

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>

## EĞİTİM VE ARAŞTIRMA AMAÇLI ÜÇ BOYUTLU (3B) BASKILI KARACİĞER FANTOM TASARIMI

### 3D PRINTED LIVER PHANTOM DESIGN FOR EDUCATIONAL AND RESEARCH PURPOSES

**Yazarlar (Authors):** Fahrettin Fatih KESMEZACAR\*<sup>ID</sup>, Nami YEYİN<sup>ID</sup>, Özge DEMİR<sup>ID</sup>

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kesmezacar F.F., Yeyin N., Demir Ö., "Eğitim ve Araştırma Amaçlı Üç Boyutlu (3B) Baskılı Karaciğer Fantom Tasarımı" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 175-183, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1255492

Araştırma Makale/ Research Article

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

# EĞİTİM VE ARAŞTIRMA AMAÇLI ÜÇ BOYUTLU (3B) BASKILI KARACİĞER FANTOM TASARIMI

Fahrettin Fatih KESMEZACAR<sup>a\*</sup>, Nami YEYİN<sup>b</sup>, Özge DEMİR<sup>c</sup>

<sup>a</sup>İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, TÜRKİYE

<sup>b</sup>İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Ana Bilim Dalı, TÜRKİYE

<sup>c</sup>İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Temel İşlemler Ve Termodinamik Ana Bilim Dalı, TÜRKİYE

\*Sorumlu Yazar: [f.kesmezacar@iuc.edu.tr](mailto:f.kesmezacar@iuc.edu.tr)

(Received: 23.02.23; Revised: 04.06.23; Accepted: 05.07.23)

## ÖZ

Son yıllarda, üç boyutlu (3B) yazıcı sağlık alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Normal ölçülerdeki bir insan vücudundaki, organları orijinal boyutlarında elde etmek için 3B teknolojisinden yararlanılmaktadır. Çalışmada öğrenci eğitiminde ve çok amaçlı araştırmalarda kullanılmak üzere, içinde patolojik bir karaciğer modeli olan fantom dijital ortamda tasarlanıp 3B olarak basılmıştır.

Tasarlanıp basılan model insan anatomisine uygun olup, üzerinde karaciğer organında görülen anatomik özelliklerin çoğu çeperinde tasarlanmış ve ek olarak safra kesesi trasesine uygun olarak modellenmiştir. Fantomun çeper bölümünün haricinde model iç bölümünde iki ayrı kanalla dışarı açılan birbirinden bağımsız 2 boşluk yer almaktadır. Boşluklardan biri küre formunda tümör boşluğu diğeri ise parankim boşluğudur. Fantomda, tümöral ve periferik boşluk radyolojik ve nükleer tıp araştırma ve eğitimlerinin sağlanması için tasarlanmış olup içine radyonüklit ve gerekli sıvıların doldurulmasına uygun olarak basılmıştır. Modelimizin nükleer tıp, radyoloji, fizik ve anatomi eğitim ve araştırmalarında aktif olarak kullanılması amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Karaciğer Fantomu, 3B Baskı, Anatomi.

## 3D PRINTED LIVER PHANTOM DESIGN FOR EDUCATIONAL AND RESEARCH PURPOSES

### ABSTRACT

In recent years, three-dimensional printers (3D printers) have been widely used in health care. 3D technology is used to preserve organs in a human body of normal size in their original dimensions. In this study, a phantom with a pathological liver model was designed in a digital environment and 3D printed for use in undergraduate education and multi purpose research. The designed and printed model is suitable for human anatomy, most of the anatomical features of the organ liver are shown on its wall, and the gall bladder is also modeled according to its trace. Apart from the periphery of the phantom, there are 2 independent spaces that open with two separate channels in the inner part of the model. One of the cavities is the spherical tumor cavity, the other is the parenchymal cavity. The tumor and peripheral cavity of the phantom is used for radiological and nuclear medicine research and training and is printed according to the filling with radionuclides and the required fluids. It is envisaged that our model will be actively used in nuclear medicine, radiology, physics and anatomy education and research.

**Keywords:** Liver phantom, 3D Printing, Anatomy.

## 1. GİRİŞ

3 Boyutlu (3B) basım teknolojisi, üç boyutlu dijital verilerden karmaşık geometrik özelliklere sahip fiziksel nesnelere oluşturmak için katmanlı üretim anlamına gelir. 3B baskı olarak bilinen katmanlı üretim, malzemelerin bir alt tabaka üzerine veya içine birleştirilmesi veya biriktirilmesiyle nesnelere oluşturulabilirdiği bir üretim yöntemidir [1-2]. Sağlıkta bu teknolojinin tercih edilmesinin sebebi ise, ihtiyaç duyulan tıbbi ürünün geliştirilmesinde ve üretilmesinde diğer seçeneklere göre hızlı ve düşük maliyetli olmasıdır. Ayrıca bu teknoloji hasta için çok önemli olan, kişiye özel tıbbi 3B baskılarda öne çıkmaktadır [3]. 3B baskı teknolojisinde ürünlerden beklenen performans alınmaktadır. Üretilen tıbbi modeller, insan vücudunu benzer şekilde ve fiziksel özelliklerini gösterebilmelidir. Ayrıca bu modellere gereği durumunda talep edilen uygun patolojiler ve deformasyonlar eklenebilmektedir [4-6]. 3B baskı ile üretilen tıbbi ürünler 2022 yılına kadar yaklaşık 26 milyar dolarlık bir pazara ulaştığı tahmin edilmektedir [7]. 3B baskı kavramı ilk olarak 1986 yılında Charles tarafından tanımlanmıştır [8]. Son on yılda ise, 3B baskı teknolojisinin önemli bir göstergesi olan baskı doğruluğu, baskı verimliliği ve baskı hızı büyük ölçüde gelişmiştir [9-10]. 3B baskı teknolojisi, kişilerin hastalığına dayalı olarak belirli tıbbi cihazların imalatında yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu ürünlerde en başta tıbbi modeller, kişiselleştirilmiş ve işlevselleştirilmiş implantlar gelmektedir. 3B modellerle, hasta lezyonlarının görsel grafikleri doktorlara ve hastalara gösterilebilen tıbbi görüntüleme teknolojisinin sınırları zorlanmaktadır. Bu 3B modeller, elle hissedilebilen ve hastaların durumunu gerçekçi olarak gösteren somut nesnelere sahiptir. Bu teknoloji klinik tıbbi eğitim ve öğretim, tanı ve cerrahi planlama için daha sezgisel, kullanışlı ve vazgeçilmez duruma gelmiştir. Bugüne kadar, kafatası, kalp, pelvis, kan damarı ve tümör gibi; cerrahi yardım, hastalık analizi ve eğitim-öğretim malzemesi için çeşitli 3B baskı teknolojileriyle bir dizi tıbbi modeller üretilmiştir [11]. 3B baskılı hastalık modeli, cerrahi yardım ve hastalık analizi, insan vücudu ve patolojik anatomi gibi tıp eğitiminin

temel konuları olmak üzere klinik tıp öğretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

Son yıllarda, hasta güvenliği ve risklerini azaltmaya yönelik çabalar artmıştır. Bu nedenle, simülasyon klinik eğitimde önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Özellikle tanısal ve girişimsel prosedürlerde, asistanların tıbbi uygulamaları ilerletmeleri için uygun eğitime önem verilmektedir. Güvenlik amacıyla 3B simülatörler üzerinde biyopsi veya ablasyona yönelik girişimler konusunda eğitim verilmektedir. 3B baskı ile üretilmiş simülatörlerin kullanımı, öğrenme deneyimindeki gelişmeler ve hasta güvenliğinin artması gibi birçok fayda sağlamaktadır [13].

3B teknolojisinin eğitim ve araştırmada kullanıldığı bilimlerin arasında radyasyon onkolojisi, radyoloji, nükleer tıp gibi klinik bilimler ve anatomi, fizyoloji gibi temel bilimlerde yer almaktadır [14]. Nükleer tıp görüntüleme sistemleri genel olarak fiziksel fantomlarla doğrulanmaktadır. Bu fantomlar, kalıplama teknikleriyle üretilen ve daha sonra radyoaktif sıvılarla doldurulan içi boş küre ve silindirlerdir. 3B baskı teknikleri ile basılan fantomların, standart kalıplama yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha efektif olmasının sebebi farklı organlar ve düzensiz tümör lezyonları gibi ince yapılara sahip antropomorfik yapıların hazırlanmasına olanak sağlamalarıdır [15]. 3B baskılı fantomların kullanımına sırayla bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve ultrason (US) ile başlanmıştır. Ardından Pozitron Emisyon Tomografi (PET) ve Tek Foton Emisyon Bilgisayarlı Tomografi (SPECT) bunları takip etmiştir. Fantomlar, görüntüleme tekniklerinin test edilmesi ve cihaz tarafından yapılan ölçümlerin değerlendirilmesinde pratik yaklaşımlar sunmaktadır [16]. Fantomlar aynı zamanda sağlık fizikçilerinin akreditasyon sınavlarında bir muayene aracı olarak da geliştirilmiştir [17]. SPECT görüntüleme ve PET görüntülemenin cihaz karakterizasyonu ve yöntem testleri de fantom kullanılarak yapılmaktadır [18]. Fantomlar tıbbi görüntülemede kalite güvencesi, kalibrasyon,

araştırma, eğitim ve öğretim için de kullanılmaktadır [19]. Eğitim fantomları tıp öğrencileri, sağlık fizikçileri, nükleer tıp teknikleri, nükleer tıp asistanları ve radyoloji asistanları için kullanılabilir [20]. Fantomlar ayrıca simüle edilmiş verilerin doğrulanmasında, radyonüklid tedavilerin planlamasında ve görüntüleme cihazlarının kalitesinin gösterilmesi içinde tasarlanabilir [21].

Çalışmanın amacı, araştırmalar ve eğitimlerde kullanılacak olan, insan anatomisine benzer, patolojik olarak içinde tümör kitlesi içeren SPECT, PET, MRG ve BT uyumlu anatomik karaciğer fantomu tasarlamak ve 3B basımını yapmaktır. Çalışmada, anatomik, tümürlü karaciğer fantomu hem bir kalite güvence cihazı hem de eğitim öğretim aracı olarak tasarlanmıştır. Karaciğer fantomunun kendine özel olan iç formu ve dışı açılan vana ve tıparları sayesinde anatomik karaciğer modeline istenildiği kadar radyonüklid verilip, güvenli olarak görüntüleri alınabilmektedir. Bu görüntüler asistan ve tekniker eğitiminde kullanılabilir. Ayrıca fantom Nükleer Tıp doktorları için bir öğretim aracı ve referans kaynağı olarak da tasarlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Fantom Malzemesi Seçimi ve Baskı Tekniği

Çalışmada, içinde tümör olan patolojik bir karaciğer modeli (fantom) dijital ortamda tasarlanmış ve 3B olarak basılmıştır. Fantomun yüzey anatomisinin tasarımıyla beraber, çalışmamıza özgünlük kazandıran, organ modeline radyonüklidi güvenli ve kolayca transfer edip, görüntü almayı sağlayan özel bir iç tasarım düşünülmüştür. Modelde kullanılacak malzemenin sintigrafik görüntülemeye uygun özelliklerde olması, vücut dokularına benzer farklı foton saçılması ve foton soğurması yapması, radyoaktif kontaminasyona yol açmaması için sızdırmaz özellikte olmasının sağlanması planlanmıştır. Tüm bu özelliklerin araştırması için kimya mühendisliği ile iş birliği yapılmıştır.

Anatomik karaciğer fantomu, 3B yazıcı ile basılacağı için yazıcı seçimine özel önem verilmiştir. 3B yazıcıların baskı teknikleri, aynı anda farklı malzemeler kullanılarak baskı yapımları ve kullanılan filamentlere göre değişiklik göstermektedir. Çalışmada tasarımı

planlanan fantom içerisinde çeşitli doku yoğunlukları bulunur (karaciğer yapısı ve boşluk). Her bir doku yoğunluğunun Hounsfield Unit (HU) değeri de farklı olduğu için 3B yazıcıda kullanılacak malzemelerin HU numaralarının bilinmesi gerekmektedir [22]. Literatürdeki çalışmalara göre mevcut baskı malzemelerinde her malzemenin HU numarasını belirlemek için kübik test nesnelere basılarak bir BT tarayıcıda taranması gerekmektedir. Çalışmada 3B malzeme ile üretmeyi planladığımız karaciğerin, bilgisayarlı tomografisi çekildiğinde yoğunluk ve HU açısından insanı taklit etmesi için uygun olan malzeme araştırılmıştır. Fantom basımında karaciğer parankim dokusunun HU değerinin normal insan karaciğer parankim doku HU değerlerine yakın olması malzeme seçim kriterlerinden biri olarak alınmıştır.

Değerlendirmeye alınan farklı marka ve malzemelerden üretilmiş modeller arasında Fillamentum Poliaktik Asit (PLA) malzeme kullanılarak, açık kaynaklı Cura (Ultimaker, Geldermalsen, Hollanda) yazılımında 3B baskı işlemi için hazırlandı. Masaüstü Fused Deposition Modeling (FDM) Ultimaker S5 3B yazıcıda basıldı.

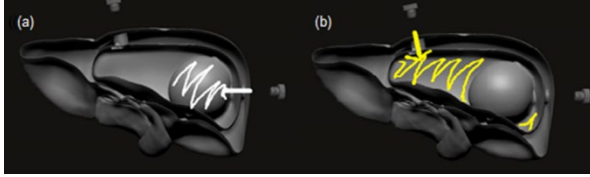
### 2.2. Fantom Tasarımı

Modelin iç tasarımının oldukça karmaşık olması ve kullanılan malzemenin sızma ihtimalinin olmaması için modelin en uygun olarak 3B baskı ile yapılabileceğine karar verildi. Fantomun tasarımında önemli noktalar: fantomun tam anlamıyla anatomik ve vücuttaki yerine uygun olması, fantomun iç bölgesine radyonüklitin rahatça doldurulup boşaltılabilen sızdırmaz bir aralığın olması, dolu iken malzemenin düşük su emme özelliğine sahip olup ve vida-contaların güvenli olması, kullanılan materyallerin oluşturulması istenen dokuya benzer olmasıdır.

Tasarımın kesit görüntüleri incelendiğinde, sağ dış yan çeperine bir kanalla açılan küre tümör kitlesini taklit etmektedir. Dış tarafa açılan kanaldan tümör içine radyonüklit veya kontrast madde transferi emniyetli olarak yapılabilecek özelliktedir. Boş kürenin hemen dışında parankim dokusunu oluşturan içi boş ayrı bir bölüm yer almaktadır. Burası parankim boşluğunun üst tarafında yer alan bir kanal ile dışarı açılmaktadır. Bu kanaldan da yine gerekli oranda radyonüklit veya kontrast

madde organ parankim bölgesine verilebilecektir. Her iki boşluğa da radyonüklit verildikten sonra emniyetin sağlanması için vidalı kapaklar özel vida ve contalarla emniyetli olarak kapatılabilecek özelliklerde tasarlanmıştır (Şekil 1).

Karaciğer modeli, Zbrush 3B grafik tasarım programında basılmak üzere dizayn edilmiştir. Zbrush yazılımı, gerçek zamanlı 3B modelleme ve boyama yapabilen ve kendine özel modelleme araçları ile yüksek ayrıntılı ve gerçekçi organik modeller üretmeye imkân sağlayan bir programdır.



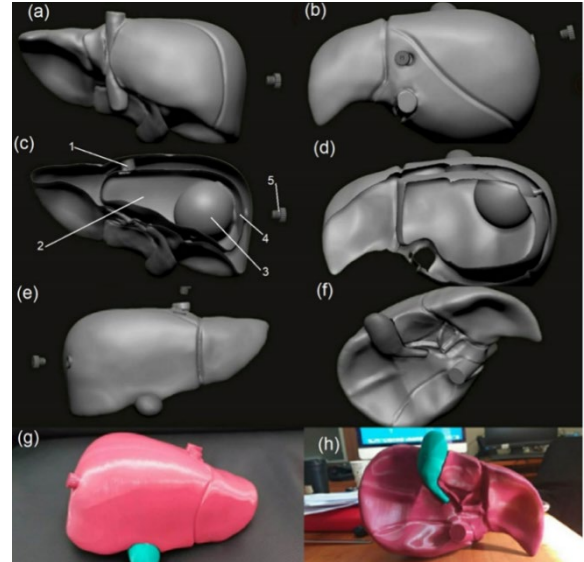
**Şekil 1.** Modelin frontal plan kesitinin arkadan görünümü. (a) Tümör kitlesine modelin dışından, kapağı açılıp kapatılabilen bir kanaldan radyonüklit doldurulması. (b) Karaciğer parankim dokusuna model dışından, kapağı açılıp kapatılabilen bir kanaldan radyonüklit verilmesi.

### 3. BULGULAR

Karaciğer modeli önden incelendiğinde organın sağ ve sol loblarındaki boyut farklılıkları ve modelin ventralinde yer alan safra kesesinin fundus bölümü görülmektedir. Sağ dış yanda tümör boşluğuna açılan kanalın giriş noktası ve bu kanalın emniyetli olarak kapanmasını sağlayan vidalı kapak; üstte de parankim boşluğuna açılan kanal girişi ve vidalı kapak bulunmaktadır. Modelin anatomik olarak karaciğere birebir benzemesi için organ çerperinde komşuluklarından oluşan çukurlaşmaların ve çıkıntıların tasarlanmasına özen gösterilmiştir. Arkadan görünen vücudun alt bölümünün venöz kanını kalbe taşıyan, organın içine gömük bir formda bulunan vena cava inferior yer almaktadır. Bu büyük damarın sol yanında öne doğru bir girinti oluşturan aorta'nın geçiş olduğu bulunmaktadır. Sol triangüler ligamentin tutunduğu sol uçtaki çıkıntı net olarak görülmektedir (Şekil 2).

Modelin ventralden tasarımında anatomik oluşumların çeşitliliği, fazlalığı ve komşuluklardan kaynaklanan çukurlaşmalar bulunmaktadır. Yeşil rengiyle safra kesesi, orijinal anatomik trasesiyle tasarlanmıştır. Karaciğer'in önemli noktalarından birini oluşturan organa giren arter, ven ve çıkan safra

yolları da ventralden gözlenmektedir. Karaciğer loblarını besleyen a. hepatica propria ve bu arterin iki dalı, a. hepatica dextra ve sinistra, yer almaktadır. Arterlerin yan tarafında karaciğere giren ana ven, vena porta hepatis'te seçilebilmektedir. Safra kesesinden çıkan safra kanalı yeşil olarak görülmektedir. Ventralden vena cava inferior'un kesiti organın arka duvarında bulunmaktadır. Tasarım sırasında, modelin altında dikkat çeken çukurlaşmalar ise; sol tarafta midenin oluşturduğu çukurlaşma, sağda safra kesesinin yanında böbrek, kalın barsak ve 12 parmak barsağı çukurlaşmaları net olarak izlenebilmektedir. Safra kesesinin ön ve arkasında ise lobus quadratus ve lobus caudatus görülmektedir.



**Şekil 2.** (a) Karaciğer tasarımının arkadan görünümü, modele arka dış yandan bakıldığında tümör boşluğuna açılan kanalın giriş noktası ve bu kanalın emniyetli olarak kapanmasını sağlayan vida kapak görülmektedir. (b) Tasarımın üstten görünümü, tümör haricindeki bölüme radyonüklit akışını sağlayacak olan kanal çıkışı görülmektedir. (c) Karaciğer frontal plan kesitinin arkadan görünümü; parankim boşluğuna açılan kanal (1), parankim boşluk (2), içi boş tümör kitlesi (3), dış yandan tümör boşluğuna açılan kanal (4), kanalın emniyetle kapanmasını sağlayan kapak (5). (d) Karaciğer horizontal plan kesitinin üstten görünümü. (e) Model tasarımına önden görünümü. (f) Model tasarımının ventralden görünümü (g) Karaciğer modelinin önden görünümü (h) Karaciğer modelinin ventralden görünümü.

Değerlendirmeye alınacak farklı malzemelerden üretilmiş modeller açık kaynaklı Cura (Ultimaker, Geldermalsen, Hollanda) yazılımı kullanılarak 3B baskı

işlemi için hazırlandı ve farklı 3B malzemeler kullanılarak masaüstü FDM Ultimaker S5 3B yazıcı ile basıldı. HU değerlendirmelerini yapmak için malzemelerin Bilgisayarlı Tomografi görüntüleri çekilerek ROI'ler üzerinden HU değerlendirmesi yapıldı. Yapılan HU değerlendirmesi sonucu, karaciğerin baskı malzemesi olarak Polylactic Acid (PLA) Ultimaker malzeme kullanılmasına karar verildi. Çünkü deneme malzemeleri içerisinde 58 HU ile karaciğer'e en yakın olarak PLA malzemesi bulundu. Gerçek insan karaciğeri HU değeri 58'dir [23]. Çalışmada tasarlanan ve basımı gerçekleştirilen fantomda 30 mm çapında küresel şekilli tümör hacmi  $66 \text{ cm}^3$  ve sağlıklı karaciğer dokusunu temsil eden kısmın  $789 \text{ cm}^3$  hacimdedir. Modelimizin boyutları dış yandan iç yana 35 cm, yukardan aşağı 19 cm ve önden arkaya 18 cm'dir.

#### 4. TARTIŞMA

3B baskı teknolojisi ile birlikte bilgisayar ortamındaki dijital modeller somut nesnelere halinde üretilebilmektedir. Tüm sektörlerde olduğu gibi sağlık sektöründe de 3B baskı teknolojisindeki yaygınlaşma öne çıkmaktadır. Hızlı prototipleme ile baskı teknolojisi sağlıkta pek çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Kişilere veya ihtiyaca özel üretim yapılabilmesi nedeniyle 'butik üretim' olarak da adlandırılabilen bu teknolojinin başlıca kullanım alanları; doku ve organ üretimi, ortez-protez-implant üretimi, cerrahi planlama ve radyolojik uygulamalar, cerrahi enstrüman üretimi, eğitim uygulamalarıdır [24]. Cerrahi planlamada 3B baskı oldukça sık olarak kullanılmaktadır. Beyin, kalp gibi karmaşık organlardaki veya pelvis, omurga gibi anatomik bölgelerdeki kusurların anatomi ve fizyolojisini incelemeyi ve bilgileri cerrahi planlama için kullanmayı içermektedir. 3B modeller; cerrahların ameliyattan önce bozulmuş organları incelemesine, çeşitli yaklaşımları keşfetmesine ve ameliyathaneye girmeden önce uygulamalı deneyim kazanmasına yardımcı olmaktadır. Bu süreç operasyon süresini önemli ölçüde kısaltır ve sonuç olarak hasta ve cerrahlar için operasyonun sonucunu iyileştirir. Protez teknolojisinde de 3B'ye sıkça rastlanmaktadır. Hastaya özel 3B anatomik hassas protezlerdeki son gelişmeler, bir kazadan veya genetik bir deformiteden etkilenen çok çeşitli engelli

kişilerin normal yaşamlarına devam etmelerine olanak sağlamaktadır [25].

Fantomların sıkça kullanıldığı radyasyon onkolojisi ve nükleer tıp gibi bilim dallarında, günümüzde kullanılan mevcut fantomların çoğu, dozimetri ölçümlerinin sonuçlarını etkileyebilecek ilkel geometrik formlara sahiptir. Radyasyon dozimetrisi fantomlarının temel amacı, radyasyonun insan vücudundaki belirli bir organın dokusu içinde soğurulmasını ve saçılmasını taklit etmektir. Fantomlar, test edilen organın şekline sahip olmalı; malzeme ve şekil, radyasyona maruz kaldığında vücut dokusunun hareketini simüle etmelidir. Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komisyonu'na (ICRU 96) göre [26], klinik dozimetriyi kullanmanın amacı, istenen organa doğru radyasyon iletimini sağlamaktır. Radyasyon dozimetrisinde, bu amaca ulaşmak için ana iki kalıp; doğru radyasyon dozu ve şekil hassasiyetidir [27]. Bununla birlikte, vücuda doz dağılımının araştırılması önem taşımaktadır. İnsan vücudunun doğru şeklini ve boyutunu simüle etmek için birçok antropomorfik fantom prototipi üretilmektedir. Doz birikimi vücut içindeki saçılma koşullarına bağlıdır. Bu nedenle, saçılma yollarının uygun şekilde modellenmesi gerekir. Dolayısıyla ilgilenilen organa verilen radyasyon dozunun doğru olarak değerlendirilmesi için organ şekli ve bölge anatomisi önem taşımaktadır [28].

Karaciğer fantomunu tasarlarken anatomik forma, modelin komşuluklarına ve organlarla olan temasına önem verilmiştir. Araştırmamızda bu temel noktalara dikkat etmemizin sebebi araştırma ve eğitimlerimizde kullanacağımız radyonüklit saçılımının uzaklık, yoğunluk ve hareketten direkt olarak etkilenmesidir. Ayrıca modelin iç bölgesinde iki farklı bölüm bulunmasının nedeni, modelin parankim dokusunun alacağı radyasyon dozunun, tümör dokusunun aldığı doz miktarından farklı olmasıdır.

Allsabbagh ve ark., [29] tiroid bezi üzerinde dozimetri ve görüntü kalitesi için yaptıkları fantom çalışmasında, makalemize benzer şekilde organın anatomik ölçülerine özen göstermiş, modelin içini boş olarak 3B bastırmıştır. Karaciğer prosedürlerinde başarıya ulaşabilecek ideal bir karaciğer fantomu geliştirmek için çeşitli materyaller

kullanılmıştır. Karaciğer fantomunu tasarlarırken mutlaka gerçek karaciğer organının anatomisi ve yapısı dikkate alınmalıdır [30].

Aynı zamanda 3B baskı veya hızlı prototipleme üretimi, karmaşık varlıkları yüksek doğrulukla üretebilen uygulanabilir eğitim araçlarından biri olmuştur [31]. 3B baskı, tıp alanında onlarca yıldır geliştirilip kullanılmıştır [32-33]. Arter, ven ve trakeal bronş ve pulmoner segmentlerle birlikte akciğerin fiziksel modelleri 3 boyutlu olarak basılmıştır [34]. Ardından, vasküler ve safra yapılarının karmaşık ağlarına sahip fiziksel karaciğer modelleri de donör karaciğer transplantasyonunda preoperatif planlama için 3B yazdırılmıştır [35]. Çalışmamızda aynı zamanda, anatomik eğitime etkilerini iyileştirmek için 3B anatomik tümörlü karaciğer modeli geliştirilmiştir. Fantomun tasarımı sırasında makro anatomik görünüme özen gösterilmesinin nedeni iyi bir karaciğer eğitim fantomunun gerçek hastaların tarama kazanımlarını yakından taklit etmesidir. Modelin yüzey bölgelerinin, organın abdomende bulunduğu topografik bölgelere uyumlu olması sağlanmıştır. Anatomik komşulukları ve komşuluklarından doğan çukurlaşmalar modelde gösterilmiştir. Bunun sebebi araştırmanın daha sonraki kısımlarında, 3B basılması düşünülen komşu organların (akciğer, kalp gibi) fantomlarıyla birebir uyum sağlaması ve doğru etkileşimlerde bulunmasıdır.

Tıp hekimleri ve sağlıkçıların eğitimi için kadavra kullanımı, tedarik sebebiyle oldukça sıkıntılıdır. Bunun başlıca sebebi etik sorunlar ve maliyetin çok yüksek olmasıdır. Kadavraya ulaşımın zor olduğu günümüzde, 3B baskı teknikleri, birçok vaka için yüksek çözünürlüklü BT görüntülemeyle doğru karmaşık anatomik organları yeniden üreterek yeni ve etkili bir eğitim sunabilir. 3B baskının herhangi bir anatomik nesnenin çok sayıda kopyasını farklı boyutlarda üretebilmesi, eğitim için büyük avantaj sağlamaktadır [36]. Mc Menamin ve ark. eğitim amacıyla insan anatomik nesnelerinin 3B baskılı kopyasının doğruluğunu doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen önemli unsurları araştırmıştır [37]. Çalışmada, diğer alternatiflerle karşılaştırmalı olarak 3B baskılı bir kopya yapmanın maliyeti araştırılmış ve sonuçta 3B baskının tıp eğitiminde insan örneklerini çoğaltmak için en

hızlı ve ekonomik teknik olduğu sonucu çıkmıştır.

3B modeller asistan eğitiminde de öne çıkmaktadır. Eğitimlerden biri olan karaciğer üzerine yapılan girişimler için karaciğer fantomuna ihtiyaç duyulmaktadır. Eğitimler kişilerin uygulamalarını iyileştirmeye ve geliştirmesini sağlamaktadır. Perkütan biyopsiler ve karaciğer rezeksiyonu gibi uygulamalar gerçek hasta üzerinde uygulanmadan önce tıbbi becerisini geliştirmek için fantom üzerinde yapılmaktadır. Böylece hasta güvenliği artmış, kaza ve hata riski azalmıştır. Ayrıca, karaciğer anatomisinin (organlar, safra kanalları, hepatik arterler, portal damarlar) karmaşık tasarımı nedeniyle, fantomlar ayrıntılı olarak tasarlanmalıdır [38-39].

Çalışmada Pacioni ve arkadaşlarının belirttiği şekilde karaciğer anatomisini önemi vurgulanmış ve ventral bölümünde yer alan anatomik olguların, çukurlaşmaların, girinti ve çıkıntılarının tasarımına ve basımına özen gösterilmiştir [13].

Özel olarak tasarlanmış fantomlar, hasta raporlama ve tedavilerinin kalite güvencesini artırmaya ve mükemmel deneme verileri toplamaya yardımcı olmaktadır [40].

3B fantomlar görüntüleme ve tedavi sistemlerinin kontrolü ve organlara olan etkilerini incelemek içinde tasarlanır. Nükleer tıpta, fantom oluşturma temel amacı istenilen fonksiyonun bu fantom üzerinde simülasyonunun gerçekleştirilmesidir.

Fantomlar dozimetri ve görüntüleme fantomları olmak üzere genel olarak iki sınıfta incelenebilir. Dozimetre fantomlarının tasarlanma amacı, teşhis veya tedavide vücudun belli bir bölgesinin maruz kaldığı radyasyon oranının belirlenmesidir. Görüntüleme fantomları ise sistemler tarafından alınan görüntülerin kalitesi ve doğruluğunun değerlendirmesini amaçlar. Model üretimindeki temel amaç istenilen fonksiyonların bu model üzerinde gerçekleştirilebilmesidir. Radyonüklitlerin sıkça kullanıldığı sağlık fiziği ve nükleer tıp gibi bilim dallarındaki deneylerde ve eğitimde fantom kullanımı kaçınılmaz olmaktadır [41]. Robinson ve ark. 2 karaciğer, dalak, böbrekler

(yetişkin, 5 yaş ve 10 yaş) ve pankreasta oluşan fantomlar geliştirdi [42]. Fantomların içerisine Tc-99m perteknetat ya da Lu-177 (Lutesyum-177) Dotatate içeren salin ile doldurularak fantomların SPECT/CT görüntüleri alınmış ve 3B baskılı organlar için SPECT kalibrasyon faktörleri belirlenmiştir. Tran-Gia geometrilere dayalı farklı kısmi hacim tekniklerini küresel ve elipsoid ticari fantomlarla karşılaştırmak için bir böbrek fantomu geliştirmiştir [43].

Tasarlanan tümörlü karaciğer modeli kullanılarak BT, MR, SPECT ve PET/BT çekimleri yapılabilecektir. Modelin görseli ile tıbbi görüntüleme cihazlarından alınan görüntüler iki boyutta incelenebileceği gibi tomografik görüntülerde aksiyal, sagittal ve koronal kesit görüntüleri de görsel olarak inceleyebilecektir. Bu yönü ile modelimizin faydalı bir eğitim materyali olabileceğini düşünüyoruz. Tasarımın diğer bir önemli amacı da radyonüklitin parankim bölge ve tümör üzerine olan salınımının miktarı belirli olarak verilen doza göre görüntüsünün netleşmesi ve ölçümünün yapılabileceği çalışmanın şeklini kişilere anlatılmasıdır.

## 5. SONUÇ

3B olarak tasarlanıp basılmış olan tümörlü karaciğer modeli anatomi, radyoloji ve nükleer tıp eğitiminde ve araştırmalarında efektif olarak kullanılabilir. Modelimize özgünlük sağlayan iç tasarımı sayesinde tümöre ve parankim dokuya direk olarak radyonüklit vererek karaciğer tümör tedavisi modellenmesine ve tedavi dozimetrisi yapılabilmeye olanak sağlayabilecektir.

## KAYNAKLAR

1. Kang, H.W., Lee, S.J., Ko, I.K., Kengla, C., Yoo, J.J., Atala, A., "A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity". *Nature Biotechnology*, Vol. 34, Issue 3, Pages 312–319, 2016.
2. Murphy, S.V., Atala, A., "3D bioprinting of tissues and organs", *Nature Biotechnology*, Vol. 32, Issue 8, Pages 773–785, 2014.
3. Rybicki, F.J., "Medical 3D printing and the physician-artist." *Lancet*, Vol. 391, Issue 10121, Pages 651–652, 2018.
4. Kuang, X., Wu, J., Chen, K., Zhao, Z., Ding, Z., Hu, F., et al., "Grayscale digital light processing 3D

printing for highly functionally graded materials", *Science Advances*, Vol. 5, Issue 5, Pages 1-9, 2019.

5. Grigoryan, B., Paulsen, S.J., Corbett, D.C., Sazer, D.C., Fortin, C.L., Zaita, A.J., et al., "Multivascular networks and functional intravascular topologies within biocompatible hydrogels", *Science*, Vol. 364, Issue 6439, Pages 458-464, 2019.
6. Liu, X., Tao, J., Liu, J., Xu, X., Zhang, J., Huang, Y., et al., "3D printing enabled customization of functional microgels", *ACS Applied Materials and Interfaces*, Vol. 11, Issue 13, Pages 12209–12215, 2019.
7. Ricles, L.M., Coburn, J.C., Di Prima, M., Oh, S.S., "Regulating 3D-printed medical products", *Science Translational Medicine*, Vol. 10, Issue 461, Pages eaan6521, 2018.
8. Hull, C.W., Spence, S.T., Lewis, C.W., Vinson, W., Freed, R.S., "Stereolithographic curl reduction". US Patent No:5.273.691, 1993.
9. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D., "Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, Pages 172–196, 2018.
10. Bernal, P.N., Delrot, P., Loterie, D., Li, Y., Malda, J., Moser, C., et al., "Volumetric bioprinting of complex living-tissue constructs within seconds", *Advanced Materials*, Vol. 31, Issue 42, Pages e1904209, 2019.
11. Paul, G.M., Amin, R., Wen, P., Condoor, S., Parkar, N., King, W., et al., "Medical applications for 3D printing: recent developments", *Missouri Medicine*, Vol. 115, Issue 1, Pages 75–81, 2018.
12. Höhne, C., Schmitter, M., "3D printed teeth for the preclinical education of dental students", *Journal of Dental Education*, Vol. 83, Issue 9, Pages 1100–1106, 2019.
13. Pacioni, A., Carbone, M., Freschi, C., Vigliani, R., Ferrari, V., Ferrari, M., "Patient-specific ultrasound liver phantom: materials and fabrication method", *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 10, Issue 7, Pages 1065–1075, 2015.
14. Yıldırım, G., Yıldırım, S., Çelik, E., "3 boyutlu yazıcılar ve öğretimsel kullanımı: bir içerik analizi", *Bayburt Eğitim Fakültesi Dergisi*, Cilt 13, Sayı 25, Sayfa 163-184, 2018.
15. Kim, G.B., Lee, S., Kim, H., Yang, D.H., Kim, Y.H., Kyung, Y.S., et al., "Three-dimensional



- printing: basic principles and applications in medicine and radiology”, *Korean Journal of Radiology*, Vol.17, Issue 2, Pages 182–197, 2016.
16. Wang, K., Ho, C-C., Zhang, C., Wang, B., “A review on the 3D printing of functional structures for medical phantoms and regenerated tissue and organ applications”, *Engineering*, Vol. 3, Issue 5, Pages 653–662, 2017.
17. Branham, T., “Phantom testing”, *Medical Physics*, Vol. 34, Issue 6, Pages 2578-2578, 2007.
18. Di Francia, G., Scafè, R., De Vincentis, G., La Ferrara, V., Iourlaro, G., Nasti, I., et al., “Porous silicon phantoms for high-resolution scintillation imaging”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 569, Issue 2, Pages 197-200, 2006.
19. SabbirAhmed, A.S.M., Demir, M., Kabasakal, L., Uslu, I., “A Dynamic renal phantom for nuclear medicine studies”, *Medical Physics*, Vol. 32, Issue 2, Pages 530-538, 2005.
20. Als, C., Bräutigam, P., Mirzaei, S., “Sweet nuclear medicine phantoms for scintigraphic sentinel lymph node detection: a cooking recipe”, *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, Vol. 32, Issue 5, Pages 623-624, 2005.
21. Park, M-A, Zimmerman, R.E., Taberner, A., Kaye, M.W., Moore, S.C., “Design and fabrication of phantoms using stereolithography for small-animal imaging systems”, *Molecular Imaging and Biology*, Vol. 10, Issue 5, Pages 231- 236, 2008.
22. Solc, J., Vrba, T., Burianova, L., “Tissue-equivalence of 3D-printed plastics for medical phantoms in radiology”, *Journal of Instrumentation*, Vol. 13, Pages P09018, 2018.
23. Tisch, C., Brencicova, E., Schwendener, N., Lombardo, P., Jackowski, C., Zech, W-D., “Hounsfield unit values of liver pathologies in unenhanced post-mortem computed tomography.” *Internatiol Journal Legal Medicine.*; Vol. 133, Issue 6, Pages 1861-1867, 2019.
24. Emre, Ş., Yolcu, M.B., Celayir, S., “Üç boyutlu yazıcılar ve çocuk cerrahisi”, *Çocuk Cerrahi Dergisi*, Cilt 29, Sayı 3, Sayfa 77-82, 2015.
25. Elahinia, M.H., Hashemi, M., Tabesh, M., Bhaduri, S.B., “Manufacturing and processing of NiTi implants: a review”, *Progress in Materials Science*, Vol. 57, Issue 5, Pages 911–946, 2012.
26. ICRU Report 96, Dosimetry-Guided Radiopharmaceutical Therapy, <https://www.icru.org/report/icru-report-96-dosimetry-guided-radiopharmaceutical-therapy/>, 2023
27. Leary, M., Kron, T., Keller, C., Franick, R., Lonski, P., Subic, A., et. al., “Additive manufacture of custom radiation dosimetry phantoms: An automated method compatible with commercial polymer 3D printers”, *Materials and Design*, Vol. 86, Issue 5, Pages 487-499, 2015.
28. Lehmann, J., Stern, R.L., Levy, J., Daly, P.T., Siantar, C.L.H., Goldberg, Z., “Radiation phantom with humanoid shape and adjustable thickness (RPHAT)”, *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 49, Issue 9, Pages 125-129, 2004.
29. Alssabbagh, M, Tajuddin, A.A., Abdulmanap, M., Zainon, R., “Evaluation of 3D printing materials for fabrication of a novel multi-functional 3D thyroid phantom for medical dosimetry and image quality”, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 135, Pages 106-112, 2017.
30. Ahmad, M.S., Suardi, N., Shukri, A., Mohammad, H., Oglat, A.A., Alarab, A., et al., “Chemical characteristics, motivation and strategies in choice of materials used as liver phantom: a literature review”, *Journal of Medical Ultrasound*, Vol. 28, Issue 1, Pages 7–16, 2020.
31. Wang, H., Liu, J., Zheng, X., Rong, X., Zheng, X., Peng, H., et al., “Three-dimensional virtual surgery models for percutaneous coronary intervention (PCI) optimization strategies”, *Scientific Reports*, Vol. 5, Pages 10945, 2015.
32. Tam, M.D., Laycock, S.D., Brown, J.R., Jakeways, M., “3D printing of an aortic aneurysm to facilitate decision making and device selection for endovascular aneurysm repair in complex neck anatomy”, *Journal of Endovascular Therapy*, Vol. 20, Issue 6, Pages 863-867, 2013.
33. Fu, M., Lin, L., Kong, X., Zhao, W., Tang, L., Li, J., et al., “Construction and accuracy assessment of patient-specific biocompatible drill template for cervical anterior transpedicular screw (ATPS) insertion: an in vitro study”, *Public Library of Science One*, Vol.8, Issue 1, Pages e53580, 2013.
34. Li, J., Nie, L., Li, Z., Lin L., Tang, L., Ouyang J., “Maximizing modern distribution of complex anatomical spatial information: 3D reconstruction and rapid prototype production of anatomical corrosion casts of human specimens”, *Anatomical Sciences Education*, Vol. 5, Issue 6, Pages 330-339, 2012.

35. Zein, N.N., Hanouneh, I.A., Bishop, P.D., Samaan, M., Eghtesad, B., Quintini, C., et al., "Three-dimensional print of a liver for preoperative planning in living donor liver transplantation", *Liver Transplantation*, Vol. 19, Issue 12, Pages 1304–1310, 2013.
36. Sheth, R., Balesh, E.R., Zhang, Y.S., Hirsch, J.A., Khademhosseini, A., Oklu R., "Three-dimensional printing: an enabling technology for IR", *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, Vol. 27, Issue 6, Pages 859–865, 2016.
37. McMenamin, P.G., Quayle, M.R., McHenry, C.R., Adams, J.W., "The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology", *Anatomical Sciences Education*, Vol. 7, Issue 6, Pages 479–486, 2014.
38. Krucker, T., Lang, A., Meyer, E.P., "New polyurethane-based material for vascular corrosion casting with improved physical and imaging characteristics", *Microscopy Research Technique*, Vol. 69, Issue 2, Pages 138–147, 2006.
39. Schindera, S.T., Torrente, J.C., Ruder, T.D., Hoppe, H., Marin, D., Nelson R.C., et al., "Decreased detection of hypovascular liver tumors with MDCT in obese patients: A phantom study", *AJR American Journal of Roentgenology*, Vol. 196, Issue 6, Pages 772–776, 2011.
40. Oglat, A.A., Matjafri, M.Z., Suardi, N., Oqlat, M.A., Abdelrahman, M.A., Oqlat, A.A., "A review of medical Doppler ultrasonography of blood flow in general and especially in common carotid artery", *Journal of Medical Ultrasound*, Vol. 26, Issue 1, Pages 3–13, 2018.
41. Özdemir, M., "Ultrasonografi eğitimi için balistik jelatin esaslı fantom geliştirilmesi ve özelliklerinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Sayfa 31-32, 2018.
42. Robinson, A.P., Tipping, J., Cullen, D.M., Hamilton, D., Brown, R., Flynn, A.F., et al., "Organ-specific SPECT activity calibration using 3D printed phantoms for molecular radiotherapy dosimetry", *EJNMMI Physics*, Vol. 3, Issue 1, Pages 12–22, 2016.
43. Tran-Gia, J., Schlögl, S., Lassmann, M., "Design and fabrication of kidney phantoms for internal radiation dosimetry using 3d printing technology", *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 57, Issue 12, Pages 1998–2005, 2016.