

## طراحی و امکان‌سنجی ساخت فانتوم آنروپومورفیک تمام بدن انسان برای استفاده

### در بخش‌های پرتودرمانی

میررشید حسینی اقدم\* و سید محمودرضا آقامیری

گروه مهندسی پرتو پزشکی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\*تهران، دانشگاه شهید بهشتی، گروه مهندسی پرتو پزشکی، کد پستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱

Mr.hosseini@mail.sbu.ac.ir

#### چکیده

گسترش روزافزون مراکز پرتودرمانی در کشور جهت درمان بیماران سرطانی و افزایش سطح کیفی درمان، موجب شده است تا به فانتوم‌های معادل انسان برای انجام دزیمتری، کالیبراسیون و کنترل کیفی دستگاه‌های رادیوتراپی نیاز پیدا شود. فانتوم‌ها معمولاً به دو دسته همگن و غیرهمگن (آنروپومورفیک) تقسیم‌بندی شده‌اند. هدف اصلی از این مطالعه، امکان‌سنجی مواد لازم برای ساخت فانتوم غیرهمگن بدن انسان با توجه به امکانات موجود در کشور و همچنین طراحی فانتوم تمام بدن انسان است. برای این منظور، ابتدا فانتوم راندو به‌عنوان مرجع انتخاب شد تا شبیه آن با موادی متفاوت ساخته شود. بنابراین، از تمام بدن فانتوم راندو موجود در کشور تصاویر سی تی گرفته شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Solid Works از روی تصاویر سی تی، طراحی صورت گرفت؛ به‌گونه‌ای که قسمت‌های استخوانی، اندام‌های توخالی و ریه در هر طراحی خارج شدند تا با مواد معادل هرکدام پر شوند. بدین ترتیب، معادل بافت نرم از پلاستیک پلکسی گلاس که ویژگی‌های مشابه با بافت انسان دارد، انتخاب شد. معادل بافت استخوان نیز طبق آزمایش‌های صورت گرفته روی درصد مشخصی از ترکیبات پودر سوخته استخوان گاو، رزین اپوکسی و هاردنر استفاده شد. طبق نتایج حاصل شده، نمونه خمیر معادل استخوان با دانسیته  $1.7 \text{ gr/cm}^3$  و همچنین، با عدد اتمی مؤثر  $13/674 (Z_{\text{eff}})$  امکان‌سنجی و ساخته شد. طراحی انجام شده شامل دیسک‌هایی از صفحات پلکسی گلاس است که هر دیسک شامل قسمت‌های استخوانی، اندام‌های توخالی و ریه است. که با ماده معادل خود پر خواهند شد. پس از خشک شدن کامل خمیر استخوان در هر دیسک، در نهایت، این دیسک‌ها روی هم سوار شده و فانتوم آنروپومورفیک بدن انسان را تشکیل می‌دهند.

**کلیدواژگان:** فانتوم آنروپومورفیک، تصاویر سی تی، نرم‌افزار Solid Works، رزین اپوکسی و هاردنر.

#### ۱. مقدمه

بزرگ است که بتواند پراکندگی کامل را برای باریکه پرتوی مختلف فراهم سازد [۱]. بنابراین، با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه ساخت فانتوم آنروپومورفیک، هدف اصلی، ساخت فانتومی است که بتوان در بخش‌های رادیوتراپی برای کالیبراسیون دستگاه‌های رادیوتراپی، انجام دزیمتری‌ها و همچنین، برای تحقیقات مورد استفاده قرار داد. فانتوم راندو نوعی فانتوم

گسترش علوم و فنون و نیاز بیش‌ازپیش به افزایش دقت در بخش‌های پرتودرمانی، سبب طراحی و ساخت فانتوم‌های آنروپومورفیک شده است. طبق تعریفی که کمیسیون بین‌المللی واحدها و اندازه‌گیری تابش (ICRU) ارائه کرده، فانتوم حجمی است که حاوی یک یا چند ماده معادل بافت است و به‌اندازه‌ای

(HA-11) که حالت فیزیکی مایع دارد، تولید می‌شود. با مخلوط کردن این دو جزء، بعد از مدتی خمیرمانند شده و سپس به‌طور کامل سفت می‌شود. این محصول برای کاربردهای صنایع مختلف استفاده می‌شود. مواد تشکیل‌دهنده رزین اپوکسی و هاردنر و ویژگی آن در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است [۵] و [۶].

## ۲.۲. معادل بافت نرم

با توجه به امکان‌سنجی‌های انجام‌شده در زمینه معادل بافت نرم، پلاستیک پلکسی گلاس با چگالی  $1/19 \text{ gr/cm}^3$  انتخاب شد. حالت فیزیکی ماده پلکسی گلاس جامد است که ویژگی فیزیکی مشابهی با بافت نرم بدن انسان دارد. دانسیته واقعی بافت‌های مختلف بدن انسان در جدول ۳ نشان داده شده است [۷]. دانسیته بافت نرم برای انسان سالم،  $1 \text{ gr/cm}^3$  است. همچنین، با توجه به اینکه دانسیته بافت ریه‌ها و اندام‌های توخالی تقریباً مثل هوا هستند، این قسمت‌ها در طراحی‌ها لحاظ شده و در هر قطاع به‌صورت جای خالی رها شده‌اند؛ البته این امکان وجود دارد که این مکان‌ها با مواد معادل ریه و اندام‌های توخالی پر شوند. بافت چربی موجود در قسمت‌های مختلف بدن انسان در فانتوم امکان‌سنجی شده نیز همانند فانتوم راندو معادل بافت نرم لحاظ شده. عدد اتمی مؤثر یک عامل مهم برای هر کدام از مواد پیشنهادشده برای ساخت فانتوم آنتروپومورفیک است، عدد اتمی مؤثر  $(Z_{\text{eff}})^2$  برای مواد مختلف از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Z_{\text{eff}} = [\sum F_i \times Z_i^{2.84}]^{1/2.84}$$

در این رابطه،  $F_i$  میزان درصد عنصر  $i$  ام و  $Z_i$  عدد اتمی عنصر  $i$  ام است؛ به‌طوری‌که مقادیر عدد اتمی مؤثر برای بافت‌های واقعی بدن در جدول ۴ نشان داده شده است [۸].

آنتروپومورفیک (غیرهمگن) است که دارای ۳۳ اسلایس، هرکدام به ضخامت  $2/5 \text{ cm}$  و ارتفاع کل فانتوم  $84 \text{ cm}$  است که تقریباً  $73/5 \text{ kg}$  نیز وزن دارد. استخوان به‌کاررفته در این فانتوم، از اسکلت واقعی بدن انسان است. همچنین، از لاستیک ایزوسیانات به‌عنوان معادل بافت نرم در این فانتوم استفاده شده است [۲] و [۳]. فانتوم آنتروپومورفیک امکان‌سنجی شده در این مطالعه، اهمیت‌های مختلفی دارد؛ از جمله اینکه یکی از محدودیت‌های فانتوم راندو را رفع می‌کند. اینکه فانتوم راندو از استخوان واقعی انسان ساخته شده است و مطابق تصاویر سی تی گرفته شده، نشان می‌دهد که قسمت‌های استخوانی فانتوم راندو باگذشت زمان پوسیده می‌شوند و این عامل باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌های مختلف می‌شود. در نتیجه، نیاز به اعمال فاکتور تصحیح است؛ در صورتی که مواد استخوانی پیشنهادشده برای فانتوم امکان‌سنجی شده دارای ماندگاری طولانی است و مشکل پوسیدگی استخوان را از بین برده است. نرم‌افزار Solid Works یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه طراحی قطعات حالت جامد و سازه‌های صنعتی به‌صورت سه‌بعدی است. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان تصاویر با فرمت jpg را در ضخامت و اندازه‌های مورد نیاز طراحی کرد [۴]. همچنین، دستگاه CNC یکی از دستگاه‌های قدرتمند و دقیق در برش و شکل‌دهی به قطعات حالت جامد است. این دستگاه می‌تواند فایل‌های نرم‌افزار Solid Works را بخواند و از واحد کنترل، طراحی‌های لازم را انجام دهد [۴] و [۵].

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. رزین اپوکسی

رزین اپوکسی از گروه پلیمرهاست که از دو جزء اپوکسی و هاردنر از سری محصولات شرکت مواد مهندسی مکرر است که بر پایه رزین اپوکسی نوع (ML-506) و هاردنر اپوکسی نوع

## ۳.۲. معادل بافت استخوان

معادل بافت استخوانی یکی از مهم‌ترین بخش‌های ساخت فانتوم آنتروپومورفیک بدن انسان است. ماده‌ای برای معادل بافت استخوان مناسب است که هم دانسیته و هم عدد اتمی مؤثر آن با بافت استخوان واقعی بدن انسان مطابقت داشته باشد. همچنین، از نظر هزینه مقرون‌به‌صرفه و طول عمر، ماندگاری بیشتری داشته باشد. با توجه به امکان‌سنجی‌های انجام‌شده در این زمینه، ابتدا استخوان ران گاو آسیاب شده و سپس سوزانده شده است تا طول عمر بیشتری داشته باشد (توسط شرکت نیکان دام کرج) [۹]. سپس با مخلوط کردن درصدهای مشخصی از ترکیبات پودر استخوان گاو، رزین اپوکسی و هاردنر خمیر معادل بافت استخوان حاصل می‌شود. فانتوم آنتروپومورفیک امکان‌سنجی شده به صورت قطاع‌های ۱ cm است. طراحی هر قطاع با نرم‌افزار Solid Works از روی تصاویر سی تی انجام شده است. تصاویر سی تی با ضخامت ۵ mm از بدن فانتوم راندو دانشگاه شیراز گرفته شده‌اند. تقریباً ۱۷۰ تصویر با فرمت DICOM از تمام قسمت‌های فانتوم راندو گرفته شده و سپس به فرمت jpg تبدیل شده تا نرم‌افزار Solid Works بتواند بخواند. یک نمونه تصویر سی تی گرفته‌شده از فانتوم راندو در شکل ۱ نشان داده شده است. برای گرفتن تصاویر سی تی از دستگاه زیمنس استفاده شده است، به طوری که تمام قسمت فانتوم راندو با پرتو ایکس به انرژی ۱۲۰ Kvp و ۶۳ mA تحت تابش قرار گرفته است. با توجه به قابلیت Solid Works، قطاع‌های طراحی شده مطابق تصاویر سی تی دارای ضخامت ۵ mm هستند؛ لذا دوتا دوتا روی هم اسمبل شده و در نهایت، ضخامت هر قطاع طراحی شده ۱ cm است. در صورت وجود قسمت‌های استخوانی، اندام‌های توخالی و ریه‌ها در هر تصویر سی تی، به هنگام طراحی با نرم‌افزار خارج می‌شوند و سپس به جای آن‌ها بافت معادل خود قرار داده خواهد شد.

جدول ۱: عناصر تشکیل‌دهنده مواد مورد استفاده [۵]

ماده	نیتروژن	کربن	هیدروژن
رزین	۵۴/۲۹	۴۹/۳۷	۱۲/۱۳
هاردنر	۰/۲۸۴	۷۱/۳۷	۴/۸۷۹

جدول ۲: ویژگی‌های هاردنر و اپوکسی [۵]

شکل ظاهری	مایع
رنگ	آبی
ویسکوزیته در ۲۵°C	تیکسوتروپ
دانسیته	۱/۱۱ gr/cm <sup>3</sup>
نسبت ترکیب وزنی	۱۰۰ واحد رزین اپوکسی ML-502
	۱۰ واحد هاردنر اپوکسی HA-11
زمان ترکیب دو جزء	۳ دقیقه
دمای کاری	۲۵ °C

جدول ۳: دانسیته بافت‌های مختلف بدن انسان [۷ و ۱۰]

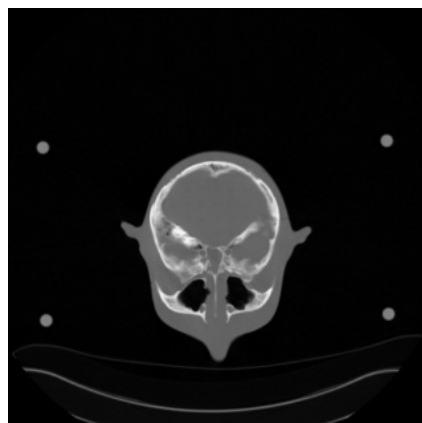
عضو	دانسیته (gr/cm <sup>3</sup> )
استخوان	۱/۶-۱/۹
بافت نرم	۱/۰۰
چربی	۰/۹۲
ریه	۰/۳۲

جدول ۴: عدد اتمی مؤثر Z<sub>eff</sub> بافت واقعی بدن [۸]

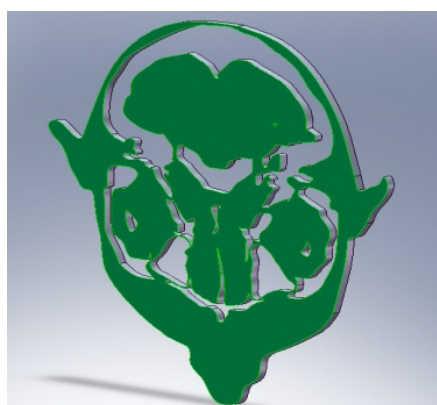
بافت	عدد اتمی مؤثر Z <sub>eff</sub>
بافت نرم	۸-۷
استخوان	۱۴

## ۳. نتایج

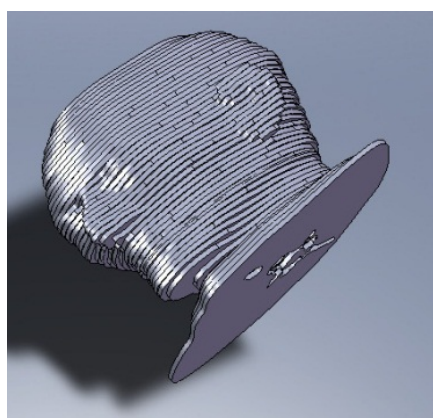
هدف از این مطالعه، امکان‌سنجی ساخت فانتوم آنتروپومورفیک است. طراحی فانتوم به کمک نرم‌افزار Solid



شکل ۱: نمونه تصویر سی تی گرفته از فانتوم راندو دانشگاه شیراز



شکل ۲: نمونه طراحی شده از روی تصاویر سی تی در نرم افزار Solid Works



شکل ۳: طراحی قسمت سر انجام شده در نرم افزار Solid Works

Works بر روی صفحه پلکسی گلاس و از روی تصاویر سی تی فانتوم راندو انجام شده است. تصاویر سی تی با ضخامت ۵mm از بدن فانتوم راندو موجود در دانشگاه شیراز گرفته شد و نمونه‌ای از آن در شکل ۱ نشان داده شده است. قسمت‌های استخوان، ریه و اندام‌های توخالی موجود در تصاویر سی تی، مطابق شکل ۲ با استفاده از نرم‌افزار Solid Works خارج شده‌اند. همچنین، نمونه طراحی شده ابعاد برابری با تصویر سی تی خود دارد، ولی به سبب نمایش از نزدیک بزرگ به نظر می‌رسد. برای امکان‌سنجی بافت معادل استخوان، درصد‌های مختلفی از پودر استخوان گاو، رزین اپوکسی و هاردنر مورد آزمایش قرار گرفت که مطابق جدول ۴ با اضافه کردن ۵۵/۱۸ درصد پودر استخوان گاو عدد اتمی مؤثر ۱۳/۶۷ حاصل شد. اما با اضافه کردن بیش از ۵۵/۱۸ درصد پودر استخوان محلول اشباع شد و قابلیت حل شدن را نداشت. بنابراین، نمونه خمیر استخوانی ساخته شده شامل ۵۵/۱۸ درصد پودر استخوان، ۱۰-۲۰ درصد هاردنر و ۳۰ درصد رزین اپوکسی است. مطابق جدول ۵ آزمایش‌های مختلف برای رسیدن به عدد اتمی مناسب نشان داده شده است. قطعات‌های طراحی شده مطابق شکل ۲ قرار است با دستگاه CNC برش داده شوند و سپس در هر قطعه، قسمت‌های مربوط با خمیر معادل استخوان پر شوند و در نهایت، پس از خشک شدن کامل مواد استخوانی در هر قطعه، قطعات روی هم سوار شده و فانتوم آنتروپومورفیک تمام بدن حاصل می‌شود. در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار Solid Works این کار در فضای نرم‌افزار امکان‌سنجی شده و قطعات مطابق شکل ۳ روی هم قرار داده شده و قسمت سر فانتوم تکمیل شده است.

در صورتی که در فانتوم راندو به دلیل استفاده از اسکلت طبیعی انسان، مطابق تصاویر سی تی گرفته شده مشاهده می‌شود که برخی از قسمت‌های استخوانی در حال پوسیدن است. روش دیگر ساخت فانتوم این است که فانتوم به طور کامل ساخته شود و سپس با ضخامت‌های مشخصی بریده شود. برای این کار باید ابتدا قالب فانتوم ساخته شود و سپس مواد مورد نیاز قالب‌ریزی شوند، اما طبق مطالعات انجام شده امکان ساخت قالب فانتوم هنوز در کشور ما وجود ندارد. بنابراین، مطابق ایده‌های این پژوهش، روش ساخت به صورت قطاع با ضخامت‌های مشخص که با نرم‌افزار Solid Works امکان‌سنجی شده، پیشنهاد داده می‌شود. در فانتوم‌های آنترپومورفیک قسمت‌های ریزی در هر قطاع وجود دارد که دوزیمترهای مشخصی برای اندازه‌گیری میزان دز جذب شده قرار می‌دهند. این مکان‌ها در فانتوم طراحی شده نیز لحاظ شده‌اند.

#### ۵. تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مالی دانشگاه شهید بهشتی، از پروژه‌های پژوهشی و همچنین همکاری آقای دکتر عیدی در مرحله ساخت این پروژه، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنیم.

جدول ۵: آزمایش‌های مختلف برای رسیدن به عدد اتمی مؤثر برای معادل استخوان ساخته شده

مورد	مواد	عدد اتمی مؤثر $Z_{eff}$
۱	۱۰% هاردنر	۶/۳۹
۲	۱۵% هاردنر	۶/۳۸
۳	۵۵/۱۸% استخوان	۱۳/۶۷۴
۴	۵۰% استخوان	۱۲/۶۹۰۹
۵	۴۰% استخوان	۱۱/۹۰۷۱
۶	۳۰% استخوان	۱۰/۹۷۹۵
۷	۲۰% استخوان	۹/۸۸۵۷
۸	۱۰% استخوان	۸/۴۸۶۹

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

مطابق جدول ۴، عدد اتمی مؤثر ( $Z_{eff}$ ) برای استخوان انسان در حدود ۱۴ است؛ بنابراین، نمونه معادل استخوان ساخته شده شامل درصد‌های مشخصی از ترکیبات پودر استخوان گاو، رزین اپوکسی و هاردنر است. در این مطالعه، بیشترین مقدار استفاده شده از پودر استخوان گاو، ۵۵/۱۸ درصد در نمونه است تا محلول مورد نظر اشباع نشود. همچنین، استخوان گاو را قبل از آسیاب، سوزانده تا ماندگاری بیشتری داشته باشد؛

#### ۶. مراجع

- [1] Soubra, M., J. Cygler, and G. Mackay, Evaluation of a dual bias dual metal oxide-silicon semiconductor field effect transistor detector as radiation dosimeter. Medical physics, 1994. **21**(4): p. 567-572.
- [2] Laboratory, T.P., Rando Phantom. Available from :<http://www.phantomlab.com/rando.html>., Accessed Nov 21, 2009.
- [3] ICRU44, Tissue Substitutes in radiation dosimetry and measurement, 1989.
- [4] S.W, solid Works software. Available from: <http://www.SolidWorks.com>, 2011.
- [5] [www.mokarrar-epoxy.com](http://www.mokarrar-epoxy.com), mokarrar, engineering materials .
- [6] Shokrieh, M.M., et al., Improvement of mechanical and electrical properties of epoxy

- resin with carbon nanofibers. Iranian Polymer Journal, 2013. 22(10): p. 721-727.
- [7] Constantinou, C., Tissue substitutes for particulate radiations and their use in radiation dosimetry and radiotherapy. 1978.
- [8] Murty, R.C. ,Effective atomic number of heterogeneous materials, Journal Natyre 207, pp 398-399, 24 july 1965. 1965.
- [9] [www.nikandam.ir](http://www.nikandam.ir) شرکت کشاورزی و دامپروری نیکان دام کرج.
- [10] Synder, W.S Report of the Task group on Reference man, Oxford, Pergamon Press, . 1974.