

بسمه تعالی



شهادت این دانشمند برجسته در راه آرمان‌های بلند
و الهی، به کشور، انقلاب اسلامی، ملت ایران و محیط
علمی آبرو بخشید.

مقام معظم رهبری



نویزندگان مقاله

پراسحاقانی، باشم میری حکیم آباد و لاله رفعت منلی

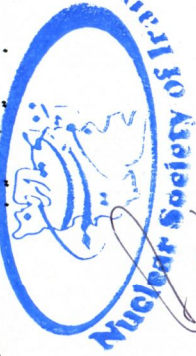
نظریه‌پرداز مقاله: آرزو شاه‌دانش‌دوست

بررسی خصوصیات مولود عادل بافت ناتوم فیزیکی در تصویربرداری تشخیصی^۱

دربست و موسین کتونس - ستای ایران در دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات - عنوان یکی از مقالات برتر در بخش مقالات شورای دانش‌آموزان است، جایزه آنا و شید

دکتر محمد سپیدیاری

در سال ۱۳۹۵ شمادلی کرد. موفقیت در فعالیت‌های پژوهشی و خدمت کشور عزیزان را مدیون توجیات حضرت ولیمسراج برای شاد روز دینیم.



دکتر فیدون بابی

ویر علمی ۳۳ کتونس - ستای ایران

بررسی خصوصیات مواد معادل بافت فانتوم فیزیکی در تصویربرداری تشخیصی

اخلاقی، پریسا*^(۱) - میری حکیم آباد، هاشم^(۲) - رفعت متولی، لاله^(۳)

^۱ دانشگاه علوم پزشکی تبریز، دانشکده پزشکی، گروه فیزیک پزشکی

^۲ دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده:

یکی از روش‌های تعیین مقدار دز جذبی اندام‌ها، استفاده از فانتوم‌های فیزیکی مناسب می‌باشد، که تا حد امکان مشخصات بدن انسان را داشته باشند و بتوانند رفتار واقعی پرتو در بدن را شبیه‌سازی کنند. در این پژوهش، نحوه انتخاب مواد معادل بافت براساس ضریب تضعیف جرمی، عدد اتمی موثر، چگالی بافت و چگالی الکترونی و همچنین دزسنجی بیان می‌شود. در این راستا، با توجه به مواد معادل بافت موجود، سه نوع ماده مختلف به عنوان ماده معادل استخوان، جایگزین بافت نرم و ماده معادل ریه انتخاب شدند. نتایج نشان داد که پلی اورتان، فوم پلی اورتان و پلی وینیل کلرید به ترتیب برای مواد معادل بافت نرم، ریه و بافت استخوانی در ولتاژ 120 kVp مناسب هستند.

کلمات کلیدی: فانتوم فیزیکی، تصویربرداری تشخیصی، چگالی الکترونی، عدد اتمی موثر، دزسنجی

مقدمه :

فانتوم‌های فیزیکی ساختارهایی هستند که برای شبیه‌سازی اندرکنش‌های تابش در داخل بدن طراحی شده‌اند [۱]. اغلب از فانتوم‌ها برای مطالعات دزسنجی تابش، کیفیت تصویربرداری و همچنین مدرج‌سازی تجهیزات رادیوگرافی استفاده می‌شود. ممکن است فانتوم‌ها با یک هندسه ساده و یک نوع بافت جایگزین (مثل یک قطعه حاوی آب برای شبیه‌سازی بافت نرم)، ساخته شده باشند یا این‌که هندسه‌های پیچیده‌تری با چندین بافت جایگزین برای ایجاد فانتوم در نظر گرفته شده باشد. این فانتوم‌های واقع‌گرایانه پیچیده‌تر، فانتوم‌های شبه‌انسان نامیده می‌شوند که با ابعاد، شکل و ترکیبات بدن انسان تطابق دارند و همان خصوصیات تضعیف و پراکندگی بافت واقعی بدن را نشان می‌دهند [۲].

معمولاً از آب به عنوان جایگزین بافت در فانتوم‌های فیزیکی استفاده می‌شود که بدن را به صورت یک بافت نرم همگن شبیه‌سازی می‌کند [۳]. با این وجود، ناهمگنی‌هایی مانند استخوان و ریه در بدن وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. زیرا در بازه انرژی تشخیصی و در مواد با عدد اتمی بیشتر مانند استخوان برهم کنش فوتوالکتریک غالب است، در حالی که در مواد با عدد اتمی پایین مثل بافت نرم یا هوا پراکندگی کامپتون غالب است. بنابراین نوع برهم‌کنش پرتو ایکس با عدد اتمی ماده تغییر می‌کند، پس در فانتوم فیزیکی مناسب باید مواد مختلفی به عنوان بافت نرم، ریه و استخوان در نظر گرفته شوند.

بافت جایگزین باید همان میزان تضعیف و پراکندگی تابشی در بافت واقعی انسان را نشان دهد و این خصوصیات فیزیکی را در مدت زمان طولانی و بدون آسیب دیدن از تابش حفظ کند. خصوصیات فیزیکی مهم در مطالعات فوتونی، ضریب تضعیف جرمی، عدد اتمی موثر، چگالی بافت و چگالی الکترونی هستند. باید توجه داشت که ضریب تضعیف جرمی به شدت به انرژی وابسته است و باید برای مواد و بافت‌های مختلف در گستره وسیعی از انرژی‌ها محاسبه شود [۴]. اگر مواد معادل بافت از نظر این خصوصیات فیزیکی معادل با بافت بدن انسان باشند، میزان دز جذب شده در اندام‌های این فانتوم مشابه با بدن انسان می‌باشد. در این پژوهش با توجه به خصوصیات فیزیکی مواد معادل بافت پیشنهادی در متون، سه نوع ماده مختلف به عنوان ماده معادل استخوان، جایگزین بافت نرم و ماده معادل ریه مشخص شده است.

روش کار :

برای انتخاب مواد معادل بافت مناسب، ترکیبات مختلف پیشنهاد شده توسط محققان دیگر و همچنین ترکیباتی که از نظر مشخصات فیزیکی نزدیک به بافت‌های واقعی انسان بودند در نظر گرفته شده‌اند. ترکیبات مختلفی از اپوکسی رزین با درصد‌های مختلفی از فنل [۴]، فسفات پتاسیم (K_2HPO_4) [۵]، پلاستیک معادل استخوان (B-100) [۶]، پلی‌وینیل کلرید (PVC) و ماده پیشنهادی در نسخه ۷۰ مجله ICRP [۷] به عنوان مواد احتمالی جایگزین استخوان انتخاب شده‌اند. پلاستیک معادل بافت (A-150) [۶]، پلی‌اورتان [۸]، گاز معادل بافت (براساس متان)، گاز معادل بافت (براساس پروپان)، ترکیب پیشنهادی بافت نرم توسط وایت [۹]، آب [۳]، پلی‌کربنات، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیل، اتیلن‌بیس‌استرامید (EBS) و پلکسی‌گلس به عنوان مواد جایگزین بافت نرم انتخاب شده‌اند. مواد پیشنهادی برای ریه فوم پلی‌اورتان [۸]، ترکیبی از جنس چوب‌پنبه [۱۰] و ترکیب پیشنهادی ریه توسط وایت [۹] بودند.

خصوصیات فیزیکی که در انتخاب مناسب‌ترین مواد معادل بافت بررسی می‌شوند، چگالی ماده، چگالی الکترونی، عدد اتمی موثر و ضرایب تضعیف در بازه انرژی تشخیصی می‌باشند. چگالی الکترونی (ρ_e) (تعداد الکترون‌ها بر گرم ماده) و عدد اتمی موثر Z_{eff} مواد معادل بافت به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند، که در این روابط N_A عدد آووگادرو و Z_i ، W_i و A_i به ترتیب نسبت وزنی، عدد اتمی و عدد جرمی اتم نام می‌باشند [۱۰].

$$\rho_e = N_A \sum_i \frac{W_i Z_i}{A_i} \quad 1$$

۲

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i \frac{W_i Z_i}{A_i}}{\sum_i \frac{W_i}{A_i}}$$

ضرایب تضعیف هر عنصر توسط برنامه XCOM موجود در سایت atom.kaeri.re.kr [۱۱] به دست آمده است و ضرایب تضعیف کل برای هر ترکیب، با اجرای یک برنامه فرترن و با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شده است [۱۲]. در این برنامه، برای هر انرژی، درصد وزنی هر عنصر موجود در ترکیب در ضریب تضعیف جرمی (برحسب $g.cm^{-2}$) آن عنصر در آن انرژی ضرب می‌شود و مجموع تمام حاصلضرب‌ها برای تمام عناصر، ضریب تضعیف جرمی ترکیب را در انرژی مربوطه مشخص می‌کند که با ضرب آن در چگالی ترکیب ضریب تضعیف خطی محاسبه می‌شود. برای هر ماده پیشنهادی ضرایب تضعیف کل در بازه انرژی keV ۱۲۰-۳۰ محاسبه و با ضرایب تضعیف بافت واقعی مقایسه می‌شوند.

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Compound} = \sum_i W_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad ۳$$

برای بررسی بیشتر، مقدار دز در فانتوم ۸ سال مرجع [۱۳] با مواد اصلی و مواد معادل بافت در ولتاژهای مختلف در تصویربرداری با دستگاه Siemens SOMATOM Sensation 16 محاسبه می‌شود. روش شبیه سازی چشمه در پژوهش‌های قبلی گزارش و تایید شده است [۱۴]. محاسبه کرمای فوتون در اندام‌های مختلف با استفاده از تالی F6 انجام شده است. با توجه به برقرار بودن تعادل الکترونی برای فوتون‌های کم انرژی، تقریب کرما مورد قبول می‌باشد و دز جذبی با کرما برابر است. با مقایسه دز در بافت اصلی فانتوم و مواد معادل بافت پیشنهادی، می‌توان ماده مناسب را انتخاب کرد.

نتایج :

چگالی فیزیکی، چگالی الکترونی و عدد اتمی موثر مواد معادل بافت در جدول شماره (۱) داده شده است. با توجه به جدول می‌توان گفت که از نظر چگالی فیزیکی، چگالی الکترونی و عدد اتمی موثر، پلی‌اورتان و آب به عنوان بافت نرم، فوم پلی‌اورتان به عنوان بافت ریه و B-100 به عنوان استخوان بیشترین تطابق را با بافت های واقعی ایجاد می‌کنند.

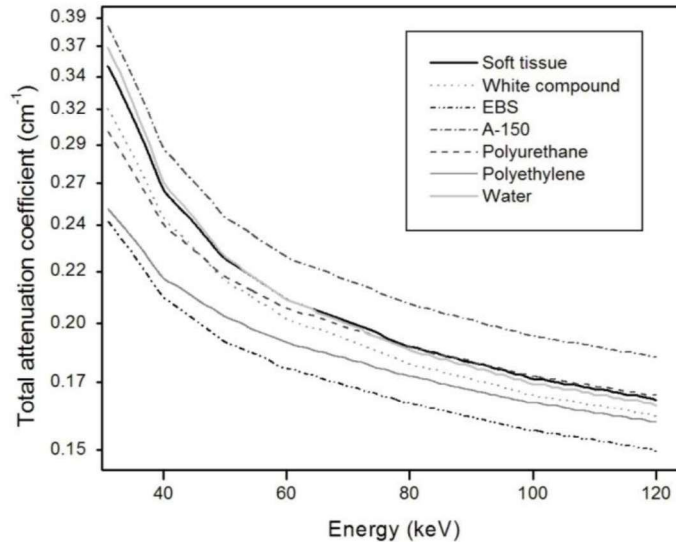
ضرایب تضعیف مواد معادل بافت نرم در شکل شماره (۱) نمایش داده شده است. نمودارهای مشابه برای ریه و استخوان موجود است. با توجه به ضریب تضعیف جرمی آب در بازه انرژی تشخیصی (keV ۱۲۰-۳۰) بیشترین تطابق را با بافت نرم دارد. برای انرژی‌های بیشتر از keV ۶۰، ضریب تضعیف پلی‌اورتان تطابق خوبی با ضریب تضعیف بافت نرم دارد؛ به طوری که در انرژی‌های بیش از keV ۸۰ تطابق آن از آب هم

بیشتر است. ضریب تضعیف ترکیب پیشنهادی وایت برای ریه در انرژی‌های بیشتر از ۴۰ keV و ضریب تضعیف فوم پلی‌اورتان در انرژی‌های بیشتر از ۸۰ keV با داده‌های مربوط به بافت ریه سازگاری دارند. ضرایب تضعیف B-100 و PVC در انرژی‌های بیشتر از ۸۰ keV سازگاری خوبی با بافت استخوانی واقعی دارند. در جدول (۲) ترکیب‌های مختلفی از این مواد نشان داده شده است. اگرچه این مواد معادل از نظر خصوصیات فیزیکی نزدیک به بافت انسان هستند، اما به دلیل تفاوت‌هایی که با بافت واقعی دارند، ممکن است رفتار آن‌ها در مواجهه با پرتو فرودی به بدن انسان متفاوت باشد. بنابراین، دز آن‌ها نیز با هم مقایسه خواهند شد تا بتوان بهترین مواد معادل بافت را، برای فانتوم فیزیکی مناسب برای مقاصد دزسنجی در تصویربرداری سی‌تی، انتخاب کرد. شکل شماره (۲) حاوی نتایج تعیین دز جذبی برحسب mGy/mAs برای تعدادی از اندام‌ها در تصویربرداری سی‌تی تنه در ولتاژ ۱۲۰ kVp با مواد اصلی و معادل می‌باشد.

جدول شماره (۱) چگالی فیزیکی، چگالی الکترونی و عدد اتمی موثر سه بافت نرم، ریه و استخوان بافت واقعی و مواد معادل بافت پیشنهادی

ماده	چگالی فیزیکی (g/cm ³)	چگالی الکترونی (e/g×10 ²³)	عدد اتمی موثر
بافت نرم	۱/۰۴	۳/۳۳	۳/۲۹
A-150	۱/۱۳	۳/۳۱	۳/۱۸
EBS	۹/۰۱×۱۰ ^{-۱}	۳/۴۰	۲/۸۳
پلی‌اورتان	۱/۰۵	۳/۲۸	۳/۳۹
پلی‌اتیلن	۹/۵۰×۱۰ ^{-۱}	۳/۴۴	۲/۶۷
گاز معادل بافت براساس متان	۱/۰۶×۱۰ ^{-۳}	۳/۳۲	۳/۲۸
گاز معادل بافت براساس پروپان	۱/۸۳×۱۰ ^{-۳}	۳/۳۲	۳/۲۳
آب	۱/۰۰	۳/۳۵	۳/۳۳
بافت نرم پیشنهادی توسط وایت	۱/۰۰	۳/۲۸	۳/۴۱
پلکسی گلس	۱/۱۸	۳/۲۵	۳/۶۰
پلی‌کربنات	۱/۲۰	۳/۱۸	۴/۰۶
پلی‌پروپیلن	۹/۴۶×۱۰ ^{-۱}	۳/۴۴	۲/۶۷
ریه	۳/۰۳×۱۰ ^{-۱}	۳/۳۲	۳/۴۲
فوم پلی‌اورتان	۳/۰۰×۱۰ ^{-۱}	۳/۲۸	۳/۴۳
چوب پنبه	۲/۷۰×۱۰ ^{-۱}	۳/۲۷	۳/۵۲
بافت ریه پیشنهادی توسط وایت	۳/۲۰×۱۰ ^{-۱}	۳/۱۸	۴/۰۱

۴/۰۸	۳/۲۳	۱/۴۰	استخوان
۵/۳۳	۳/۱۱	۱/۳۶	PVC
۵/۹۷	۳/۱۰	۱/۹۲	بافت استخوان در نسخه ۷۰ ICRP
۴/۱۶	۳/۱۸	۱/۴۵	B-100
$۱/۰۸ \times ۱۰^{+۱}$	۲/۹۸	۲/۴۴	K ₂ HPO ₄



شکل شماره (۱) میزان تضعیف کل بافت نرم و مواد معادل بافت نرم پیشنهادی بر حسب انرژی

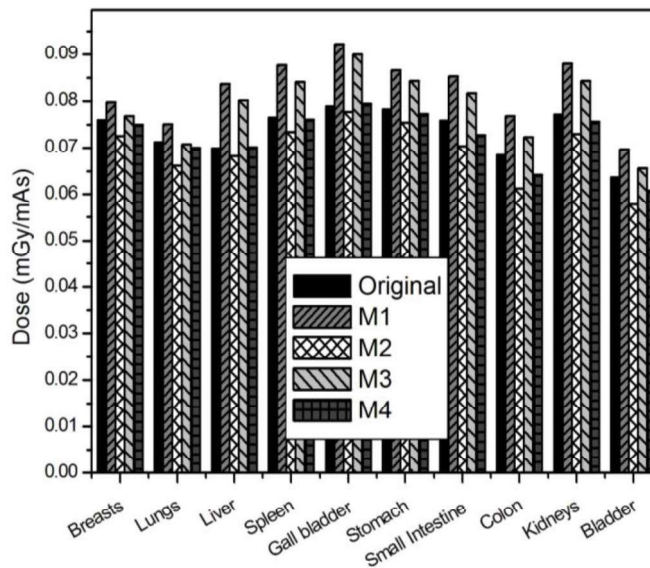
جدول شماره (۲) مواد معادل بافت پیشنهادی برای بافت نرم، ریه و استخوان.

بافت استخوان	بافت ریه	بافت نرم	
B-100	فوم پلی اورتان	پلی اورتان	مواد معادل نوع ۱ (M1)
PVC	فوم پلی اورتان	آب	مواد معادل نوع ۲ (M2)
PVC	فوم پلی اورتان	پلی اورتان	مواد معادل نوع ۳ (M3)
B-100	فوم پلی اورتان	آب	مواد معادل نوع ۴ (M4)

بحث و نتیجه گیری :

در این پژوهش نحوه انتخاب مواد معادل بافت مناسب برای یک فانتوم فیزیکی که تحت پرتوگیری سی تی قرار می گیرد، بررسی شده است. به این منظور، سه نوع ماده معادل مختلف بافت نرم، استخوان و ریه برای ساخت فانتوم در نظر گرفته شده است. خصوصیات فیزیکی که بررسی شدند، چگالی ماده، چگالی الکترونی، عدد اتمی موثر، عدد سی تی و ضرایب تضعیف در بازه انرژی تشخیصی بودند. نتایج نشان داد که آب و پلی

اورتان برای بافت نرم، فوم پلی‌اورتان برای ریه و B-100 و PVC برای استخوان بیشترین تطبیق را بافت‌های اصلی دارند. برای انتخاب بهترین این مواد در ولتاژهای مختلف، مقدار دز در اندام‌های فانتوم ۸ سال مرجع با مواد اولیه و همچنین مواد پیشنهادی محاسبه شدند. نشان داده شد که انتخاب مواد معادل نوع ۴ در ولتاژ ۸۰ kVp و مواد معادل نوع ۳ در ولتاژ ۱۲۰ kVp منطقی به نظر می‌رسد.



شکل شماره (۲) مقدار دز جذبی اندام‌ها با مواد معادل بافت مختلف در ولتاژ ۱۲۰ kVp

مراجع :

- 1- International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU report 48: Phantoms and computational models in therapy, diagnosis, and protection. Bethesda: 1993.
- 2- Bower MW. A physical anthropomorphic phantom of a one-year-old child with real-time dosimetry. PhD thesis at University of Florida, 1997.
- 3- Constantinou C, et al. A solid water phantom material for radiotherapy x-ray and gamma-ray beam calibrations. Med. Phys. 1982; 9: 436-441.
- 4- Xu XG and Eckerman KF. Handbook of anatomical models for radiation dosimetry. New York: Taylor & Francis, 2010.
- 5- Torikoshi M, et al. Electron density measurement with dual energy x-ray CT using synchrotron radiation. Phys. Med. Biol. 2003; 48: 673-685.
- 6- Shonka FR, et al. Conducting plastic equivalent to tissue, air, and polystyrene. in Proceedings of the second international conference on the peaceful uses of atomic energy. Geneva, 1958.
- 7- International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 70: Basic anatomical & physiological data for use in radiological protection - The skeleton. Pergamon: 1995.
- 8- Kim JI, et al. Physical phantom of typical Korean male for radiation protection purpose. Radiat. Prot. Dosim. 2006; 118: 131-136.
- 9- White DR. Tissue substitutes in experimental radiation physics. Med. Phys. 1978; 5: 467-479.
- 10- Chang KP, et al. A comparison of physical and dosimetric properties of lung substitute materials. Med. Phys. 2012; 39: 2013-2020.

- 11- Nuclear Data Center. Available from: <http://atom.kaeri.re.kr/>.
- 12- Gowda S, et al. Photon mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities of some thermoluminescent dosimetric compounds. *Pramana* 2004; 63: 529-541.
- 13- Lee C, et al. Whole-body voxel phantoms of paediatric patients-UF Series B. *Phys.Med.Biol.* 2006; 51: 4649-4661.
- 14- Akhlaghi P, et al. Dose estimations in Iranian 11-year-old pediatric phantoms undergoing computed tomography examinations. *J. Rad. Res.* 2015; 56: 646- 655.