Archive of SID

مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۸، شمارهٔ ٤، ویژه‌نامه پرتوهای یون‌ساز، ۱۳۹۸، صفحه ۳٦۷-۳۷۲
پنجمین کنفرانس ملی سنجش و ایمنی پرتوهای یون‌ساز و غیریون‌ساز (مهرماه ۱۳۹۷)
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰٦/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

معرفی کامپوزیت استخوانی به عنوان معادل بافت جهت استفاده در فانتوم‌های رادیوتراپی

حامد کسائی[۱*]، رضا فقیهی[۱]، علی احمدی[۲] و علیرضا مؤمن رکن‌آبادی[۳]

[۱]بخش مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران.
[۲]پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.
[۳]بخش رادیوتراپی، بیمارستان بوعلی، تهران، ایران.
[*]فارس، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۱٦٥٤٨-۷۱۹۳٦
پست‌الکترونیکی: hamedk1@gmail.com

چکیده

جهت بررسی و شبیه‌سازی حرکت تومور متحرک در رادیوتراپی و بررسی دزیمتریک پوشش هدف متحرک، استفاده از وسیله‌ای که شرایط واقعی را شبیه‌سازی کند و از لحاظ جنس مواد و بافت‌ها معادل بدن انسان بوده و امکان اعمال حرکات داخلی بدن انسان را نیز داشته باشد، ضروری است. این وسیله که فانتوم متحرک نام دارد، باید حرکت تومور و حرکت‌های جایگزین را شبیه‌سازی و کنترل نماید.

در اغلب فانتوم‌های موجود بخش استخوان یا نادیده گرفته می‌شود و یا از استخوان طبیعی انسان استفاده می‌شود که به مرور زمان کیفیت خود را از دست داده، اضمحلال یافته و مشکلاتی را ایجاد می‌کند. در این تحقیق ماده‌ای کامپوزیت، مشابه استخوان طبیعی جهت جایگزینی بافت استخوانی در فانتوم پیشنهاد شده است که از دید رادیوتراپی معادل بافت استخوان می‌باشد.

این کامپوزیت برخلاف استخوان طبیعی، طول عمر و استحکام بیش‌تر و امکان تعبیه محل جایگذاری انواع دزیمترها را داشته و شرایط بررسی دزیمتریک ارگان‌های درخطر را نیز هنگام درمان تومور متحرک فراهم می‌سازد.

کلیدواژگان: فانتوم متحرک رادیوتراپی، بافت استخوان، کامپوزیت استخوانی.

۱. مقدمه

اصطلاح فانتوم در پرتوپزشکی به عنوان شبیه و معادل بکار می‌رود. طبق تعریفی که کمیسیون بین‌المللی واحدها و اندازه‌گیری تابش (ICRU) ارائه داده است، فانتوم حجمی است که حاوی یک یا چند ماده معادل بافت می‌باشد و به اندازه کافی بزرگ است تا بتواند پراکندگی کامل را برای باریکه به‌کاررفته فراهم سازد. این وسیله برای شبیه‌سازی برهم‌کنش پرتو با بدن انسان به کار می‌رود.

ماده معادل بافت، مایع یا جامدی است که خصوصیات جذب و پراکندگی‌اش برای یک تابش خاص همانند بافت خاصی از بدن مثل چربی، استخوان و یا ماهیچه باشد [۱].

Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 14:43 +0330 on Wednesday December 9th 2020

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 14:43 +0330 on Wednesday December 9th 2020

به‌طورکلی فانتوم‌ها برای اهداف مختلفی هم‌چون کالیبراسیون، کنترل کیفی، تضمین کیفیت و ارزیابی پارامترهای مختلف دستگاه‌های مورد استفاده در پرتوپزشکی از جمله پارامترهای مؤثر در کارآیی دستگاه، پارامترهای مؤثر در کیفیت تصاویر و مقادیر دز تحویلی دستگاه به مریض به کار می‌روند که بسته به هدفی که از استفاده‌ی فانتوم مربوطه متصور است، از شکل ظاهری، اندازه و مواد متناسب با هدف ساخته می‌شوند.

فانتوم در رادیوتراپی برای اهداف گوناگونی نظیر مقایسه تکنیک‌های درمانی مختلف، طراحی درمان برای بیماران مختلف، آموزش، بررسی سوانح تابشی و ارزیابی توزیع دز بکار می‌رود. اندازه‌گیری دقیق دز جذبی در رادیوتراپی برای کالیبراسیون روتین دستگاه‌ها و زمانی‌که روش‌های جدید درمانی قبل از استفاده کلینیکی ارزیابی می‌شوند، ضروری است [۲].

بهینه‌سازی توزیع دز جذبی را می‌توان با استفاده از پیشرفت‌های اخیر به عنوان مثال با استفاده از DMLC و سایر تکنیک‌های IMRT انجام داد. با توجه به عدم قطعیت تعیین موقعیت بیمار و دزیمتری داخل بدنی، یکی از عمده موانع رسیدن به درمان بهینه، نیاز به اطمینان از این است که آیا درمان واقعاً محاسبات دوز سیستم‌های طراحی درمان را برآورده می‌کند یا خیر؟ بنابراین باید از توزیع دز جذبی در نقاط مختلف اطمینان حاصل کرد و برای تأیید کل زنجیره درمانی، به اندازه‌گیری‌های سه بعدی دز جذبی نیاز می‌باشد [۳].

اندازه‌گیری توزیع دز بصورت مستقیم در بیماران درمان شده با اشعه، به‌ندرت امکان‌پذیر است. اطلاعات توزیع دز اغلب به طور کامل از سنجش در فانتوم‌ها استخراج می‌شود که معمولاً از لحاظ حجم به اندازه کافی بزرگ هستند تا بتوان شرایط پراکندگی کامل را برای باریکه‌ی مدنظر فراهم کرد. این اطلاعات در سیستم محاسبه‌ی دز بکار می‌رود تا بتوان توزیع دز را در یک مریض واقعی بدست آورد [۲].

جهت بررسی و شبیه‌سازی حرکت تومور متحرک در رادیوتراپی و بررسی دزیمتریک پوشش هدف متحرک، استفاده از فانتومی که امکان اعمال حرکات داخلی بدن انسان را داشته باشد، ضروری است. این فانتوم متحرک باید حرکت تومور و حرکت‌های جایگزین را شبیه‌سازی و کنترل نماید.

هندسه و ترکیب مواد فانتوم باید شبیه همتا و نظیر بیولوژیکی خودش در محدوده دقت لازم برای کاربردی خاص بوده و به آن نزدیک باشد. بررسی تناسب یک ماده معین شامل مقایسه‌ای میان ویژگی‌های برهم‌کنش با تابش مربوطه، چگالی جرمی و عدد اتمی مؤثر بافت بدن و ماده جایگزین می‌شود [۲و۴و۵].

هم‌چنین فانتوم‌ها را از دید شکل ظاهری و نوع مواد می‌توان به دسته‌های زیر تقسیم نمود: فانتوم استاندارد، فانتوم همگن و فانتوم بدنی که فانتومی به شکل بدن یا بخشی از آن می‌باشد. یک فانتوم بدنی عموما از مواد مختلف معادل بافت برای شبیه‌سازی بدن یا بخشی از آن از دید اندازه، شکل، موقعیت چگالی جرمی و برهم‌کنش با تابش تشکیل شده است. فانتوم بدنی از لحاظ پیچیدگی، از صفحات روی هم چیده شده‌ی جایگزین بافت تا فانتوم‌های انسان‌گونه شامل اسکلت گنجانده شده، حفره‌های هوایی و ریه‌های شبیه‌سازی شده، متغیر می‌باشد و در مطالعات دزیمتری و پرتودرمانی برای بررسی روش‌های درمانی مختلف و روش‌های جدید محاسبات، زیاد به کار می‌رود. فانتوم‌های بدنی انسان‌گونه، هندسه و ترکیب بدن انسان را شبیه‌سازی می‌کنند [۲و۶].

۲. مواد و روش‌ها

فانتوم‌ها در رادیوتراپی معمولاً از سه نوع ماده جایگزین بافت نرم، استخوان و ریه تشکیل می‌شوند که از دید

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 14:43 +0330 on Wednesday December 9th 2020

رادیوتراپی مواد مورد استفاده باید از نظر چگالی جرمی، عناصر تشکیل‌دهنده، عدد اتمی مؤثر و نیز ضریب تضعیف پرتو گاما در بازه انرژی مربوطه، با داده‌های تجربی انسانی مشابهت و مطابقت داشته باشد.

جهت اطمینان از این مشابهت، باید چگالی جرمی، عناصر تشکیل‌دهنده و عدد اتمی مؤثر و ضریب تضعیف برای مواد پیشنهادی مورد سنجش، ارزیابی و مقایسه قرار گیرد [٤-٦]. رزین‌های اپوکسی ترکیب عنصری مناسبی برای شبیه‌سازی بافت‌های مختلف دارند که می‌توان از آن به عنوان بخشی از جایگزین بافت استخوانی نیز استفاده نمود [٤].

$$\frac{Z}{A} = \sum_i a_i \cdot (\frac{Z_i}{A_i}) \qquad (۱)$$

$$\rho_e = \rho_m \cdot N_A \cdot (\frac{Z}{A}) \qquad (۲)$$

در رابطه ۱، N_A عدد آووگادرو و a_i کسر وزنی i امین عنصر با عدد اتمی Z_i و عدد جرمی A_i می‌باشد. از رابطه ۱ جهت محاسبه عدد اتمی موثر استفاده می‌گردد. چگالی‌های الکترونی بافت‌های مختلف انسان و مایعات بدن طبق رابطه ۲ توسط Shrimpton محاسبه شده‌اند [٦].

۱،۲. بافت استخوانی

بافت استخوانی طبیعی انسان یک چارچوب نگهدارنده‌ی بسیار ویژه برای بدن می‌باشد که با استحکام، سختی و توانایی بازسازی و تعمیرش متمایز می‌گردد و از ارگان‌های حیاتی مواظبت کرده و مواد معدنی همانند کلسیم را ذخیره می‌کند. استخوان در طول زندگی انسان جهت سازگاری با تغییرات نیروهای بیومکانیکی به طور مداوم تغییر شکل می‌دهد و با هدف حفظ استحکام، استخوان پیر و آسیب‌دیده با استخوانی جدید و قوی‌تر جایگزین می‌گردد.

استخوان دو جزء دارد: استخوان قشری؛ که چگال و سفت بوده و فضای مغز استخوان را احاطه می‌کند و استخوان میله‌ای؛ که از شبکه‌ای لانه زنبوری تشکیل شده است.

استخوان از سلول‌های نگهدارنده بنام استئوبلاست‌ها و استئوسیت‌ها، سلول‌های باز شکل‌دهنده بنام استئوکلاست‌ها، و شبکه ماتریسی غیرمعدنی پروتئین‌های کلاژنی و غیرکلاژنی بنام استئوئید با نمک‌های معدنی غیرآلی تجمع یافته در ماتریس تشکیل شده است. در طول زندگی، استخوان‌ها تحت فرآیندهای رشد شعاعی و طولی، شکل‌دهی و بازشکل‌دهی قرار دارند.

استخوان‌سازی، فرآیند تشکیل استخوان جدید توسط سلول‌های استئوبلاست می‌باشد که دو فرآیند عمده را شامل می‌شود: استخوان‌سازی درون غشایی و درون غضروفی.

هیدروکسی آپاتیت کریستالی $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ تشکیل‌دهنده‌ی عمده‌ی استخوان می‌باشد که حدود یک چهارم حجم و نصف جرم یک استخوان بالغ را شامل می‌شود. سوخت‌وساز ویتامین D و هورمون پاراتیروئید (PTH) واسطه‌های مهم تنظیم و کنترل کلسیم بوده و کمبود ویتامین D و پرکاری پاراتیروئید باعث تهی شدن استخوان از مواد معدنی خواهد شد [٧].

در اغلب فانتوم‌های موجود بخش استخوان یا نادیده گرفته می‌شود و یا از استخوان طبیعی انسان استفاده می‌شود که به مرور زمان کیفیت خود را از دست داده، اضمحلال یافته و مشکلاتی را ایجاد می‌کند [٨-١٠].

جهت رفع این معضل، ماده‌ای کامپوزیتی پیشنهاد شده است که به علت چسباندن فیلر استخوانی به همدیگر توسط رزین، برخلاف استخوان طبیعی، طول عمر و استحکام بیشتری دارد. این کامپوزیت، امکان تعبیه محل جایگذاری انواع

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 14:43 +0330 on Wednesday December 9th 2020

دزیمترها را داشته و شرایط بررسی دزیمتریک ارگان‌های درخطر را نیز هنگام درمان تومور متحرک فراهم می‌سازد. هم‌چنین با توجه به عدم استفاده از فلز به عنوان جایگزین استخوان، فانتوم، قابلیت چند مدالیته بودن و Compatible MR بودن (همساز بودن با MRI) هم خواهد داشت.

۲،۲. کلسیناسیون

جهت تهیه جزء معدنی کامپوزیت، استخوان طبیعی پس از آسیاب شدن، در کوره دما بالا تا ۱۱۰۰ درجه حرارت داده شد تا اجزای فرار آن تبخیر شده و فقط جزء معدنی آن باقی بماند.

۳،۲. اختلاط کامپوزیت استخوانی

با توجه به این‌که بافت طبیعی استخوان شامل مواد آلی هم می‌باشد لذا جهت مشابهت با آن باید پودر استخوان را با ماده‌ای دیگر مخلوط نمود تا هم از نظر عناصر تشکیل‌دهنده و هم عدد اتمی مؤثر و چگالی با استخوان طبیعی مطابقت داشته باشد. لذا پودر با رزین و درصد مشخصی از هاردنر (سخت‌کننده) مخلوط شد تا این هدف مهم حاصل گردد. هم‌چنین استفاده از رزین باعث بهم چسبیدن فیلر استخوانی شده و استحکام مناسبی به کامپوزیت می‌دهد که نقص استخوان طبیعی در این خصوص، در طول زمان (و اضمحلال بافت طبیعی، درون فانتوم) را نخواهد داشت.

۴،۲. عمل‌آوری و شکل‌دهی

پس از اختلاط پودر استخوان با رزین، جهت رسیدن به شکل مورد نظر، عمل‌آوری و دست‌یابی به استحکام بیش‌تر، مخلوط کامپوزیتی در قالب مناسبی ریخته شده و در کوره ۸۰ درجه به مدت ۲٤ ساعت قرار داده شد (شکل ۱).

۳. نتایج

تست‌های اعتبارسنجی: در نهایت جهت اطمینان از معادل بافت بودن کامپوزیت، چگالی، عناصر تشکیل‌دهنده (انجام آنالیز عنصری، تست CHN برای رزین و XRF برای پودر استخوان)، عدد اتمی مؤثر و ضریب تضعیف آن مورد سنجش و محاسبه قرار گرفت که نتایج آن در جداول۱ و ۲ آمده است. برخی عناصر معدنی به مقدار بسیار کم در پودر استخوان مشاهده گردید که در استخوان طبیعی موجود نیست و احتمال می‌رود از تجهیزات تهیه پودر استخوان به ترکیب آن افزوده شده باشد. هم‌چنین ضریب تضعیف رزین و کامپوزیت، از طریق کد MCNP محاسبه و با نتایج عملی مقایسه شده‌است (جدول۲).

با توجه به چگالی جرمی و عدد اتمی مؤثر ماده پیشنهادی بجای استخوان (دو عامل مهم در جایگزینی بافت، که برای استخوان طبیعی به ترتیب، (gr/cm^3) ۱/٦٥ و ۱۲/۳۱ می‌باشد [٦]) و ساخت ستون مهره‌ها از این ماده، انتظار طول عمر بیش‌تر و مقاومت بالاتر در برابر تخریب‌ها می‌رود.

جدول(۱): نتایج آنالیز عنصری رزین، کامپوزیت و استخوان طبیعی [۲].

عنصر	رزین(٪)	کامپوزیت(٪)	استخوان طبیعی(٪)
C	٦٥/۲	۲۹/۳٤	۱٥/٥
H	٤/٤	۱/۹۸	۳/٤
N	٦/٥	۲/۹۲٥	٤/۲
O	۲۳/۹	۳٦/۳۸٥	٤۳/٥
Al	---	۰/۰٥٥	---
Fe	---	۰/۰٥٥	---
Mg	---	۰/۲۷٥	۰/۲
S	---	۰/۰٥٥	۰/۳
Cl	---	۰/۱۱	---
Ca	---	۲۲	۲۲/٥
Na	---	۰/۳۳	۰/۱
Si	---	۰/۰٥٥	---
P	---	٦/۳۲٥	۱۰/۳
Ti	---	۰/۱۱	---
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

www.SID.ir

Archive of SID

جدول(۲): نتایج مربوط به رزین و کامپوزیت.

مواد	چگالی جرمی (gr/cm^3)	عدد اتمی مؤثر	ضریب‌تضعیف محاسبه شده توسط MCNP	ضریب‌تضعیف از نتایج عملی
رزین	۱/۰۷۶	٦/٥٤٩	۰/۰۷۰۰	۰/۰٦٥۳
کامپوزیت	۱/۷۵۹	۱۳/٦٤۲	۰/۰۸۲۰	۰/۰۸۵۹

شکل(۱): نمونه آزمایشگاهی کامپوزیت ساخته شده.

۴. نتیجه‌گیری

استفاده از ماده کامپوزیت مذکور به جای بافت طبیعی استخوان (برخلاف اغلب فانتوم‌های موجود که از استخوان طبیعی استفاده می‌کنند) علاوه بر دارا بودن مزایای استحکام و طول عمر، یک نوآوری در ساخت فانتوم متحرک قفسه سینه (در دست طراحی و ساخت) می‌باشد که در اغلب فانتوم‌های موجود نادیده گرفته شده است.

هم‌چنین امکان تعبیه محل جایگذاری انواع دزیمترها را داشته و شرایط بررسی دزیمتریک ارگان‌های درخطر را نیز هنگام درمان تومور متحرک فراهم می‌سازد و با توجه به عدم استفاده از فلز به عنوان جایگزین استخوان، فانتوم، قابلیت چند مدالیته بودن و MR Compatible بودن هم خواهد داشت.

Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 14:43 +0330 on Wednesday December 9th 2020

www.SID.ir

Archive of SID

۵. مراجع

[1] ICRU. Measurement of absorbed dose in a phantom irradiated by a single beam of X or gamma rays. ICRU Report 23, (1973).

[2] ICRU. Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement. ICRU Report 44, (1989).

[3] Back, S.A.J. Implementation of MRI gel dosimetry in radiation therapy. Doctoral dissertation, Lund University, Malmo, Sweden, (1998).

[4] White, D.R., Martin, R.J.,& Darlison, R. Epoxy resin based tissue substitutes. Brit. J. Radiol. 50 814-821, (1977).

[5] Hasanzadeh, H.,& Abedelahi, A. Introducing a simple tissue equivalent anthropomorphic phantom for radiation dosimetry in diagnostic radiology and radiotherapy. J. Paramed. Sci. 2(4) 25-29, (2011).

[6] Khan, F.M., & Gibbons, J.P. The Physics of Radiation Therapy, (5thed.) Philadelphia, USA: Lippincott Williams & Wilkins, (2014).

[7] Fogelman, I., Gnanasegaran, G., & van der Wall, H. Radionuclide and hybrid bone imaging. Kini U. & Nandeesh B. N. Physiology of Bone Formation, Remodeling, and Metabolism (pp. 29-57) Springer, (2012).

[8] Kim,J., Lee, Y., Shin,H., Ji, S., Park,S., Kim, J.Y., JangH., & Kang, Y. Development of deformable moving lung phantom to simulate respiratory motion in radiotherapy, journal of Medical Dosimetry, (2015).

[9] Modus medical devices inc. QUASAR catalogue from http://www.modusmed.com, (2016).

[10] اکملی، ز.، شهبازی، د.، مصلح شیرازی، م.، برادران، م.، فلاحیان، ن.، شرکت، ص. طراحی و ساخت فانتوم چهاربعدی ریه برای بررسی حرکت تومور در حین تنفس در پرتودرمانی با استفاده از تصویربرداری رزونانس مغناطیسی.مجله دانشکده پزشکی اصفهان، ۳۳۳، ۶۳۱-۶۴۲، (۱۳۹۴).

Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 14:43 +0330 on Wednesday December 9th 2020

www.SID.ir