

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

3B YAZICI MALZEMELERİNİN RADYOTERAPİDE KULLANIMI: DOZİMETRİK DEĞERLENDİRME

USAGE OF 3D PRINTER MATERIALS IN
RADIOTHERAPY: DOSIMETRIC EVALUATION

Yazarlar (Authors): Songül Karaçam Çavdar^{ID*}, Duygu Tunçman^{ID}, Meltem Dağdelen^{ID},
Ömer Erol Uzel^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çavdar Karaçam S., Tunçman D., Dağdelen M. Uzel Ö. E., "3B Yazıcı Malzemelerinin Radyoterapide Kullanımı: Dozimetrik Değerlendirme" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(3): 378-387, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1323486

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

3B YAZICI MALZEMELERİNİN RADYOTERAPİDE KULLANIMI: DOZİMETRİK DEĞERLENDİRME

Songül Karaçam Çavdar^a, Duygu Tunçman^a, Meltem Dağdelen^a, Ömer Erol Uzel^a

^aIstanbul University – Cerrahpasa, Medicine Faculty, Radiation Oncology Department, TURKEY

*Corresponding Author: songul.karacam@iuc.edu.tr

(Geliş/Received: 04.07.23; Düzeltme/Revised: 12.10.23; Kabul/Accepted: 27.11.23)

ÖZ

Radyoterapide hasta uygulamalarında ‘bolus’ olarak isimlendirilen doku eşdeğeri malzemeler ya da hasta tedavileri öncesi cihaz kalibrasyonunda doku eşdeğeri fantomlar kullanılmaktadır. Ancak ticari olarak satılan bu malzemeler standart boyutlarda üretilerek satışı yapılmakta; farklı dizaynlara duyulan ihtiyacı karşılamamaktadır. Son yıllarda farklı dizaynlarda üretim ihtiyacını karşılamada 3 boyutlu (3B) yazıcılar önemli bir rol üstlenmektedir. Bu çalışmada kullanımı giderek artan 3B yazıcılarda kullanım için üretilmiş PLA (Poliaktik Asit), TPU (Termoplastik Poliüretan) ve Naylon (Polyamide) malzemelerinin radyasyona verdikleri cevabın dozimetrik olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. BT simülatör cihazında Hounsfiel Unit (HU) değerleri belirlendi. Dozimetrik ölçümler Varian DHX lineer hızlandırıcısında elde edilen 6 MV nominal foton enerjisi kullanılarak yapılmıştır. Yüzde derin doz (%DD) ve doz profili ölçümleri su fantomunda, ışın geçirgenlik ölçümleri katı fantomda yapılmıştır. Malzemelerin ortalama HU yoğunlukları -8.61 ile -441.08 arasında değişmektedir. PLA malzemesi ort. -24.72 ile suyun HU değeri (0) ne en yakın sonuçları vermiştir. % derin doz ve penumbra değerleri %2 ve ± 2 mm içerisinde bulunmuştur. Tüm malzemelere ait geçirgenlik ölçümleri değerlendirildiğinde RW3 katı su fantomu plakası ile değişimin maksimum % 0.2 olduğu görülmüştür. 3B yazıcıda basılan malzemelerin dozimetrik parametrelerinin birbirlerine benzer sonuçlar verdiği ancak hastada kişisel malzeme olarak kullanılmadan önce basım özellikleri ve malzeme değişkenlikleri sebebiyle kullanılacak malzemenin dozimetrik olarak değerlendirilmesi uygun görülmektedir.

Keywords: 3B yazıcı, Dozimetri, Radyoterapi.

“Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ARDEB 1001 Proje No 121F335 tarafından finanse edilmiştir.”

USAGE OF 3D PRINTER MATERIALS IN RADIOTHERAPY: DOSIMETRIC EVALUATION

ABSTRACT

In radiotherapy, tissue-equivalent materials called 'bolus' are used in patient applications or tissue-equivalent phantoms are used in device calibration before patient treatments. However, these commercial materials are manufactured and sold in standard sizes, they cannot meet diverse design needs. In recent years, 3D printers play an important role in meeting the production needs of different designs. In this study, it was aimed to dosimetrically evaluate the response of PLA (Polylactic Acid), TPU (Thermoplastic Polyurethane), and Nylon (Polyamide) materials produced for use in 3D (3D) printers, which are increasingly used. Hounsfield Unit (HU) values were determined on the CT simulator device. Dosimetric measurements were made using the 6 MV nominal photon energy obtained in the Varian DHX linear accelerator. Percent depth dose (%DD) and dose profile measurements were made with water phantom, and transmittance measurements were made with solid phantom. The average HU densities of the materials vary between -8.61 and -441.08. The PLA material gave the closest results to the HU value of water, with an average value of -24.72 HU. % depth and penumbra values were found as within 2% and ± 2 mm. When the permeability measurements of all materials were evaluated, it was

observed that the change with the RW3 plate was 0.2% maximum. The dosimetric parameters of the materials printed in the 3D printer give similar results, but it seems appropriate to evaluate the material to be used dosimetrically due to the printing properties and material variability before using it as a patient personalization materials.

Keywords: 3D Printer, Dosimetry, Radiotherapy

“This study was funded by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) ARDEB 1001 Grant No 121F335.”

1. GİRİŞ

3 boyutlu (3B) baskı, kişiye özgü ya da üç boyutlu olarak oluşturulan bir modelin bilgisayar desteği ile çıktısının alınması işlemidir. Alınan katı maddesel çıktı; iki boyutlu katmanların farklı teknikler ve ardışık işlemlerle 3B yazıcı tarafından yapılması ile elde edilir [1]. Katmanlı imalat yapması sebebiyle geleneksel yöntemle yapılan üretimlere göre maliyet ve kısa sürede ürünü elde edebilme açısından avantajlıdır. Son yıllarda sıklıkla gündeme gelse de 3B yazıcı teknolojisi yaklaşık 30 yıllık bir geçmişe sahiptir. Sağlık, havacılık ve uzay, sağlık, eğitim, otomotiv, mühendislik, gıda, kuyumculuk, savunma sanayi, tekstil, inşaat vb. birçok farklı sektörde kullanılmakta ve bu sektörlerde kullanım sıklığı gittikçe artmaktadır. Kullanım sıklığının artışında gelişen teknolojiyle birlikte farklı baskı malzemelerinin geliştirilmesi ve geliştirilmeye devam etmesi etkili olmaktadır [1-3]. Günümüzde, sağlık sektöründe 3B baskı teknolojisi bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MRG) gibi tıbbi görüntüleme modalitelerinin hızlı gelişimiyle, bu görüntülerden hastaya özel 3B baskı yapılabilmesine olanak vermiş ve giderek daha popüler hale gelmiştir. Diş hekimliği, kardiyoloji, cerrahi, transplantoloji ve radyasyon onkolojisinde uygulama alanları bulmuştur. Radyasyon onkolojisi malign ya da malign olmayan hastalıkların tedavisinde iyonizan radyasyonu dıştan lineer hızlandırıcı cihazları ya da içten radyasyon kaynağı kullanarak (brakiterapi olarak isimlendirilir) tedavi uygulayan multidisipliner bir bilim dalıdır. Tedavide temel amaç hedef volüme yüksek doz verilirken çevre sağlıklı hücre ve dokuları mümkün olan en üst düzeyde korumaktır. Radyasyonla tedavi (radyoterapi); kullanılan tedavi cihazları ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle hastada 3 boyutlu görüntüleme ve tedavi planlamasına olanak sağlamıştır. Her hastada farklılık gösteren

anatomik yapı, tümör boyutu ve yerleşimi, verilecek doz gibi değişkenler sebebiyle tedavi hastaya özgü olarak yapılmaktadır [4]. 3B baskı teknolojisi radyasyon onkolojisinde hastaya özgü özelleştirilmiş aksesuarların oluşturulmasına olanak tanır. Radyoterapide 3B yazıcılar vücut şekline göre üretim olanağıyla brakiterapi aplikatörleri dizaynı, bolus ya da kalite kontrol fantomu gibi farklı seçenekler sunmaktadır [5-6]. Rooney ve ark.'nın yaptıkları sistematik literatür incelemesinde radyoterapide 3B yazıcı kullanım amaçlı çalışmalar ilk üç sırada kalite güvenilirliği için fantom dizaynı için çalışma oranı %26.2, brakiterapi için %20.4 ve bolus için foton tedavileri ağırlıklı olmak üzere %16.5 olarak verilmiştir [7].

Radyoterapideki klinik önemi açısından değerlendirildiğinde Wang ve ark. 3B baskı ile elde edilen hastaya özgü bolusun geleneksel her hastada kullanılan bolusla karşılaştırıldığında homojen kalınlık, hasta cildini hava boşluğu bırakmadan izlemesi gibi avantajlara sahip olduğunu belirtmişlerdir [8]. Baltz ve ark. 3B baskı kullanarak yaptıkları fantom çalışmasında tüm skalp ışınlaması örneğinde fantom yüzeyi ile maksimum hava boşluğunun 4 mm'den az olduğunu belirtmişler böylece hedef alanın kapsanmasını ve radyoterapi dozunun doğruluğunu daha iyi sağlayabildiğini bildirmişlerdir [9].

Kullanım alanlarının geniş kapsamlı olmasının yanı sıra 3B yazıcılarda basılacak ürünün işlevine göre farklı malzeme alternatifleri bulunmaktadır. Akrilonitril bütadien stiren (ABS), polilaktik asit (PLA), ve termoplastik poliüretan (TPU) malzemeleridir [10-12].

Radyoterapide genel uygulamada kalite kontrol amaçlı ölçümler için ticari olarak satılan dokuya eşdeğer katı fantomlar kullanılırken; hastalarda yine ticari olarak satılan esnek malzemedan üretilmiş dokuya eşdeğer ve maliyeti yüksek

malzemeler kullanılmaktadır. Üç boyutlu baskı ile bolus gibi hastanın yüzey konturuna tam olarak uyan modeller, aplikatörler ya da fantom malzemeleri üretilebilir [13-14]. Genellikle radyoterapi uygulamalarında PLA gibi sert plastik malzemeler kullanılmıştır. Baş-boyun bölgesi gibi eğimli yüzeylerde esnek özellikli TPU gibi malzemeler de kullanılarak esnek malzemenin eğimli yüzeydeki uyumu değerlendirilmiştir [15-16]

Ancak 3B yazıcı üreticileri tarafından üretilen ya da fason olarak üretilen çok fazla sayıda filament çeşidi bulunmaktadır [17]. Radyoterapi uygulamalarında kişiselleştirilmiş baskı özelliği sebebiyle avantajlı duruma geçen 3B baskı teknolojisinde dokuya eşdeğerlik ve dozimetrik cevap açısından kullanılacak malzemelerin değerlendirilmesi önemlidir.

Diğer çalışmalarda elde edilen modellere ait tasarımlar ve tasarımın anatomik bölgeye uygunluk değerlendirmeleri sıklıkla yapılmıştır. Ancak 3B yazıcıda kullanılabilecek malzemelerin radyasyonla etkileşim sebebiyle dozimetrik değişiklikleri olabileceğinin değerlendirmesi ayrıntılı olarak yapılmamıştır. Bu sebeple bu çalışmada kullanılan 3B yazıcı malzemeleri dozimetrik olarak değerlendirilerek aralarındaki değişim incelenmiş ve karşılaştırması yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Malzeme Seçimi

3B baskı tekniği ile üretilen hastaya özgü materyallerin, hasta ile arasında boşluk kalmadan uyum sağlayabilmesi için sertlik derecesi de önem taşımaktadır. Bu nedenle 3B baskı tekniği ile üretilen materyallerin amaca uygun seçilmesi çok önemlidir. Üretilen materyallerin bu fiziksel uyumu aynı zamanda dozimetrik olarak sebep olacakları doz dağılımlarını da etkilemektedir. Rutin radyoterapi uygulamalarında, doz dağılımını etkileyebilecek her bir malzemenin kullanım öncesinde bir takım dozimetrik testlerden geçmesi gerekmektedir [6, 16]. Fiziksel uyumuna ek olarak dozimetrik testlerden de geçmiş materyaller rutin uygulamalarda kullanılabilir.

Çalışmamızda fiziksel yoğunluğu açısından suya yakınlığı sebebiyle Tough PLA White, TPU 95A, Nylon filamentleri araştırmaya dahil edilmiştir (Tablo 1). Malzemeler kullanılan yazıcı markasına ait ürün yelpazesi arasından seçilmiştir.

Çizelge 1. Farklı fantom materyallerinin fiziksel özellikleri

Materyal	Özellikleri	Kütle (Fiziksel) Yoğunluğu (g/cm ³)
Su	Doğal	1.00
PLA	Doğal ve doğada çözünür	1.24
TPU	Kauçuk benzeri esnek	1.22
Naylon	Dayanıklı ve esnek	1.14
RW3 katı su fantomu	Dayanıklı ve sert	1.04

Kullanılması planlanan malzemeler piyasadan rahatlıkla edinilebilen, üretim maliyeti ucuz, kolay kullanımı kolay malzemelerdir. Böylece; gerek bolus malzemesi olarak kullanımı açısından gerek de hastaya özgü üretilen brakiterapi aplikatörü gibi dizaynlarda dozimetrik açıdan değerlendirme hedeflenmiştir.

2.2. 3B baskı

Çalışmada Tablo 2'de özellikleri verilen Ultimaker marka S5 model 3B yazıcı kullanıldı (Tablo 2). 3B yazıcı ergitmeli imalat (FDM-Fused Deposition Modeling) olarak flaman olarak isimlendirilen termoplastik besleme blokları kullanarak üretim yapmaktadır.

Çizelge 2. Ultimaker S5 Cihazına ait genel özellikler [17]

Özellikler	Değerler
Cihaz Boyutu	495 x 585 x 780 mm
Cihaz Ağırlığı	20 kg
Güç Kaynağı	500 W
Baskı Teknolojisi	FFF (Fused Filament Fabrication)
Baskı Hacmi	330 x 240 x 300 mm
Baskı Hızı	30 – 300 mm/s
Baskı Hücresi	0.25, 0.4, 0.8 mm AA
Katman Yüksekliği	0.25 mm baskı hücresi: 150- 60 mikron 0.4 mm baskı hücresi: 200 - 20 mikron 0.6 mm baskı hücresi: 300 - 20 mikron 0.8 mm baskı hücresi: 600 - 20 mikron
Filament	2.85 mm, Açık Filament Sistemi, PLA, Tough PLA, ABS, TPU 95A, CPE, CPE+, PC, Nylon, PP, PVA, Breakaway ve üçüncü parti materyaller
Dosya Formatı	STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, GIF, JPG, PNG
Dilimleme Yazılımı	Cura
Eklenti Entegrasyonu	SolidWorks, Siemens NX, Autodesk Inventor
Bağlantı Türü	Wifi, Ethernet, USB

Çalışmada radyasyon ölçümlerinde ölçüm aletlerine uygun olabilmesi için kare prizma şeklinde, 12x12x1 cm³ boyutunda model kullanılmıştır. Model dijital ortamda tasarlanarak 3B olarak basılmıştır. Basım ayarları Tablo 3’de verildi. Har üç materyal içinde aynı basım özellikleri kullanılmıştır.

Çizelge 3. Kullanılan filamentler için basım özellikleri

Özellikler	Ayarlanan Değerler
Basım Ayarları	%100
Dolgu tabaka kalınlığı	0.3 mm
Duvar Kalınlığı	0.8 mm
Baskı sıcaklığı	200 °C
Baskı hızı	45 mm/s
Profil	Extrafine (0.06 mm)
Dolum şekli	Üçgenler
Fan hızı	%100

2.3. Fantom Dizaynı

Fantom modeli, açık kaynaklı 3B Builder/ Ultimaker Cura yazılımı kullanılarak %100 doluluk oranı seçilerek oluşturuldu. ‘stl.’ uzantılı 3 boyutlu modelleme dosyası oluşturulduktan sonra dilimleyici (slicer) yazılımlarına aktarıldı. İşlem her bir malzeme için tekrarlanarak USB belleğe aktarılmış ve yazıcıda basılmıştır (Şekil 1).

**Şekil 1.** 3B baskıyı elde etme süreci

2.4. Yapılan Ölçümler

2.4.1. Hounsfield Unit (HU) Değerlendirmesi

3B baskı yöntemiyle üretilen farklı materyallerin, Hounsfield Unit (HU) değerlerini karşılaştırabilmek için General Electric (GE) Discovery RT bilgisayarlı tomografi (BT) simülatörü kullanıldı. BT simülatör cihazında, her vokselin atenüasyon değeri (μ_x) aşağıda verilen formülle hesaplanan suyun atenüasyon katsayısına (μ_w) göre rölatif Hounsfield Unit adında sayısal değere çevrilir (Denklem 1).

$$HU = 1000x \frac{\mu_x - \mu_w}{\mu_w} \quad (1)$$

Sayısal veriler grinin farklı tonları ile temsil edilerek görselleştirilir. Görselleştirmede havanın HU değeri skalanın en solunda kalacak şekilde siyah, ölçeğin en sağındaki değer ise genellikle kalsiyum, metal gibi yoğun malzemeleri temsil eden beyaz renk olarak ifade edilir. Bu skalanın ortasında kalan gri değeri su olarak; 0 HU değeriyle tanımlanır [18-19] HU değerlendirmesini yapmak için malzemelerin 120 kV, 220 mA, 0.625 mm kesit aralığında görüntüsü alınmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Soldan sağa doğru PLA, TPU ve Naylon malzemelerine ait BT görüntüsü

Her bir malzeme üzerinde ilgilenilen bölgelerde HU değerleri elde edilerek ölçüm verileri değerlendirilmiştir. Her bir malzeme için görüntülemeler 5 kez aynı koşulda tekrarlanmıştır. Her bir görüntülemede yanal (y) eksenini boyunca 5 farklı pozisyonda (merkez ve merkezden 5 cm aralıklarla her iki yönde olmak üzere ortalama HU ve STD (STD- Standart Sapma) değerleri belirlenmiştir. Toplanan 5 değerlerin ortalaması ile her malzeme için genel ortalama HU \pm STD değerleri belirlendi. Malzemeye ait radyolojik özelliği yorumlamak için ortalama HU değerleri ve her bir materyalin homojenliğini değerlendirmek için STD değerleri kullanılmıştır.

2.4.2. Dozimetrik Ölçümler

Dozimetrik ölçümler 6 MV X ışınları ile tedavi yapabilen Varian DHX lineer hızlandırıcı cihazında yapıldı. Tedavi cihazı, foton tedavilerinin yanı sıra elektron enerjisi kullanarak tedavilerde yapabilmektedir. Cihaz ile konformal, IMRT, VMAT gibi farklı tedavi teknikleri uygulanabilmektedir. Dozimetrik ölçümler derin doz ve profil ölçümlerini gerçekleştirebilmek için su fantomu; ışın geçirgenliği ölçümlerini gerçekleştirebilmek için katı su fantomunda gerçekleştirilmiştir(Şekil 3).



Şekil 3. Varian DHX cihazında su fantomu ile ölçüm

Ölçümlerde kullanılan Sun Nuclear marka 3D Scanner model su fantomu (Sun Nuclear, Melbourne, FL), ışına ait derin doz, doz profili gibi dozimetrik ölçümlerin yapılmasını ve daha sonra bu verilerin analizini yapabilen yazılıma sahip (Sun Nuclear SNC DosimetryTM) bilgisayar kontrollü dozimetrik bir sistemdir. Ölçüm verileri sisteme ait yazılım kullanılarak değerlendirilir.

2.4.2.1. Yüzde Derin Doz (%DD) ölçümleri

Malzemelere ait derinliğe bağlı doz değişimini değerlendirmek için derin doz ölçümleri yapılmıştır. Lineer hızlandırıcı cihazında kaynak cilt mesafesi (Source-skin distance-SSD) su fantomu yüzeyinde 100 cm olacak şekilde ayarlandı. Cihazda 4x4 cm², 6x6 cm², 8x8 cm² ve 10x10 cm² alanlar açılarak her bir alanda 0-30 cm arası derinliklerde ölçümler alınmıştır. Ölçümler sırasında 3B yazıcıda basılan her bir malzeme ışın alanı içerisine yerleştirilerek ışınlamalar yapılmıştır. Her enerjinin %DD değeri o enerjinin maksimum doz değerine normalize edilerek su fantomunun bilgisayarında nümerik analiz işlemine tabi tutulmuştur.

2.4.2.2. Doz Profili Ölçümleri

Her malzemede ışın aksına dik ekseninde farklı derinliklerde malzemelere ait doz değişimleri değerlendirildi. Cihazda alan kenarında oluşan doz düşüşü etkisi (penumbra) değerlendirilmiştir. 4x4 cm², 6x6 cm², 8x8 cm² ve 10x10 cm² alanlarda SSD=100 cm'de, su fantomunda maksimum doz derinliği(dmax), 5,

10, 20 cm derinliklerde doz profili ölçümleri yapılmıştır. Gantry eksenine yönünde (inplane) su fantomu içerisinde hareket ettirilen iyon odası ölçüm verilerine su fantomunun bilgisayarı aracılığı ile sayısal analiz yapılmıştır. Profillerden elde edilen penumbra değerleri %80 ve %20'lik doz değerlerinin X eksenindeki izdüşümlerinin farkından hesaplanmıştır.

2.4.2.3. Katı-su Fantomu ile Ölçüm

Kullanılan dozimetre sistemi PTW Romeo dozimetre, 0.6 cc silindirik iyon odası ve PTW RW3 model katı su fantomundan oluşmaktadır. İyon odası katı su fantomu içerisine 5 cm derinlik, 10x10 cm² alan boyutu ve fantom yüzeyinde SSD 100 cm olacak şekilde yerleştirildi. Ölçümler 1 cm kalınlıktaki tüm malzemeler alanın merkezi eksenine yerleştirilerek aynı ışınlama koşulları ile alındı. Işınlamalarda Şekil 4'te verildiği şekilde sırasıyla PLA, TPU, Naylon, RW 3 katı su fantomu ve 1 cm kalınlığında Superflab (Radiation Products Design, Inc., Albertville, MN) bolus kullanıldı. Cihaz kalibrasyonlarının da RW3 katı fantom kullanılarak yapılması sebebiyle katı fantomla elde edilen ölçüm değerine diğer malzemelerden elde edilen ölçüm değerleri normalize edildi.



Şekil 4. Cihazda ölçüm düzeneği

Su fantomu ölçümlerinde olduğu gibi ölçümler sırasında her bir 3B malzeme ışın alanı çerçesine yerleştirilerek ticari olarak satılan ve ölçümlerde kullanılan katı fantom ile değişimine bakıldı.

3. BULGULAR

3.1. Hounsfield Unit (HU) Değerlendirmesi

Malzemelerden elde edilen görüntü üzerinden elde edilen ort. HU±(STD) değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Malzemelere ait ort HU±(STD) değerleri

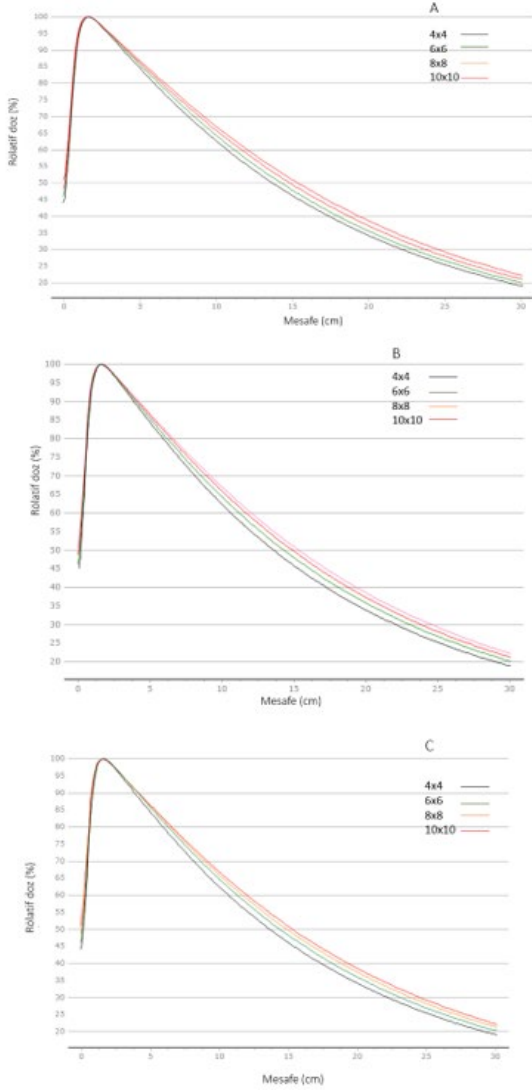
Malzeme	-10 cm	-5 cm	0cm	5cm	10cm
PLA	-11.56 ±(13.5)	-11.44 ±(14.0)	-8.63 ±(12.9)	-36.84 ±(13.1)	-55.17 ±(13.8)
TPU	-431.6 ±(80.9)	-441.0 ±(80.7)	-432.7 ±(81.7)	-423.1 ±(67.1)	-386.2 ±(67.1)
Naylon	-133.7 ±(26.8)	-127.2 ±(22.7)	-111.9 ±(23.5)	-110.1 ±(24.0)	-91.87 ±(25.9)

3.1.2. Dozimetrik Ölçümler

3.1.2.1. %DD Ölçümleri

Şekil 5’de her malzemenin farklı alan boyutları için %DD ölçüm verileri değerlendirildiğinde her bir alan boyutu ve malzeme açısından değerlendirildiğinde maksimum değişimin % 2 içerisinde olduğu görülmüştür.

Şekil 5’de 4x4 cm², 6x6 cm², 8 x8 cm² ve 10x10 cm² alanlarında her bir malzemeye ait %DD doz grafikleri verilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Farklı alan boyutları için A) Tough PLA White B) TPU 95A C) Naylon malzemelerine ait %DD grafiği

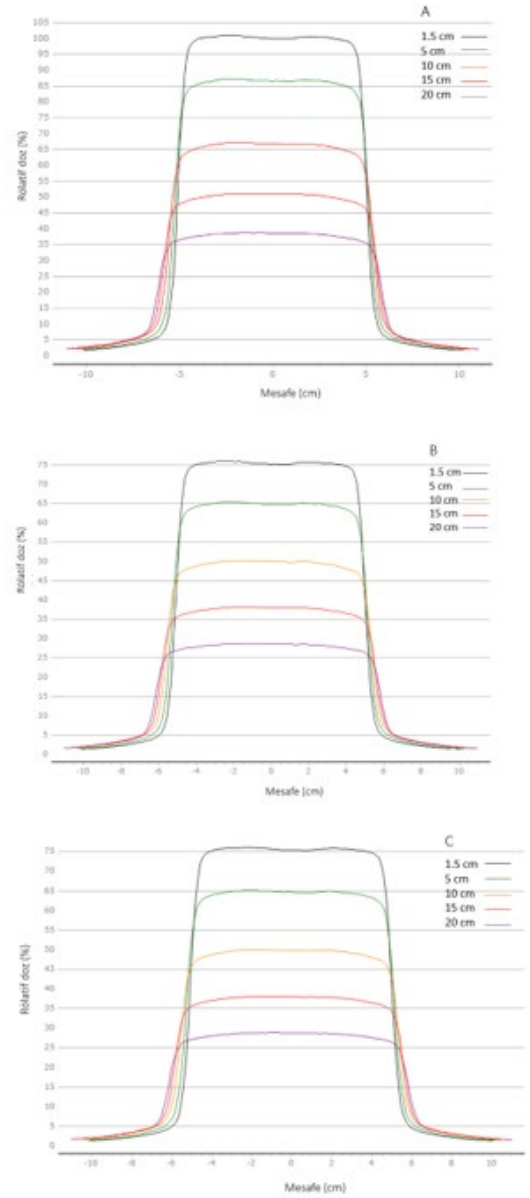
Ayrıca 10x10 cm² alan boyutu için %DD eğrilerinden elde edilen yüzeyde(0 cm), 5 cm, 10 cm 15 cm ve 20 cm derinliklerinde ölçülen rölative doz değerleri Tablo 5’de verildi.

Çizelge 5. Malzemeler için farklı derinliklerde ölçülmüş olan % rölative doz değerleri

Malzeme	0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
PLA	51.98	86.68	66.93	50.98	38.67
TPU	52.90	86.62	66.99	51.00	38.68
Naylon	53.02	86.43	66.77	50.83	38.50

3.1.2.2. Doz Profili Ölçümleri

Farklı derinliklerde elde edilen doz profilleri Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. 10x10 alan boyutu için A) Tough PLA White B) TPU 95A C) Naylon için farklı derinliklerde elde edilen doz profil grafiği

Penumbra değerleri arasındaki farkları karşılaştırmak amacıyla elde edilen ölçüm verileri Tablo 6'da verilmiştir. Tüm alan boyutları ve farklı derinlikler için yapılan değerlendirmede penumbra değerlerinin 0-0.08 cm aralığında değiştiği belirlenmiştir.

Çizelge 6. Farklı alan boyutlarına ait penumbra değerleri

Alan boyutu 4x4 cm ²			
Derinlik (cm)	PLA	TPU	Naylon
1.5	0.54	0.55	0.54
5	0.59	0.59	0.59
10	0.63	0.64	0.63
15	0.67	0.67	0.66
20	0.70	0.66	0.70
Alan boyutu 6x6 cm ²			
1.5	0.57	0.57	0.57
5	0.63	0.64	0.63
10	0.69	0.70	0.69
15	0.73	0.74	0.74
20	0.78	0.74	0.78
Alan boyutu 8x8 cm ²			
1.5	0.63	0.63	0.62
5	0.69	0.70	0.69
10	0.71	0.79	0.79
15	0.81	0.86	0.86
20	0.93	0.90	0.93
Alan boyutu 10x10 cm ²			
1.5	0.57	0.56	0.57
5	0.64	0.64	0.64
10	0.74	0.74	0.74
15	0.83	0.82	0.82
20	0.91	0.92	0.91

3.1.2.3. Katı-Su Fantomu ile Ölçüm

1 cm kalınlıkta farklı malzemelere ait geçirgenlik değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Geçirgenlik ölçümleri	
Malzeme (1 cm kalınlık)	Geçirgenlik Değeri(%)
PLA	99.8
TPU	100.7
Naylon	99.9
RW3 plaka	100
Bolus	99.9

RW3 plaka ile karşılaştırıldığında %0,2 değişim olduğu görülmüştür.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

3B yazıcılardaki yeniliklerle birlikte baskı malzemesi olarak kullanılan filament çeşitleri de farklı özelliklerde ve donanımlarda üretilmektedir. Filament çeşitleri arasından seçim yaparken kullanılan yazıcı modeline uygun seçim, kolay ulaşılabilir ve maliyet gibi faktörler önemlidir. Filament seçimi radyoterapi de kullanım açısından değerlendirildiğinde malzemenin iyonizan radyasyona verdiği cevap, doku eşdeğerliği gibi kriterler de dikkate alınmalıdır. Radyoterapide yüksek dozlar verilmesi ve radyasyonun oluşturabileceği yan etkiler sebebiyle hastaya verilecek dozun doğruluğu önemlidir. Bu sebeple cihazda mekanik ve dozimetrik uyulması gereken tolerans değerleri belirtilmiş ve bu kriterlerin rutin kontrollerle devamlılığının sağlanması önerilmektedir. Ayrıca hastada kullanılan ek malzemelerde kullanılan malzemelerin dokuya eşdeğer malzemeler olması önemlidir. Özsoykal ve ark. 3 boyutlu yazıcıyla farklı sıcaklıklarda, akış oranlarında ve dolgu oranlarında elde ettikleri PLA filamentle elde ettikleri örnek baskıların radyolojik özellik bakımından doku eşdeğerliklerinin değerlendirmişlerdir [20]. Elde edilen baskılara ait ortalama HU değerlerinin ise -450 ile +73 arasında değiştiği gözlenmiştir. 200 °C'de farklı akış oranlarında ortalama % 100 dolulukta -345 ile +59 HU arasında değiştiği verilmiştir. Şekil 2' de gösterilen koşullarda görüntüleme alınarak elde edilen ve Tablo 4'te verilen HU değerleri de 200 °C ve %100 dolulukta elde edilmiştir. HU değerlerinin -8.63 ile -55.17 arasında değişmekte olduğu görülmüştür. Ayrıca Tablo 4 değerlendirildiğinde PLA malzemesinin kullandığımız diğer malzemelere göre suyun HU değerine daha yakın ortalama HU değeri gösterdiği görülmüştür [20].

Burleson ve ark.'nın yaptıkları çalışmada ise kırmızı akrilonitril bütadin sitrin (red-ABS) ve clear-PLA olmak üzere iki farklı plastik malzeme kullanılmıştır. Hastaya özel bolus üretimi ve ardından radyoterapide hasta planlamasında kullanılan tedavi planlama sisteminde 260 HU değerini kullanarak modelleme yapmışlar ve her iki malzemenin de klinikte bolus olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [21].

Ayrıca kullanılan malzemelerin dozimetrik özelliklerinin değerlendirilmesi uyumuna dikkat edilmektedir. Bu sebeple hastada kullanılan bolusun cilt dozuna etkisi [22-23] ya da sabitleme amaçlı kullanılan maske ve ek ekipmanlarının [24], hastanın yatırıldığı tedavi masasının tedavide oluşturabileceği dozimetrik etkiler [25] değerlendirilmiş ve yeni malzemeler kullanıma girdikçe değerlendirilmeye devam etmektedir.

Task Group 142’de tedavi cihazlarında açık alan derin doz verileri doz değişiminin tolerans değeri ± 2 içerisinde olması kabul kriteri içerisinde değerlendirilir [26].

Kim ve ark. yaptıkları çalışmada 3B yazıcıda elde edilen 1 cm kalınlıkta malzemeyi 1.5 cm, 10 cm ve 15 cm’de dozimetrik parametrelerini değerlendirdiklerinde tedavi planlama sisteminde hesaplanan ve ölçülen değerler arasında maksimum % 0.78 fark gördüklerini bildirmişlerdir [27].

Şekil 5’te grafik olarak verilen %DD değerleri Tablo 5’te sayısal veri olarak gösterilmiştir. Tablo 5’te verilen %DD değerleri incelendiğinde kullanılan malzemeler arasındaki rölatif doz değişiminin %2’den küçük olduğu görülmüştür.

Task Group 142’de ışınlanan volüm içerisinde dozun uzaysal durumu ya da konumunu yansıtan doz profilleri üzerinden değerlendirilen dozimetrik penumbra’daki değişimi kabul kriteri ± 2 mm olarak verilmiştir [26].

Şekil 6’dan yararlanarak oluşturulan Tablo 6’daki veriler incelendiğinde penumbra değerlerinin farklı alan boyutları ve derinlikler için ± 2 mm’den küçük olduğu görülmüştür. Ayrıca Tablo 7’de verilen her bir malzemeye ait radyasyon geçirgenliğinin malzemeler arasında benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Sonuç olarak; BT incelemelerde görüntülenen farklı dokulara ait ortalama HU değerleri açısından değerlendirildiğinde, PLA filamentini kullanarak elde edilen malzemenin yumuşak dokuya daha yakın olarak temsil edilecek radyolojik özelliklere sahip olabileceği görülürken; %DD, penumbra gibi dozimetri parametreleri her bir malzeme için kendi aralarındaki değişim değerlendirildiğinde önemli farklar görülmediği benzer özellikler

gösterdiği görüldü. Ancak kullanılan filamentlerin çeşitliliği, doluluk oranları, kullanılan sıcaklıklar gibi çok farklı değişkenlerin olması sebebiyle hastada kişisel malzeme olarak kullanılmadan önce kullanılacak malzemenin dozimetrik olarak değerlendirilmesi uygun görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Sahin, M. E., “Example of Using 3D Printers in Hospital Biomedical Units”, *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, Vol. 6, Issue 2, Pages 322-328, 2022.
2. Akbaba, A. ve Akbulut, E., “3 Boyutlu Yazıcılar ve Kullanım Alanları”, *ETÜ Sentez İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*. Sayı: 3, Sayfa 19-46, 2021.
3. Paul, GM., Rezaenia, A., Wen, P. et al., “Medical Applications for 3D Printing: Recent Developments”, *Mo Med.*, Vol. 115, Issue 1, Pages 75-81, 2018.
4. Kim, GB., Lee, S., Kim, H. et al., “Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology”, *Korean J Radiol.*, Vol. 17, Issue 2, Pages 182-197, 2016.
5. Leary, M., Kron, T., Keller, C. et al., “Additive manufacture of custom radiation dosimetry phantoms: an automated method compatible with commercial polymer 3D printers”, *Vol. 86, Issue 5, Pages 487-499*, 2015.
6. Biltekin, F., Yazici, G. ve Ozyigit, G., “Characterization of 3D-printed bolus produced at different printing parameters”, *Medical dosimetry: official journal of the American Association of Medical Dosimetrists*, Vol. 46, Issue 2, Pages 157–163, 2021.
7. Rooney, M.K., Rosenberg, D.M., Braunstein, S.E. et al., “Three-dimensional printing in radiation oncology: A systematic review of the literature”, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, Vol. 21, Pages 15 – 26, 2020.
8. Wang, X., Xiang, Z., Zeng, Y., et al., “The Clinical Application of 3D-Printed Boluses in Superficial Tumor Radiotherapy”, *Front Oncol.*, Vol. 11, Issue 698773, 2020.
9. Baltz, GC., Chi, PM, Wong PF, et al., “Development and validation of a 3D-printed bolus cap for total scalp irradiation”, *J Appl Clin Med Phys.*, Vol. 20, Issue 3, Pages 89-96, 2019.

10. Bulanda, K., Oleksy, M., Oliwa, R. et al., "Biodegradable polymer composites based on polylactide used in selected 3D Technologies", *Polimery*, Vol. 65, Issue 7-8, Pages 557-562, 2020.
11. Shahrubudin, N., Lee TC., Ramlan, R., "An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications", *Procedia Manufacturing*, Vol.35, Pages 1286-1296, 2019.
12. Rodríguez, L., Naya, G., Bienvenido, R. "Study for the selection of 3D printing parameters for the design of TPU products", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 1193, 2021.
13. Danciewicz, O. L., Sylvander, S. R., Markwell, T. S. et al., "Radiological properties of 3D printed materials in kilovoltage and megavoltage photon beams", *Physica Medica*, Vol. 38, Issue 111-118, 2017.
14. Shamsabadi R. "3D-Printing Advances in Radiotherapy. Advances in 3D Printing". *IntechOpen*, 2023.
15. Dyer, B. A., Campos, D. D., Hernandez, D. D., et al., "Characterization and clinical validation of patient-specific three-dimensional printed tissue-equivalent bolus for radiotherapy of head and neck malignancies involving skin". *Physica Medica*, Vol. 77, Pages 138-145, 2020.
16. Ricotti, R., Ciardo, D., Pansini, F., et al., "Dosimetric characterization of 3D printed bolus at different infill percentage for external photon beam radiotherapy", *Physica Medica: PM: an international journal devoted to the applications of physics to medicine and biology: official journal of the Italian Association of Biomedical Physics (AIFB)*, Vol.39, Pages 25–32, 2017.
17. www.ultimaker.com". Ultimaker. Erişim Tarihi: Haziran 22, 2023
18. Nhila, O., Talbi, M., El Mansouri, M. et al., "Evaluation of CT Acquisition Protocols Effect on Hounsfield Units and Optimization of CT-RED Calibration Curve Selection in Radiotherapy Treatment Planning Systems", *Moscow Univ. Phys.*, Vol.77. Pages 661–67, 2022.
19. Mahur, M., Gurjar, O. P., Grover, R., et al., "Evaluation of Effect of Different Computed Tomography Scanning Protocols on Hounsfield Unit and Its Impact on Dose Calculation by Treatment Planning System", *Iranian Journal of Medical Physics*, Vol. 14, Issue 3, Pages 149-154, 2017.
20. Özsoykal I., Hüsemoğlu R.B., Yurt A., "Radiological Evaluation of the Effects of Printing Parameters on 3D Printed Cylindrical LW-PLA Samples: Preliminary Results", *Journal of Medical Innovation and Technology*, Vol. 3, Issue 2, Pages 28-34, 2021.
21. Burlison S, Baker J, Hsia AT, Xu Z. "Use of 3D printers to create a patient-specific 3D bolus for external beam therapy", *J Appl Clin Med Phys*, Vol. 16, Issue 3, Pages 5247, 2015.
22. Fischbach, M., Hälgl, R.A., Hartmann, M. et al. "Measurement of skin and target dose in post-mastectomy radiotherapy using 4 and 6 MV photon beams", *Radiat Oncol*, Vol. 8, Pages 270, 2013.
23. Diaz-Merchan, J.A., Español-Castro, C., Martinez-Ovalle, S.A. & Vega-Carrillo, H.R., "Bolus 3D printing for radiotherapy with conventional PLA, ABS and TPU filaments: Theoretical-experimental study", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 199, Issue 110908, 2023.
24. Kesen, N., Koksall, C. "Investigation of surface and buildup region doses for 6 MV high energy photon beams in the presence of a thermoplastic mask", *Int J Radiat Res*, Vol. 18 Issue 4, Pages 623-631, 2020.
25. Jiang, D., Cao, Z., Wei, Y. et al. "Radiation dosimetry effect evaluation of a carbon fiber couch on novel uRT-linac 506c accelerator", *Sci Rep*, Vol. 11, Issue 13504, 2021.
26. Klein, EE., Hanley, J., Bayouth, J., et al. "Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators", *Med Phys.*, Vol. 36, Issue 4197, 2009.
27. Kim, SW., Shin, HJ., Kay, CS. & Son, SH. "A customized bolus produced using a 3-dimensional printer for radiotherapy", *PLoS One*, Vol. 9, Issue 10, Pages e110746, 2014.