

Dosimetry Studies and Ionizing Radiation Shielding Design Caused by Imaging of Breast Cancer Cells

Ali-Asghar Hayat-Davoudi^{1,2}, Mahdi Eshghi^{1*}, Mansour Asgari¹, Javad Karimi¹

¹ Department of Physical, Faculty and Research Institute of Basic Sciences, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

² Vice President of Health, Treatment and Medical Education, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 8 June 2023 Accepted: 18 December 2023

Abstract

Background and Aim: Ionizing radiation protection is one of the most fundamental research and application fields in reducing the absorbed dose of sensitive internal organs. The presence of lead as the first radiation shield with a series of good features such as high density and having some flexibility and a series of bad features such as toxicity, low physical and chemical stability and high weight, have been thinking about replacing it for a long time. In the mammography section, the lead shields present during mammography cause limitations in the patient's work and are generally not used. As a result, they lose their efficiency. Therefore, it is necessary to propose and design a lead-free shield that can have suitable radiation attenuation in the range of mammography energy up to 60 keV and does not create limitations for the patient compared to the existing shields in this sector.

Methods: In this study, the evaluation of X-ray and gamma-ray shielding for nine different proposed compounds was done using a computational code MCNPX based on the Monte Carlo method, in the photon energy range of 15 to 400 keV, which is the energy range used in Covers the mammography section.

Results: Among the selected protective compounds, the combination of Kennertium showed a more suitable protective function than the other compounds. To reach such a result, the mass attenuation coefficient of the Kennertium compound has been calculated in three thicknesses of 0.1, 0.5, and 1 cm. In the following, to check the performance of selected shields of ionizing radiation, for the thickness of 1 mm of Kennertium composition, the dose reached the tissues close to the tumoral area located in the patient's left breast, such as the left lung, thyroid, and heart, has been calculated with the presence of such protection.

Conclusion: Quantitative results show that the Kennertium compound completely covers the energy range above 60 keV and as a proposed compound for interacting with X-rays, does not produce secondary particles.

Keywords: Radiation Shield, Dosimetry, Kennertium.

مطالعات دزیمتری و طراحی حفاظ پرتوهای یونیزان ناشی از تصویربرداری سلول‌های سرطانی پستان

علی اصغر حیات داوودی^۱، مهدی عشقی یار عزیز^{۱*}، منصور عسگری^۱، جواد کریمی^۱

^۱ مرکز علم و فناوری فیزیک، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۲ معاونت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی بقیه‌الله (عج)، تهران، ایران

چکیده

زمینه و هدف: حفاظ‌سازی پرتوهای یون ساز، یکی از بنیادی‌ترین زمینه‌های پژوهشی و کاربردی در کاهش دُز جذبی ارگان‌های حساس داخلی می‌باشد. حضور سرب به عنوان اولین محافظ پرتوی با یک سری ویژگی‌های خوب مثل چگالی زیاد و داشتن مقداری انعطاف‌پذیری و یک سری ویژگی‌های بد مثل سمی بودن، پایداری فیزیکی و شیمیایی پایین و وزن زیاد، مدت زیادی است به فکر جایگزین برای آن هستند. در بخش ماموگرافی، حفاظ‌های سربی موجود در هنگام ماموگرافی، باعث محدودیت در کار بیمار شده و اصولاً استفاده نمی‌شوند. در نتیجه، کارایی خود را از دست می‌دهند. بنابراین، لازم است یک حفاظ عاری از عنصر سرب پیشنهاد و طراحی شود که بتواند تضعیف پرتوی مناسبی در محدوده انرژی ماموگرافی تا انرژی ۶۰ کیلو الکترون‌ولت را داشته و نسبت به حفاظ‌های موجود این بخش محدودیت‌هایی برای بیمار ایجاد ننماید.

روش‌ها: در این مطالعه، ارزیابی محافظ‌های پرتوهای ایکس و گاما برای ۹ ترکیب مختلف پیشنهادی با استفاده از کد محاسباتی بر پایه روش مونت کارلو (MCNPX)، در محدوده انرژی فوتون ۱۵ تا ۴۰۰ کیلو الکترون‌ولت پرداخته شده که محدوده انرژی مورد استفاده در بخش ماموگرافی را پوشش می‌دهد.

یافته‌ها: در بین بررسی ترکیبات حفاظی منتخب، ترکیب کنتیوم از عملکرد حفاظی مناسب‌تری نسبت به بقیه ترکیب‌ها را نشان داد؛ برای رسیدن به چنین نتیجه‌ای، ضریب تضعیف جرمی ترکیب کنتیوم را در سه ضخامت ۰/۱، ۰/۵ و ۱ سانتی‌متر محاسبه شده است. در ادامه، برای بررسی عملکرد حفاظ‌های منتخب تابش‌های یونیزان، برای ضخامت ۱ میلی‌متر ترکیب کنتیوم، دُز رسیده به بافت‌های نزدیک به ناحیه تومورال واقع در پستان سمت چپ بیمار مثل ریه سمت چپ، تیروئید و قلب با وجود چنین حفاظی محاسبه گردیده است.

نتیجه‌گیری: نتایج کمی صورت گرفته نشان می‌دهد که ترکیب کنتیوم محدوده انرژی بالاتر از انرژی ۶۰ کیلو الکترون‌ولت را کاملاً پوشش داده و به‌عنوان ترکیب پیشنهادی، با برهمکنش پرتوهای ایکس با آن، ذرات ثانویه هم تولید نمی‌کند.

کلیدواژه‌ها: حفاظ پرتو، دزیمتری، کنتیوم.

مقدمه

مانند سرب، تنگستن، بتن و مصالح ساختمانی قابل جذب هستند. زیرا، برهم کنش پرتوهای گاما و ایکس به انرژی فوتون‌های ورودی و عدد اتمی عناصر سازنده ترکیب بستگی دارند (۳). درک مناسب برهمکنش پرتو ایکس و گاما با ماده اولین کلید برای یافتن مواد محافظ تشعشع با خواص فیزیکی مناسب است. مواد با عدد اتمی بالا و عناصر با چگالی بالا، احتمال برهمکنش پرتوهای ایکس و گاما با ماده محافظ را افزایش می‌دهند که انتخاب خوبی به عنوان مواد حفاظ می‌باشند. تایید شده است که مواد سنگین توانایی بالایی در تضعیف پرتوهای ایکس و گاما دارند که مهمترین ویژگی یک ماده محافظ تشعشع برای محافظت در برابر تشعشع است. وزن، ضخامت و هزینه مواد محافظ نگرانی‌های مهمی است که محققان را برای یافتن مواد محافظ پرتوی مناسب مورد توجه قرار می‌دهد. سرب همیشه به عنوان یک جزء اصلی برای تولید مواد محافظ پرتوی برای چندین دهه مورد استفاده قرار گرفته است، زیرا کیفیت مطلوبی را فراهم می‌کند. اما سرب یک ماده سمی است و می‌تواند برای کاربران و افراد در طیف وسیعی مضر باشد. ثانیاً این ماده شکننده بوده و جرم زیادی دارد. تولید ذرات ثانویه ناخواسته در سرب هم مزید بر علتی است که می‌توان مواد جایگزین را پیشنهاد داد. در نتیجه، پیشنهاد ترکیب و یا مواد غیرسمی در جایگزینی سرب با تمرکز بر سبکی، هزینه معقول و انعطاف‌پذیری ضروری هستند. یکی از احتمالات جایگزینی سرب ممکن است تحت تأثیر کامپوزیت‌های بدون سرب باشد که در اشکال مختلف در صنایع استفاده می‌شوند (۴). بنابراین، مواد کامپوزیتی یکی از جایگزین‌های مناسب برای سرب به عنوان محافظ پرتو ایکس و گاما است که می‌توان خواص آن‌ها را با ترکیب و تکنیک‌های آماده سازی اصلاح کرد (۵-۷).

در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی بر روی مواد مختلف برای بهبود عملکرد مواد محافظ رایج و توسعه مواد جدید انجام شده است (۸-۱۲). برخی از این مطالعات، بر روی مواد کامپوزیتی با استفاده از روش‌های مختلف برای دستیابی به حفاظ‌های کامپوزیتی مؤثر انجام شده است. چرا که استفاده از مواد مختلف به صورت ترکیبات کامپوزیتی، باعث کاهش وزن و افزایش انعطاف‌پذیری شده و ممکن است باعث بهبود خواص مکانیکی، الکتریکی، حرارتی و چند عملکرد دیگر آن‌ها نیز شوند.

اخیراً، Saltan و Körpınar، ترکیب پلی استیرین آکرلیک اسید-اکسید روی که نوعی کامپوزیت بدون سرب را در آزمایشگاه آماده کردند و نشان دادند که این ماده قابلیت حفاظ پرتویی در مقابل پرتوهای یونیزان را تا حدودی دارد (۱۳). Madbouly و همکاران نشان دادند که بوروفسفات شیشه‌ای برای انرژی پرتو گامای ۶۶۲، ۱۱۷۳، ۱۲۷۵ و ۱۳۳۳ کیلوکترن‌ولت، قابلیت حفاظی دارد. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن اکسید بور به شبکه شیشه‌ای خواص محافظ را بهبود می‌بخشد (۱۴). More و همکاران سنتز مواد پلیمری مانند فلئوتتال را برای محافظت در

حفاظت انسان و محیط زیست در برابر اثرات زیان‌بار مواد پرتوزا و دستگاه‌های یون‌ساز از طریق وضع قوانین و مقررات مربوطه و همچنین کنترل و نظارت بر رعایت آن‌ها، ممکن می‌شود (۱).

اقدامات اساسی کمیسیون بین المللی حفاظت رادیولوژیکی (ICRP) در کاهش دز دریافتی گروه‌های مختلف پرتوی، شامل: به حداقل رساندن زمان پرتوگیری، به حداکثر رساندن فاصله از منبع پرتو و ایجاد حفاظ در مقابل منابع پرتوی می‌باشد. بنابراین، بهینه‌سازی و تکامل حفاظ‌ها به عنوان یک اصل اساسی احساس می‌شود که می‌بایست با اقدامات ویژه‌ای مانند کاهش حداقل ممکن دز دریافتی بافت‌های اطراف ناحیه تصویربرداری شده انجام دهیم.

از طرف دیگر، ماموگرافی نوعی سیستم تصویربرداری از پستان‌ها بوده که معمولاً جهت تشخیص زودهنگام سرطان‌های سینه در خانم‌ها و در محدوده سنی ۳۵ سال مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سیستم، انرژی پرتوهای ایکس و گاما در محدوده‌ی ۵۰-۲۵ کیلو الکترون‌ولت است؛ زیرا بافت پستان‌ها جزء بافت‌های نرم بوده و جهت تابش‌دهی به انرژی بالاتری نیاز ندارد. چرا که پرتوهای ایکس و گاما دارای قدرت نفوذ زیادی در بافت می‌باشند. این پرتوها هنگام عبور از بافت ایجاد یونیزاسیون نموده و نهایتاً یا جذب ماده شده و یا با انرژی پایین‌تر پراکنده و از بافت خارج می‌شوند. مشکلی که در هنگام ماموگرافی وجود دارد این است که هیچگونه حفاظی برای چنین انرژی‌هایی وجود ندارد. چنین مشکلی، ممکن است در دیگر بخش‌های مختلف پزشکی هم وجود داشته باشد. بنابراین، نیاز به طراحی حفاظ متناسب با هر بخش، بسیار زیاد بوده و برآوردن نیاز طیف وسیعی از بیماران و پرتوکارانی، که به طور مستقیم یا غیرمستقیم با پرتوهای یونیزان (مثل متخصصان گروه‌های آنژیوگرافی، مغز و اعصاب، ارتوپدی، بیهوشی، کارشناسان تصویربرداری پزشکی) سروکار دارند، امری ضروری است.

یکی از روش‌های کاهش شار پرتوهای گاما و ایکس در این سیستم‌ها، حفاظ‌گذاری است. امروزه با توجه به خطرات زیان‌بار پرتوها، انواع مختلفی از حفاظ‌ها، جهت محافظت پرتوکاران و بیماران گسترش یافته است. از مهمترین ترکیباتی که کاربرد گسترده‌ای هم دارند، می‌توان به ترکیبات مختلف بتون و سرب جهت طراحی اتاق‌های تصویربرداری، ترکیبات مختلف شیشه‌ای و عینک‌های مقاوم در پرتوی یونیزان جهت اتاق‌های کنترل، ترکیبات مختلف کامپوزیتی جهت روپوش‌های پرتوی و غیره اشاره کرد.

به دلیل اثرات بیولوژیکی، از گذشته تا حال، مطالعه جذب پرتوهای گاما و ایکس در مواد موضوع مهمی در زمینه فیزیک تشعشعات بوده است (۲). این تشعشعات، در موادی با چگالی بالا

تفاوت داشته و ممکن است که تاثیر پرتوهای ایکس روی این مواد، برهم کنش‌های ثانویه ایجاد نماید. بنابراین، در این پژوهش، ما به بررسی ویژگی حفاظی یک ترکیب مناسب بدون سرب برای پرتوهای ایکس و گاما در بخش ماموگرافی می‌پردازیم. برای انجام این کار، از کد مونت کارلویی MCNPX استفاده کرده و نتایج به دست آمده را با نتایج برنامه NIST XCOM مقایسه می‌کنیم. در ادامه، برای محاسبات دزیمتری، با استفاده از فانتوم استاندارد ORNL، با قرار دادن حفاظ برگزیده در اطراف پستان‌های فانتوم مورد نظر، اقدام به اندازه‌گیری دز قلب، ریه و تیروئید می‌نمائیم.

روش‌ها

۹ ترکیب مورد استفاده و بدون سرب برای حفاظ تابش‌های یونیزان ایکس و گاما با جزئیات بیشتر در جدول ۱ نشان داده شده است. به جهت سهولت کار، برای هر ترکیب یک نام مخفف به صورت S_1 تا S_9 به کار برده شده است.

برابر تشعشع را با تمرکز بر نقش نانوپرکننده‌ها و در مورد اثربخشی مواد پلیمری برای جذب نوترون‌های سریع بحث کرده و بازیافت پلیمرها را به کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند (۱۵). Elsheikh قابلیت حفاظی ترکیبات اکسید آلومینیوم، فلورید منیزیوم، فلوئنتال، کربید تنگستن و فلورید آلومینیوم را با استفاده از کد MCNP در مقابل چشمه‌های کالیفرنیم-۲۵۲ و چشمه‌های گاما بررسی کرده است (۱۶). Saadi و Moadab با استفاده از شبیه‌سازی نشان دادند که مواد منیزیوم بوروهیدرید و «کنتیم» به ترتیب بهترین عملکرد را در کاهش دز نوترون و گاما دارند. آن‌ها اشاره کردند که ترکیب این دو ماده می‌تواند میزان دز کل تشعشعات را تا یک سوم مقدار مرجع کاهش دهد (۱۷).

علی‌رغم تحقیقات خوبی که محققین مورد اشاره در حوزه ترکیبات مواد کامپوزیتی انجام داده‌اند، خلاء بررسی تکمیلی قابلیت حفاظی در مقابل پرتوهای ایکس و گاما در حوزه پزشکی به‌قوت خود باقی است. چرا که ماهیت پرتوهای ایکس و گاما با همدیگر

جدول-۱. جزئیات ترکیبات مورد استفاده برای حفاظ تابش یونیزان گاما و ایکس

% Weight Fractions																چگالی	مواد
Ni	Cu	Pb	Li	F	Al	Bi	P	Na	B	W	Zn	O	H	C			
												۰/۱۸۱۸	۰/۵۸۶۵	۰/۷۵۰۰		۱/۰۵	S_1
											۰/۰۰۶۰	۰/۱۹۷۸	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۳۳		۱/۲	S_2
							۰/۰۹۵۷۰	۰/۰۰۵۰۵۴	۰/۰۰۹۱			۰/۰۵۳۵۳۸۵				۲/۳۴	S_3
						۰/۰۱۷۶۴۵۳	۰/۰۳۴۵۸۴۵	۰/۰۰۷۶۰۳۱	۰/۰۰۷۷۵۰			۰/۰۳۱۵۴۳				۳/۳۳	S_4
			۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۱۱											۳	S_5
					۰/۰۰۱۵							۰/۰۰۸۰				۳/۹۵	S_6
			۱													۱۱/۳۴	S_7
										۰/۰۰۹۵۵				۰/۰۰۱۳۵		۱۵/۶۳	S_8
	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۵									۰/۰۰۵۱۵					۱۶/۸	S_9

ایکس و گاما مورد بررسی قرار می‌گیرد (۱۳). ترکیب S_2 که ترکیب پلی‌استیرن آکرلیک اسید- اکسید با درصد ۱۵٪ اکسید

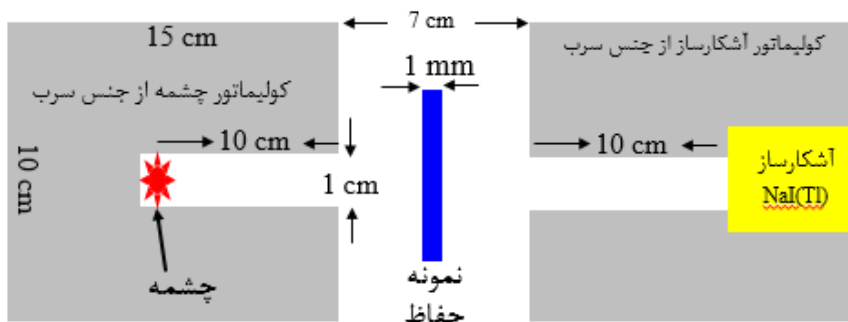
ترکیب پلی‌استیرن آکرلیک اسید با S_1 نامگذاری شده که نوعی کامپوزیت بوده و یک گزینه مناسب به‌عنوان محافظ پرتو

می‌باشد. چگالی این ترکیب ۱۶/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و به‌عنوان گزینه دیگر برای بررسی محافظ پرتوی است (۱۷).

روش کار و شبیه‌سازی

کد MCNPX یکی از قویترین کدهای محاسباتی در انجام محاسبات هسته‌ای است و بر اساس روش مونت‌کارلو کار می‌کند. واژه مونت‌کارلو، یک الگوریتم آماری محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبات نتایج خود استفاده می‌کند. در حقیقت، هر پدیده فیزیکی یک فرآیند آماری است که تبارد ذرات مختلف در محیط‌های گوناگون نمونه بارزی از این واقعیت است. در این فرآیند آماری برهم‌کنش‌های ذره با محیط را می‌توان یک سری رویدادهای احتمالی دانست که با استفاده از توابع توزیع احتمال حاکم بر این رویدادها، رفتار ذرات شبیه‌سازی می‌شوند. در کد MCNPX، سطح مقاطع برخورد همان توابع توزیع احتمال هستند که در نهایت با استفاده از روش مونت‌کارلو که یک روش آماری و تصادفی برای حل مسائل فیزیکی است حرکت ذرات شبیه‌سازی خواهند شد. بنابراین، این کد، یک کد چندمنظوره است که برای محاسبات تبارد ذراتی نظیر الکترون، پروتون، نوترون، ذرات باردار سنگین، فوتون و ... است. این کد در طراحی راکتورهای هسته‌ای و بررسی ایمنی آن‌ها، حفاظ‌سازی، طراحی آشکارسازها، چاپیمایی هسته‌ای، طراحی هدف در شتابدهنده‌ها، پرتو پزشکی و ... کاربردهای بسیاری دارد.

در این بخش، از هندسه شبیه‌سازی حفاظ در کد محاسباتی MCNPX در ضخامت‌های ۰/۱، ۰/۵ و ۱ سانتی‌متر به شکل ۱ استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ و همچنین در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. هندسه شبیه‌سازی حفاظ در کد محاسباتی MCNPX در ضخامت‌های ۰/۱، ۰/۵ و ۱ سانتی‌متر

ذخیره شده در واحد جرم ماده را محاسبه می‌کند) در این کد، می‌توانیم بسیاری از ویژگی‌های دلخواه حفاظی ترکیب موردنظر خود را پیدا کنیم. لازم به توضیح می‌باشد که در کد مونت‌کارلو MCNPX، فرآیند گرفتن خروجی‌ها به کمک تالی‌ها صورت می‌گیرد.

بنابراین، ترکیبات حفاظی خود را مطابق جدول ۱ با در نظر گرفتن سه حالت با ضخامت‌های متفاوت ۰/۱، ۰/۵ و ۱ سانتی‌متر

روی به‌عنوان گزینه دیگری از محافظ پرتوهای ایکس و گاما را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این ترکیب، اکسید روی به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است. زیرا، اکسید فلزات سنگین با عدد اتمی بالا باعث ایجاد اثربخشی بالا و اثر فوتوالکتریک غالب در تضعیف گاماها کم انرژی مورد استفاده خواهد شد. در اینجا اکسید روی با درصدهای وزنی صفر و ۱۵ در نظر گرفته شده است (۱۳).

ترکیب S_3 که ترکیب شیشه‌های بوروفسفات $(B_2O_3-P_2O_5)$ بوده که نوعی حفاظ شیشه‌ای با ترکیبات فسفر و اکسید بور است (۱۴). ترکیب S_4 که ترکیب شیشه‌های بوروفسفات با ۱۰٪ اکسید بیسموت که نوعی حفاظ شیشه‌ای با ترکیبات فسفر و اکسید بور است که برای افزایش خاصیت محافظتی آن، اکسید بیسموت (Bi_2O_3) با درصدهای وزنی ۱۰ به آن افزوده شده است (۱۴). ترکیب S_5 با نام فلوتنتال که آلیاژی متشکل از ترکیبات فلورید آلومینیوم و لیتیوم می‌باشد گزینه انتخابی ما برای بررسی محافظ ایکس و گاما می‌باشد (۱۵). ترکیب S_6 که یک ترکیب اکسید آلومینیوم با چگالی ۳/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است (۱۶). عنصر S_7 به‌عنوان عنصر سرب که اولین ماده‌ای که به‌عنوان محافظ پرتوی مورد استفاده بشر قرار گرفته، که به علت داشتن چگالی بالا و در حدود ۱۱/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب بیشترین استفاده در حوزه پرتویی را به خود اختصاص داده است؛ اما امروزه و پس از مشخص شدن خواص مضر آن مثل سمیت و جذب پوستی در حال حذف شدن از حوزه پرتویی می‌باشد (۱۶).

ترکیب S_8 با نام کربید تنگستن است که با چگالی ۱۵/۶۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب مورد بررسی قرار گرفته است (۱۶). در نهایت، ترکیب S_9 با نام کزنتیم که آلیاژی از جنس تنگستن، مس و نیکل

در این کد، حفاظ ترکیبی خود را در بین چشمه رادیواکتیو و آشکارساز مطابق شکل ۱ قرار می‌دهیم. اطراف چشمه و آشکارساز مربوطه با یک حفاظ سربی به منظور جلوگیری از ورود و خروج دیگر پرتوها پوشانده می‌شود. کولیماتور (موازی‌ساز پرتو ورودی) هم بین چشمه و حفاظ قرار داده می‌شود. بعد از تعیین ورودی و ساختار شبیه‌سازی مناسب، با استفاده از تالی‌های F_4 (تالی ۴، مقدار شار حجمی را بدست می‌دهد) و F_6 (تالی ۶، مقدار دز مقدار انرژی

معیاری است که نشان می‌دهد یک ماده به ازای هر واحد جرم ماده، پرتوی الکترومغناطیسی مانند اشعه ایکس یا پرتوها گاما را به چه میزان تضعیف می‌کند. مقادیر ضریب تضعیف جرمی (μ/ρ) برای موادی که از چند عنصر مختلف تشکیل شده به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu/\rho = \sum \omega_i(\mu/\rho)_i \quad (2)$$

که در این رابطه ω_i کسر وزنی و $(\mu/\rho)_i$ ضریب تضعیف جرمی i امین عنصر ترکیب می‌باشد.

نتایج

بخش حفاظ

نتایج محاسبه شده حاصل از شبیه‌سازی در کد محاسباتی MCNPX به صورت شکل‌های ۲ تا ۴ آورده شده است.

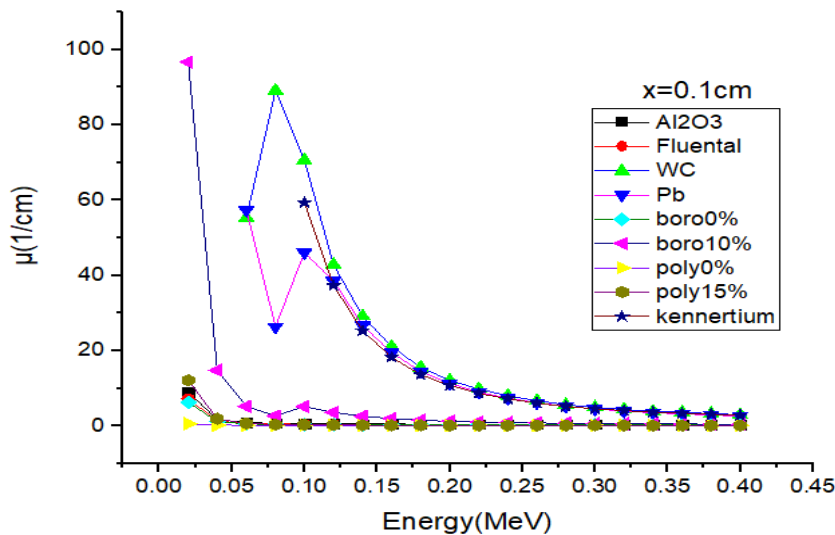
از هر ماده موردنظر و در محدوده انرژی ۲۰ تا ۴۰۰ کیلو الکترون ولت بررسی می‌کنیم تا محدوده انرژی موردنظر ما در سیستم ماموگرافی ۳۰ تا ۵۰ کیلو الکترون‌ولت را کاملاً پوشش دهد. با این روش، نتایج استخراج شده در بخش بعدی ارائه و تحلیل می‌گردند.

مفاهیم نظری حفاظ‌سازی

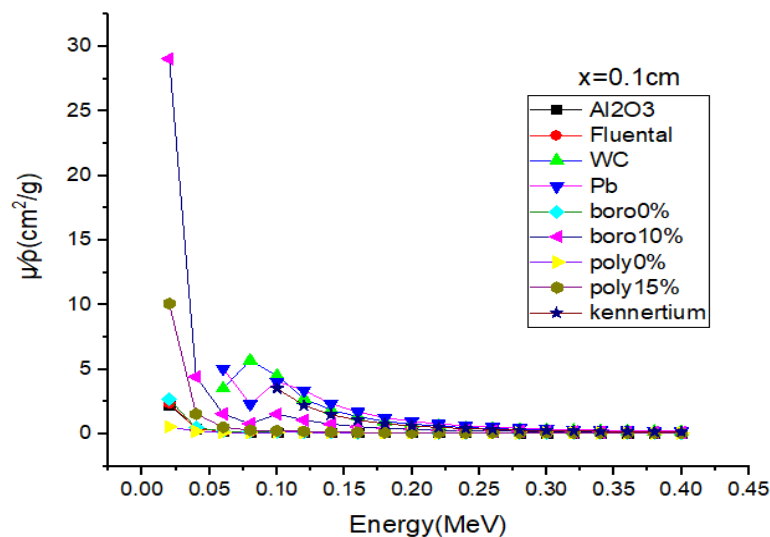
با رجوع به مفاهیم نظری در حوزه حفاظ، مشاهده می‌کنیم که هنگامی که پرتو ایکس و گاما از یک ماده محافظ عبور داده می‌شود، شدت پرتو طبق قانون بیر-لامبرت کاهش می‌یابد که رابطه آن به صورت معادله زیر نمایش داده می‌شود:

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (1)$$

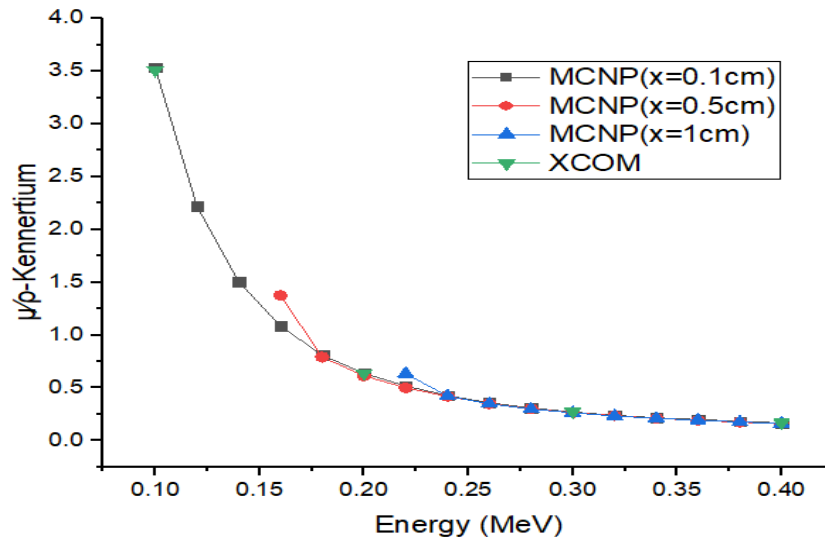
که I_0 معرف شدت پرتو اولیه، I شدت پرتو ثانویه، t ضخامت ماده و μ ضریب تضعیف خطی می‌باشد. کمیت مهم دیگر، ضریب تضعیف جرمی است. این ضریب،



شکل-۲. نمودار تغییرات ضریب تضعیف خطی برای مواد مختلف در ضخامت ۰/۱ cm.



شکل-۳. نمودار تغییرات ضریب تضعیف جرمی برای مواد مختلف در ضخامت ۰/۱ cm.



شکل-۴. مقایسه‌ی نتایج محاسبه‌شده با کد MCNP با داده‌های پایگاه NIST XCOM برای کمیت ضریب تضعیف جرمی کنتریوم

کاهش می‌یابد. سیر نزولی در انرژی‌های پایین با شیب تند و سریع‌تر از سیر نزولی در انرژی‌های بالاتر بوده و این سیر به مرور با کاهش کمتری همراه است. دلیل این امر، سطح مقطع بالای جذب فوتوالکتریک فوتون‌ها (جذب کامل انرژی فوتون) در محدوده‌ی انرژی‌های پایین است. سپس با افزایش انرژی، احتمال این اندرکنش کاهش یافته و سطح مقطع اندرکنش کامپتون بالا می‌رود. در این فرایند انرژی فوتون به‌طور کامل جذب نمی‌شود، ولی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به همین دلیل، شاهد تضعیف پایین در انرژی‌های بالاتر هستیم.

یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار در کاهش شدت پرتو ورودی به بافت با توجه به یافته‌ها، انرژی لبه K عناصر به کار رفته در حفاظ می‌باشد که باعث کاهش پیوسته ضریب تضعیف جرمی شده و ممکن است در یک سری انرژی‌های میانی جهشی رخ دهد که این جهش به صورت یک افزایش ناگهانی ایجاد خواهد شد. این افزایش ناگهانی تضعیف، حتی در ترکیبات سرب که امروزه به عنوان حفاظ مورد استفاده قرار می‌گیرد، مشاهده شد.

در جدول ۲ نتایج عددی ضرایب تضعیف خطی و جرمی مربوط به ترکیب‌های کنتریوم و کربید تنگستن و عنصر سرب با ضخامت ۰/۱ cm آورده شده است. علت انتخاب چنین ضخامتی در این است که بر اساس تجربه، انتخاب ضخامت بیش از این مقدار باعث محدودیت حرکتی بیمار می‌شود. به‌عبارت دیگر، بیمار هنگام گرفتن پوزیشن جهت انجام ماموگرافی با محدودیت حرکتی مواجه نشود. در این جدول مقایسه‌ای مشاهده می‌شود که در انرژی‌های زیر ۳۰۰ کیلو الکترون‌ولت، ترکیب کنتریوم نسبت به دو ترکیب کربید تنگستن و عنصر سرب از تضعیف بهتری برخوردار است.

بخش دزیمتری

در این بخش، از فانتوم استاندارد زن بالغ ORNL برای محاسبات دزیمتری استفاده شده است. در این قسمت، محاسبات

همان‌طور که از شکل‌های ۲ و ۳ قابل مشاهده است، ضرایب تضعیف خطی و جرمی برای مواد ذکر شده در جدول ۱ به ضخامت ۰/۱ سانتی‌متر رسم شده است. با توجه به این شکل‌ها، با افزایش انرژی فوتون‌های گاما، تضعیف به‌صورت نمایی در همه مواد صورت می‌گیرد. اما تضعیف سریع‌تر مربوط به ترکیب‌های کربید تنگستن و کنتریوم و عنصر سرب می‌باشد که در بین این مواد کنتریوم بالاترین تضعیف را داراست. نکته قابل ملاحظه این است که در محدوده انرژی‌های ۵۰-۳۰ کیلو الکترون‌ولت، ترکیب کنتریوم تضعیف مناسبی در خصوص پرتوهای ایکس و گاما با انرژی پایین‌تر از ۳۰۰ کیلو الکترون‌ولت از خود نشان می‌دهد، و می‌توان گفت که این عنصر تضعیف بهتر از تضعیف عنصر سرب و کربید تنگستن از خود نشان می‌دهند. این بدان معنی است که ترکیب کنتریوم نیز می‌تواند گزینه حفاظ ایده‌آلی برای سیستم ماموگرافی و در این محدوده انرژی باشد.

در شکل ۴ نتایج ضریب تضعیف جرمی ترکیب کنتریوم حاصل از کد محاسباتی MCNPX با نتایج داده‌های پایگاه NIST XCOM مقایسه شده است که همخوانی خوبی با همدیگر دارند. خطای حاصل از نتایج به‌دست آمده ضرایب تضعیف طبق رابطه زیر محاسبه شده است:

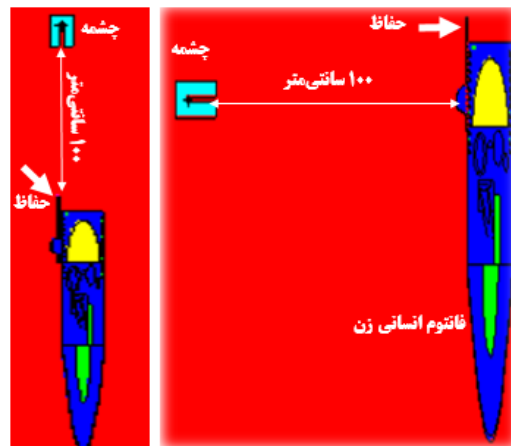
$$\text{Diff} = \left| \frac{\mu_{xcom} - \mu_{MCNPX}}{\mu_{xcom}} \right| * 100 \quad (3)$$

با توجه به اینکه بازه انرژی‌های ۳۰ تا ۵۰ کیلو الکترون در این مطالعه حائز اهمیت است، اختلاف بین نتایج به‌دست آمده از این دو کد محاسباتی در حدود کمتر از ۵٪ به دست آمد و تطابق قابل قبولی را شاهد هستیم.

نکته دیگری که لازم است در اینجا یادآوری شویم این است که مقدار تغییرات در ضریب تضعیف خطی نسبت به ضریب تضعیف جرمی بیشتر بود؛ اما به‌طور کلی، با افزایش انرژی، مقدار تضعیف

جدول-۲. نتایج عددی محاسبه شده ضرایب تضعیف خطی و جرمی مربوط به ترکیب‌های کنترتیوم و کربید تنگستن و عنصر سرب با ضخامت ۰/۱ cm با استفاده از کد محاسباتی MCNPX

ضریب تضعیف جرمی			ضریب تضعیف خطی			انرژی
μ/ρ Kennertum	μ/ρ wc	μ/ρ pb	μ Kennertum	μ wc	μ pb	
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-02
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.00E-02
0.00E+00	3.54E+00	5.06E+00	0.00E+00	5.53E+01	5.74E+01	6.00E-02
0.00E+00	5.70E+00	2.32E+00	0.00E+00	8.91E+01	2.64E+01	8.00E-02
1.55E+01	4.50E+00	4.03E+00	5.94E+01	7.06E+01	4.61E+01	1.00E-01
9.77E+00	2.76E+00	3.42E+00	3.73E+01	4.29E+01	3.85E+01	1.20E-01
6.62E+00	1.87E+00	2.36E+00	2.53E+01	2.91E+01	2.67E+01	1.40E-01
4.78E+00	1.36E+00	1.73E+00	1.82E+01	2.11E+01	1.95E+01	1.60E-01
3.56E+00	1.00E+00	1.29E+00	1.36E+01	1.55E+01	1.45E+01	1.80E-01
2.81E+00	7.87E-01	1.01E+00	1.07E+01	1.21E+01	1.13E+01	2.00E-01
2.27E+00	6.43E-01	8.13E-01	8.68E+00	9.80E+00	8.97E+00	2.20E-01
1.88E+00	5.35E-01	6.80E-01	7.17E+00	8.03E+00	7.39E+00	2.40E-01
1.58E+00	4.39E-01	5.56E-01	6.05E+00	6.67E+00	6.11E+00	2.60E-01
1.36E+00	3.74E-01	4.83E-01	5.19E+00	5.62E+00	5.25E+00	2.80E-01
1.20E+00	3.29E-01	4.17E-01	4.57E+00	4.95E+00	4.53E+00	3.00E-01
1.06E+00	2.89E-01	3.60E-01	4.05E+00	4.36E+00	3.93E+00	3.20E-01
9.54E-01	2.56E-01	3.19E-01	3.64E+00	3.89E+00	3.51E+00	3.40E-01
8.78E-01	2.33E-01	2.84E-01	3.35E+00	3.62E+00	3.20E+00	3.60E-01
8.10E-01	2.07E-01	2.53E-01	3.09E+00	3.26E+00	2.90E+00	3.80E-01
7.34E-01	1.92E-01	2.38E-01	2.80E+00	2.96E+00	2.64E+00	4.00E-01

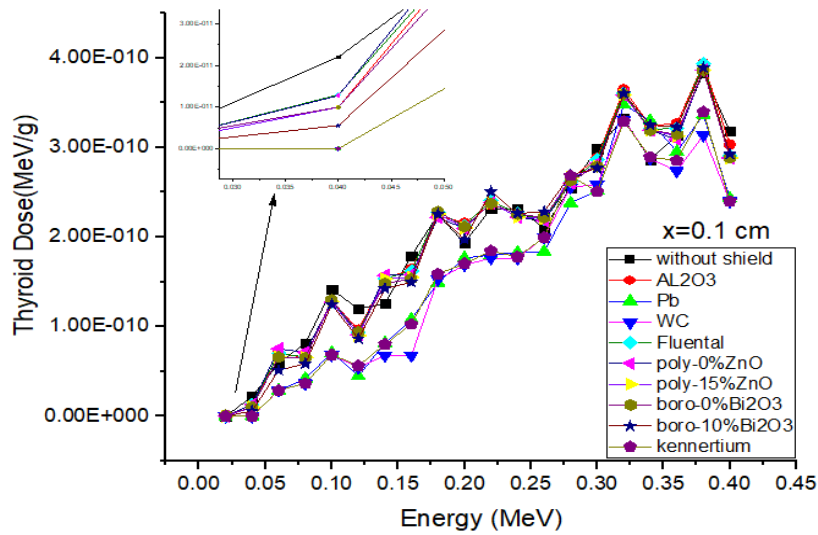


شکل-۵. نمایی از فانتوم انسانی زن بالغ در مقابل چشمه با حفاظ منتخب

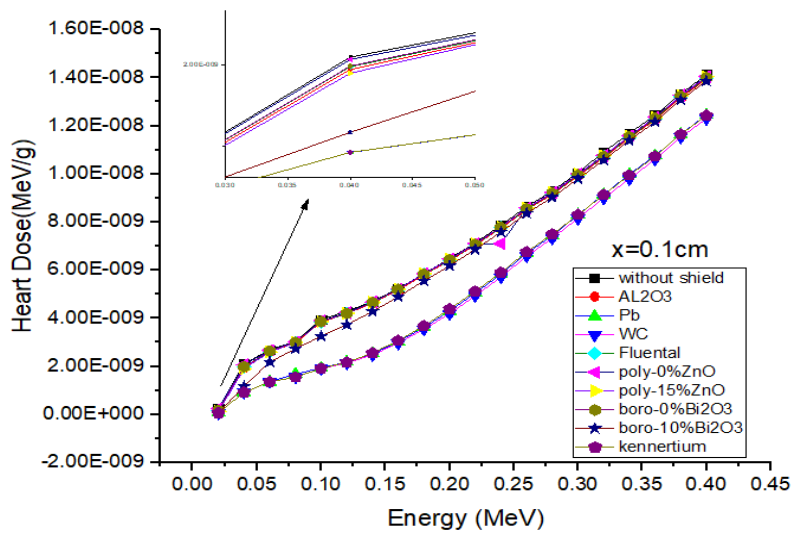
محل قرارگیری چشمه پرتوی مقابل پستان سمت چپ و در فاصله ۱۰۰ cm تنظیم شده است (شکل ۵). همان‌طور که از شکل‌های ۶ تا ۹ قابل مشاهده است، مقایسه‌ای بین دز رسیده به بافت‌های تیروئید، قلب، ریه راست و چپ با وجود حفاظ منتخب و بدون حفاظ انجام شده است. در این مقایسه تاثیر حفاظ‌های مختلف به‌ویژه حفاظ‌های سربی، کربید تنگستن و کنترتیوم بر جلوگیری از پرتوهای ایکس و گاما در انرژی‌های زیر ۴۰۰ کیلو الکترون‌ولت به‌وضوح قابل مشاهده است. گرچه با افزایش انرژی مقادیر دز رسیده در هر کدام از بافت‌ها در حال افزایش است، اما این سه نمونه منتخب حفاظی، همچنان موثرترین حفاظ پرتو ایکس و گاما در انرژی زیر ۴۰۰ کیلو الکترون‌ولت هستند.

میانگین انرژی انباشت در سلول با استفاده از تالی F_6 برای محاسبه‌ی دز اندام‌هایی مثل پستان‌ها، تیروئید، قلب، ریه چپ و راست در محدوده انرژی‌های ۲۰ تا ۴۰۰ کیلو الکترون‌ولت انجام شده است.

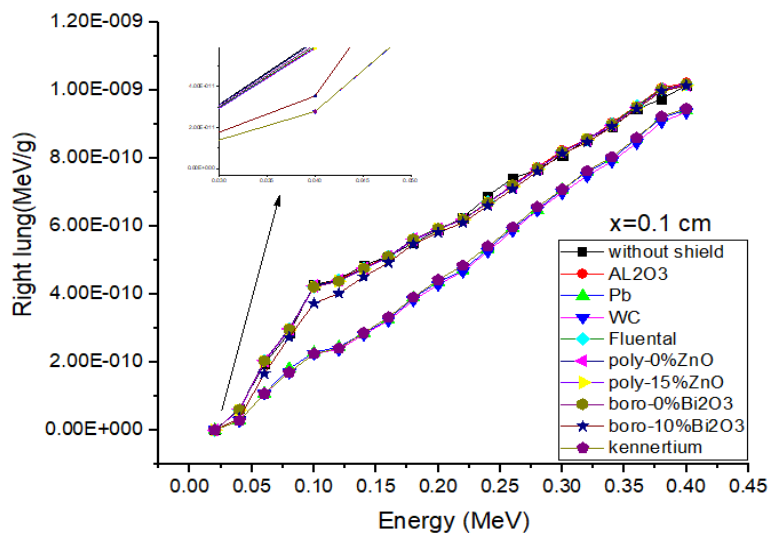
فرض بر این است که حفاظ طراحی شده شامل دو حفره بوده که پستان بیمار جهت تصویربرداری و یا اقدامات درمانی از آن خارج شده و حفاظ طراحی شده به‌طور کامل در تماس با سطح بدن و در امتداد قسمت جلوی بدن قرار گرفته و از قسمت بالا تا تیروئید و از قسمت پایین تا ناحیه‌ای که ریه را پوشش دهد. حفاظ با ضخامت‌های ۰/۱ cm، ۰/۵ cm و ۱ cm و در ۹ ترکیبی که مشخصات آن‌ها پیش‌تر در جدول ۱ گفته شد، فرض شده است.



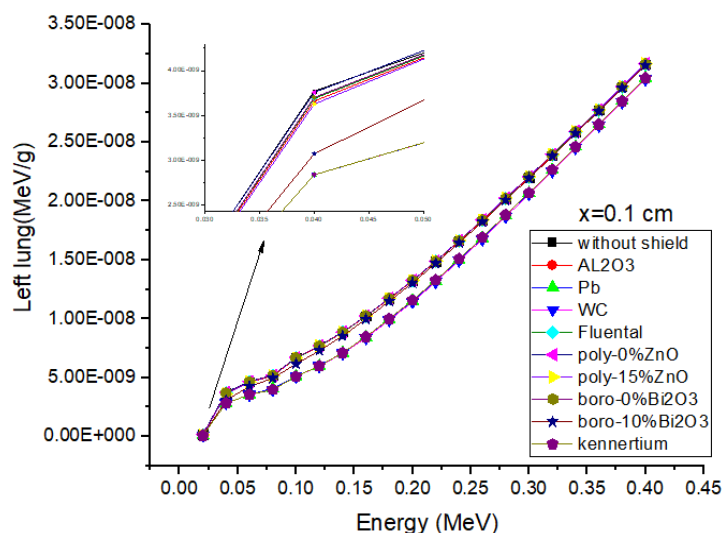
شکل-۶. نمودار مقایسه‌ای دزیمتری تیروئید با و بدون حفاظ در ضخامت ۰/۱ cm.



شکل-۷. نمودار مقایسه‌ای دزیمتری قلب با و بدون حفاظ در ضخامت ۰/۱ cm.



شکل-۸. نمودار مقایسه‌ای دزیمتری ریه راست با و بدون حفاظ در ضخامت ۰/۱ cm.



شکل-۹. نمودار مقایسه‌ای دزیمتری ریه چپ با و بدون حفاظ در ضخامت ۰/۱ cm

جدول-۳. نتایج محاسبه شده و مقایسه‌ای مقادیر بدست آمده شدت خروجی پرتوهای ایکس و یا گاما به تیروئید با وجود سه نوع حفاظ Pb، WC و Kennertium با ضخامت ۰/۱ cm

Energy	Tiroid	I (Pb)	I (WC)	I (Kennertium)
	without shield(I ₀)	۰/۱ cm	۰/۱ cm	۰/۱ cm
2.00E-02	1.38E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
4.00E-02	1.22E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.00E-02	9.29E-09	2.88E-11	2.88E-11	2.88E-11
8.00E-02	9.21E-09	4.19E-11	3.67E-11	3.67E-11
1.00E-01	1.12E-08	7.07E-11	6.85E-11	6.85E-11
1.20E-01	1.27E-08	4.49E-11	5.43E-11	5.63E-11
1.40E-01	1.45E-08	8.16E-11	6.77E-11	8.02E-11
1.60E-01	1.66E-08	1.08E-10	6.77E-11	1.03E-10
1.80E-01	1.87E-08	1.49E-10	1.53E-10	1.59E-10
2.00E-01	2.09E-08	1.77E-10	1.69E-10	1.70E-10
2.20E-01	2.31E-08	1.80E-10	1.77E-10	1.84E-10
2.40E-01	2.54E-08	1.83E-10	1.76E-10	1.78E-10
2.60E-01	2.77E-08	1.84E-10	2.00E-10	2.00E-10
2.80E-01	3.00E-08	2.38E-10	2.56E-10	2.68E-10
3.00E-01	3.23E-08	2.52E-10	2.59E-10	2.51E-10
3.20E-01	3.46E-08	3.48E-10	3.31E-10	3.29E-10
3.40E-01	3.68E-08	3.30E-10	2.88E-10	2.89E-10
3.60E-01	3.91E-08	2.95E-10	2.74E-10	2.85E-10
3.80E-01	4.14E-08	3.37E-10	3.14E-10	3.40E-10
4.00E-01	4.36E-08	2.43E-10	2.40E-10	2.40E-10

نتیجه گیری

با توجه به پیشرفت گسترده فناوری‌ها در پزشکی و نیاز مبرم به بهبود روش‌های درمانی در حوزه پرتوهای یونیزان، این پژوهش با هدف بررسی قابلیت حفاظ پرتویی ترکیبات مختلف جهت استفاده در حوزه ایمنی پرتویی صورت گرفت. بر همین اساس، ما ویژگی‌های حفاظ پرتویی ۹ ترکیب مختلف را با استفاده از کد محاسباتی MCNPX که بر پایه روش مونت کارلو بوده، مورد بررسی قرار دادیم. با توجه به نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته، عملکرد حفاظ تابش‌های یونیزان ترکیب کنرتیم با

در جداول ۳، ۴ و ۵، مقادیر به‌دست آمده شدت خروجی پرتوهای ایکس و گاما از حفاظ‌های سرب، کربید تنگستن و کنرتیم با ضخامت ۰/۱ سانتی‌متر به تیروئید، قلب و ریه چپ محاسبه و با همدیگر مقایسه شده است. در این مقایسه، مشاهده می‌کنیم با وجود حفاظ‌های از نوع سرب، کربید تنگستن و کنرتیم، دز کمتری به بافت موردنظر می‌رسد. در این نوع حفاظ‌ها، کنرتیم نسبت به بقیه موارد بهتر عمل می‌کند و از رسیدن دزهای بیشتر به بافت موردنظر جلوگیری می‌کند. بنابراین، این ترکیب، می‌تواند به عنوان یک حفاظ مناسب پیشنهاد شود.

جدول-۴. نتایج محاسبه شده و مقایسه‌ای مقادیر بدست آمده شدت خروجی پرتوهای ایکس و یا گاما به قلب با وجود سه نوع حفاظ WC, Pb و Kennertium با ضخامت ۰/۱ cm

Energy	Heart	I (Pb)	I (WC)	I (Kennertium)
	without shield(I ₀)	+ / ۱ cm	+ / ۱ cm	+ / ۱ cm
2.00E-02	1.38E-08	6.41E-11	6.41E-11	6.41E-11
4.00E-02	1.22E-08	9.17E-10	9.17E-10	9.17E-10
6.00E-02	9.29E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09
8.00E-02	9.21E-09	1.68E-09	1.68E-09	1.55E-09
1.00E-01	1.12E-08	1.93E-09	1.93E-09	1.91E-09
1.20E-01	1.27E-08	2.18E-09	2.18E-09	2.17E-09
1.40E-01	1.45E-08	2.53E-09	2.53E-09	2.55E-09
1.60E-01	1.66E-08	3.02E-09	3.02E-09	3.07E-09
1.80E-01	1.87E-08	3.63E-09	3.63E-09	3.68E-09
2.00E-01	2.09E-08	4.30E-09	4.30E-09	4.38E-09
2.20E-01	2.31E-08	5.05E-09	5.05E-09	5.12E-09
2.40E-01	2.54E-08	5.83E-09	5.83E-09	5.91E-09
2.60E-01	2.77E-08	6.69E-09	6.69E-09	6.75E-09
2.80E-01	3.00E-08	7.43E-09	7.43E-09	7.50E-09
3.00E-01	3.23E-08	8.30E-09	8.30E-09	8.30E-09
3.20E-01	3.46E-08	9.15E-09	9.15E-09	9.13E-09
3.40E-01	3.68E-08	9.98E-09	9.98E-09	9.95E-09
3.60E-01	3.91E-08	1.08E-08	1.08E-08	1.07E-08
3.80E-01	4.14E-08	1.17E-08	1.17E-08	1.16E-08
4.00E-01	4.36E-08	1.25E-08	1.25E-08	1.24E-08

جدول-۵. نتایج محاسبه شده و مقایسه‌ای مقادیر بدست آمده شدت خروجی پرتوهای ایکس و یا گاما به ریه چپ با وجود سه نوع حفاظ WC, Pb و Kennertium با ضخامت ۰/۱ cm

Energy	Left Lung	I (Pb)	I (WC)	I (Kennertium)
	without shield(I ₀)	+ / ۱ cm	+ / ۱ cm	+ / ۱ cm
2.00E-02	1.38E-08	8.72E-11	8.72E-11	8.72E-11
4.00E-02	1.22E-08	2.84E-09	2.84E-09	2.84E-09
6.00E-02	9.29E-09	3.55E-09	3.55E-09	3.55E-09
8.00E-02	9.21E-09	4.09E-09	3.98E-09	3.98E-09
1.00E-01	1.12E-08	5.11E-09	5.09E-09	5.10E-09
1.20E-01	1.27E-08	6.00E-09	5.98E-09	6.00E-09
1.40E-01	1.45E-08	7.09E-09	7.06E-09	7.11E-09
1.60E-01	1.66E-08	8.43E-09	8.38E-09	8.47E-09
1.80E-01	1.87E-08	9.94E-09	9.88E-09	1.00E-08
2.00E-01	2.09E-08	1.15E-08	1.14E-08	1.16E-08
2.20E-01	2.31E-08	1.32E-08	1.31E-08	1.33E-08
2.40E-01	2.54E-08	1.50E-08	1.49E-08	1.51E-08
2.60E-01	2.77E-08	1.69E-08	1.68E-08	1.69E-08
2.80E-01	3.00E-08	1.88E-08	1.87E-08	1.88E-08
3.00E-01	3.23E-08	2.07E-08	2.06E-08	2.07E-08
3.20E-01	3.46E-08	2.26E-08	2.25E-08	2.27E-08
3.40E-01	3.68E-08	2.46E-08	2.45E-08	2.46E-08
3.60E-01	3.91E-08	2.65E-08	2.64E-08	2.65E-08
3.80E-01	4.14E-08	2.85E-08	2.84E-08	2.85E-08
4.00E-01	4.36E-08	3.05E-08	3.03E-08	3.04E-08

نکات بالینی کاربردی برای جوامع نظامی

- به منظور توانمندسازی خودمراقبتی پرسنل و حفظ سلامت کارکنانی که با پرتوهای یونیزان سروکار دارند، لازم است در مواجهه با مناطق دارای پرتو، حفاظ مربوط به هر بخش را استفاده نمایند.
- با توجه حساسیت اعضاء و بافت‌های انسانی به پرتو، به‌منظور توانمندسازی دگرمراقبتی بیماران مراجعه‌کننده به حوزه‌های مختلف پرتوی، حفاظ‌های طراحی شده با جدیت مورد استفاده قرار بگیرد.
- مسئولین دانشگاه کارگاه‌های عملی و علمی مرتبط با حفاظت و ایمنی کارکنان در حوزه پرتوی برای گروه‌های مختلف برگزار نمایند.
- برای ارزیابی آگاهی کارکنان، آزمون‌ها و بروشورهای استاندارد مرتبط با حوزه‌های پرتوی طراحی گردد و در اختیار آن‌ها قرار داده شود.

ضخامت ۱ میلی‌متر برای بافت‌های نزدیک به ناحیه تومورال واقع در پستان سمت چپ بیمار بهتر از بقیه ترکیب‌های منتخب تشخیص داده شد و در بسیاری از ویژگی‌ها در برابر اشعه ایکس و گاما می‌تواند بهتر از سرب باشد. این ترکیب انعطاف‌پذیری مناسبی داشته و با توجه به نتایج استخراج شده، با برهمکنش پرتوهای ایکس با آن، ذرات ثانویه هم تولید نمی‌کند. در ضمن، میزان تضعیف پرتو ایکس و گاما کنترتوم به‌حدی است که محدوده انرژی ماموگرافی و تا انرژی ۶۰ کیلو الکترون‌ولت را کاملاً پوشش می‌دهد. با این تفسیر، این ترکیب، می‌تواند جایگزین حفاظ مناسبی در برابر کاربردهای تشعشعات ایکس و گاما باشد.

تضاد منافع: نویسندگان تصریح می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد

منفعی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

منابع

- Ghiashinejad M, Katouzi M. Radiation Protection. Darbid Company Publishing. 2015, pp. 105-150. Available from: <https://www.adinehbook.com/gp/product/9640628573> [In Persian]
- Teli MT, Nathuram R, Mahajan CS. Single-experiment simultaneous-measurement of elemental mass-attenuation coefficients of hydrogen, carbon and oxygen for 0.123–1.33 MeV gamma rays. Radiation Measurements. 2000;32(4):329-33. doi:10.1016/S1350-4487(00)00063-9
- Jackson DF, Hawkes DJ. X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures. Physics Reports. 1981;70(3):169-233. doi:10.1016/0370-1573(81)90014-4
- Al-Buriahi MS, Abouhaswa AS, Tekin HO, Sriwunkum C, El-Agawany FI, Nutaro T, et al. Structure, optical, gamma-ray and neutron shielding properties of NiO doped B₂O₃-BaCO₃-Li₂O₃ glass systems. Ceramics International. 2020;46(2):1711-21. doi:10.1016/j.ceramint.2019.09.144
- Mansouri E, Mesbahi A, Malekzadeh R, Mansouri A. Shielding characteristics of nanocomposites for protection against X-and gamma rays in medical applications: effect of particle size, photon energy and nano-particle concentration. Radiation and Environmental Biophysics. 2020;59:583-600. doi:10.1007/s00411-020-00865-8
- Baykara O, İrim ŞG, Wis AA, Keskin MA, Ozkoc G, Avcı A, et al. Polyimide nanocomposites in ternary structure: "A novel simultaneous neutron and gamma-ray shielding material". Polymers for Advanced Technologies. 2020;31(11):2466-79. doi:10.1002/pat.4962
- Kiani MA, Ahmadi SJ, Outokesh M, Adeli R, Kiani H. Study on physico-mechanical and gamma-ray shielding characteristics of new ternary nanocomposites. Applied Radiation and Isotopes. 2019;143:141-8.
- doi:10.1016/j.apradiso.2018.10.006
- Hine GJ. The effective atomic numbers of materials for various c-rays interactions. Phys Rev. 1952;85:725.
- Eshghi M. Investigation of radiation protection features of the TeO₂-B₂O₃-Bi₂O₃-Na₂O-NdCl₃ glass systems. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2020;31(19):16479-97. doi:10.1007/s10854-020-04202-z
- Li J, Huang M, Hou R, Ouyang X. Photon attenuation coefficients of oxide dispersion strengthened steels by Geant4, XCOM and experimental data. Radiation Physics and Chemistry. 2019;161:23-8. doi:10.1016/j.radphyschem.2019.03.042
- Mahmoud KM, Rammah YS. Investigation of gamma-ray shielding capability of glasses doped with Y, Gd, Nd, Pr and Dy rare earth using MCNP-5 code. Physica B: Condensed Matter. 2020;577:411756. doi:10.1016/j.physb.2019.411756
- Ahmed B, Shah GB, Malik AH, Rizwan M. Gamma-ray shielding characteristics of flexible silicone tungsten composites. Applied Radiation and Isotopes. 2020;155:108901. doi:10.1016/j.apradiso.2019.108901
- Körpınar B, Saltan F. Preparation of poly (styrene-co-acrylic acid)-zinc oxide composites: Experimental and theoretical investigation of gamma radiation shielding properties. Applied Radiation and Isotopes. 2022;181:110114. doi:10.1016/j.apradiso.2022.110114
- Madbouly AM, Sallam OI, Issa SA, Rashad M, Hamdy A, Tekin HO, et al. Experimental and FLUKA evaluation on structure and optical properties and γ -radiation shielding capacity of bismuth borophosphate glasses. Progress in Nuclear Energy. 2022;148:104219. doi:10.1016/j.pnucene.2022.104219
- More CV, Alsayed Z, Badawi MS, Thabet AA,

Pawar PP. Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2021;19:2057-90. doi:10.1007/s10311-021-01189-9

16. Elsheikh NA. Gamma-ray and neutron shielding features for some fast neutron moderators of interest in ²⁵²Cf-based boron neutron capture therapy.

Applied Radiation and Isotopes. 2020;156:109012. doi:10.1016/j.apradiso.2019.109012

17. Moadab NH, Saadi MK. Optimization of an Am-Be neutron source shield design by advanced materials using MCNP code. *Radiation Physics and Chemistry*. 2019;158:109-14. doi:10.1016/j.radphyschem.2019.01.026