, D. Wilke, P. Joseph, J. L. Robar, "Clinical applications of 3-dimensional printing in radiation therapy", *Elsevier Science Direct Medical Dosimetry,* volume 42, issue 2, Pages 150-155, Summer 2017.
5. Dancewicz OL., Sylvander SR., Markwell TS., Crowe SB. Trapp JV., Radiological properties of 3D printed materials in kilovoltage and megavoltage photon beams, *Elsevier Science Direct Physica Medica,* 2017, 38:111-118
6. Park SY, Choi CH, Park JM, Chun MS, Han JH, Kim Jİ, A patient-specific polylactic acid bolus made by a 3d printer for breast cancer radiation therapy, *PlosOne Research Article,* 2016, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168063
7. Ricotti R., Ciardo D., Pansini F., Bazani A., Comi S., Spoto R., Noris S., Cattani F., Baroni G., Orecchia R., Vavassori A., Jereczek-Fossa BA., Dosimetric characterization of 3D printed bolus at different infill percentage for external photon beam radiotherapy, *Elsevier Science Direct Physica Medica,* 2017, 39:25-32
8. Fujimoto K., Shiinoki T., Yuasa Y., Hanazawa H., Shibuya K., Efficacy of patient-specific bolus created using three-dimensional printing technique in photon radiotherapy, *Elsevier Science Direct Physica Medica,* 2017, 38:1-9.
9. Canters RA., Lips IM., Wendling M., Kusters M., Zeeland MV., Gerritsen RM., Poortmans P., Verhoef CG., Clinical implementation of 3D printing in

the construction of patient specific bolus for electron beam radiotherapy for non-melanoma skin cancer, *Elsevier Science Direct Radiotheraphy and Oncology*, 2016, 121:148-153.

10. Madamesila J., McGeachy P., Barajas JEV., Khan R., Characterizing 3d printing in the fabrication of variable density phantoms for quality assurance of radioherapy, *Elsevier Science Direct Physica Medica*, 2016, 32:242-247.
11. Ricotti R., Vavassori A., Bazani A., Ciardo D., Pansini F., Spoto R., Sammarco V., Cattani F., Baroni G., Orecchia R., Jereczek-Fossa BA., 3D-printed applicators for high dose rate brachytherapy: Dosimetric assessment at different infill percentage, *Elsevier Science Direct Physica Medica,* 2016, 32:1698-1706.