

خواص حفاظتی نانوهیدروکسیدهای آلیایده‌شده با آهن در برابر پرتو گاما

محمد رضا علی پور¹، مهدی عشقی^{2*}

گروه فیزیک، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، صندوق پستی: ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱، تهران - ایران

*Email: meshghi@ihu.ac.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۸/۴ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۲/۳

چکیده

در این پژوهش، خواص حفاظتی پرتوهای گاما نانوهیدروکسیدهای آلیایده‌شده با آهن، را با محاسبه کمیت‌های تأثیرگذار مانند: لایه نیم‌مقدار (HVL)، مسیر آزاد میانگین (MFP)، ضریب تضعیف جرمی (μ_m) و ضریب تضعیف خطی (LAC) در محدوده ۰.۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلو Geant4 بررسی شده است. برای بررسی تفاوت کمیت ضریب تضعیف جرمی مواد نانویی با مواد معمولی، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مستخرج از پایگاه داده NIST-XCOM که تنها قابلیت محاسبه ضریب تضعیف جرمی مواد معمولی را دارد، مقایسه می‌شود. در این مقایسه، اولاً مشاهده می‌شود که داده‌های مستخرج از این پایگاه و نتایج ابزار شبیه‌سازی Geant4 با افزایش غلظت آلیایده‌گی آهن با یکدیگر متفاوت خواهند بود. ثانیاً، درصد انحراف (RD) بین داده‌های مستخرج از این پایگاه با نتایج حاصل از ابزار شبیه‌سازی Geant4، از ۰.۱ به ۳.۲ درصد افزایش می‌یابد. دلیل این انحراف، افزایش غلظت آلیایده‌گی نانوآهن در ترکیب می‌باشد. بنابراین، ترکیب نانوهیدروکسید با بالاترین درصد آلیایده‌گی آهن (Fe-HAp-۴۸)، از نظر چگالی مطلوب‌ترین ترکیب حفاظتی را در مقایسه با مواد حفاظت منتخب دیگر دارد که یک ترکیب سبک و آنتی‌باکتریال برای حفاظت از پرتوهای گاما در این ناحیه از انرژی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: پرتو گاما، ابزار شبیه‌سازی Geant4، نانوهیدروکسید، روش مونت‌کارلو

Shielding properties of iron-doped nano-hydroxides against gamma-rays

M.R. Alipoor, M. Eshghi*

Department of Physics, Faculty and Research Institute of Basic Sciences, Imam Hossein Comprehensive University, P.O. Box: 1698715461, Tehran – Iran

Research Article

Received: 26.10.2023,

Revised: 16.4.2024,

Accepted: 22.4.2024

Abstract

In this research, the gamma ray protective properties of iron-doped nano-hydroxides were evaluated by calculating effective quantities such as the half-value layer (HVL), mean free path (MFP), mass attenuation coefficient (μ_m) and linear attenuation coefficient (LAC) in the range of 0.015 to 15 MeV using the Geant4 Monte Carlo simulation tool. To investigate the quantitative difference between the mass attenuation coefficient of nano-materials and normal materials, the simulation results were compared with data extracted from the NIST-XCOM database, which can only calculate the mass attenuation coefficient of normal materials. In this comparison, it was observed that the data extracted from the database and the results of the Geant4 simulation tool differed as the concentration of iron contamination increased. The percentage of deviation (RD) between the data extracted from the database and the results of the Geant4 simulation tool increased from 0.1 to 3.2%. This deviation was attributed the increase in the concentration of nano-iron contamination in the composition. Therefore, the nano-hydroxide composition with the highest percentage of iron contamination (Fe-HAp-48) had the most favorable protective composition in terms of density compared to other selected protective materials. This composition, which is lightweight and antibacterial, provides effective protection against gamma rays in the specified energy range.

Keywords: Gamma-ray, Geant4 simulator, Nano-hydroxyapatite, Monte Carlo method



۱. مقدمه

پرتوهای ایکس و گاما دارای قدرت نفوذ زیادی در ماده می‌باشند. پرتو گاما ممکن است به بدن انسان نفوذ کند، سلول‌ها بدن انسان را یونیزه کند و پروتئین‌ها، DNA^۱ و سایر مواد ژنتیکی موجود در سلول‌های انسان را از بین ببرد و باعث بیماری و حتی مرگ شود. سه راهبرد اصلی پیشگیرانه برای حفاظت از خطرات پرتوگیری خارجی شامل: به حداقل رساندن زمان قرارگیری در معرض چشمه رادیواکتیو، افزایش فاصله از چشمه رادیواکتیو و استفاده از مواد محافظ می‌باشد [۱]. از مواد محافظ برای کاهش میزان دز جذب‌شده افرادی که با مواد پرتوزا سروکار دارند، استفاده می‌شود. عوامل زیادی مستقیماً بر طراحی مواد محافظ پرتو یا ارزیابی آنها تأثیر می‌گذارد و تأثیر قابل توجهی بر پراکندگی پرتوهای گاما هنگام عبور از مواد جذب دارد. به طور کلی، شدت پرتو گاما را می‌توان با یک عنصر فلزی با چگالی بالا مانند آهن (Fe)، سرب (Pb)، تنگستن (W)، یا سایر مواد با چگالی بالا کاهش داد. موفق‌ترین راهبرد تحقیقاتی توسعه مواد حفاظتی مؤثر و کاربردی به‌منظور اجتناب استفاده از مواد حفاظتی معمولی مانند سرب، بتن و فولاد است. سرب به دلیل چگالی بالا و عملکرد محافظتی عالی آن از لحاظ تاریخی مؤثرترین ماده حفاظ در برابر پرتو بوده است، اما خطراتی مانند سمیت و آلاینده‌های محیطی مرتبط با سرب، نیازمندی توسعه مواد حفاظتی را توجیه می‌کند. در نتیجه، جایگزینی مواد غیرسمی به جای سرب ضروری است [۲]. در حال حاضر، تحقیقات بر توسعه مواد غیرسمی، سبک‌وزن، کارآمد و کم‌هزینه متمرکز شده است. مواد کامپوزیتی یکی از این مواد است که برای رسیدن به محافظ بهینه و مؤثر مطالعه‌اش شروع شده است. کامپوزیت‌های حاوی پودرهای فلزی با چگالی بالا مانند سرب و تنگستن معمولاً در لباس یا ورق‌های محافظ پرتو گاما استفاده می‌شوند [۳-۵]. با این حال، مشخص شده است که بازده محافظتی این مواد کمتر از انتظارات نظری است، به خصوص زمانی که ضخامت نازک داشته باشند. مساحت سطح، تعداد اتم‌های پیوندی و هماهنگی غیراشباع روی سطح نانوذرات منجر به قطبش^۲ سطح مشترک و پراکندگی چندگانه می‌شود که برای جذب تابش‌های الکترومغناطیسی مفید هستند. این حالت ممکن است به دلیل اثرات کانالی تابش ذرات درون ماده باشد، زیرا حجم زیادی از ماده را فضای خالی به دلیل اندازه‌های نسبتاً بزرگ ذرات از صدها میلی‌متر تا یک سانتی‌متر تشکیل می‌دهد. ذرات بسیار

کوچکتر از فاصله بین اتم‌ها هستند که در این صورت احتمال برخورد پرتوگاما با ذرات را کاهش می‌دهد. این نقص، چالشی را ایجاد می‌کند که ماده محافظ با افزودن پرکننده‌های بیشتر برای دستیابی به حفاظ مطلوب، سنگین‌تر می‌کنند تا کارایی آن افزایش یابد [۶-۹]. این موضوع در حفاظ‌ها به‌طور جدی مورد توجه قرار نگرفته و تلاش‌ها برای کاهش وزن لباس‌ها و ملحفه‌ها موفقیت‌آمیز نبوده است. در حالی که، برخی از تحقیقات مربوط به استفاده از نانومواد برای تقویت مواد حفاظتی صورت گرفته و تاکنون فقط برای گاما‌های کم‌انرژی (در حدود چندین کیلو الکترون‌ولت) مناسب بوده است [۱۰]. با این حال، افزایش قدرت تضعیف مواد حفاظتی برای استفاده در مراکز پزشکی با انرژی‌های بالاتر چشم‌گیر نبوده و نیاز به کار بیشتری دارد. همچنین، افزایش مقیاس فرایند تولید نانومواد، باعث تولید بسیار گران‌قیمت نانومواد و آماده‌سازی دشوار آن به‌طور بهینه می‌شود. آماده‌سازی نانو کامپوزیت‌ها به دلیل انرژی سطحی بالای نانومواد، کاری بسیار دشوار است. این امر گران‌روی^۳ ماتریس نانویی را افزایش می‌دهد؛ در نتیجه، آماده‌سازی نمونه با چنین ویژگی‌هایی، یک فرایند مؤثر پیچیده و پرهزینه است. برای غلبه بر این مشکلات، سطح نانوذرات باید توسط یک عامل ترشونده با ماتریس نانویی محصور یا فشرده شود [۱۱-۱۳]. برخی از این مطالعات بر روی مواد کامپوزیتی با استفاده از روش‌های مختلف و پرکننده‌های مختلف (فلز یا اکسید فلز) برای دستیابی به حفاظ‌های کامپوزیتی مؤثر، انجام شده است. نانو کامپوزیت‌های فلزی از پیش‌ماده‌های فلزی تهیه می‌شوند. این نانو مواد را می‌توان از طریق سنتز شیمیایی، سنتز گرمایی^۴، تجزیه حرارتی، میکرومولسیون^۵، سنتز سونوشیمیایی^۶، سنتز الکتروشیمیایی، تکنیک‌های پیرولیز لیزری^۷، سنتز میکروارگانوسم‌ها و الکتروشیمیایی یا نفت شیمی^۸ تهیه کرد. در روش‌های شیمیایی، نانو مواد فلزی با کاهش پیش‌سازهای یون فلزی، در محلول توسط عوامل احیاکننده شیمیایی به دست می‌آیند [۱۴]. این روش قابلیت جذب مولکول‌های کوچک را داشته و انرژی سطحی بالایی دارد، بنابراین با این ویژگی توانایی ادغام با ماتریس‌های پلیمری را خواهند داشت [۱۶، ۱۷]. کامپوزیت‌های مبتنی بر پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا^۹ پرشده با پودرهای کاربید بور (B_۴C) و نانوتنگستن را مورد مطالعه قرار دادند و

3. Viscosity

4. Hydrothermal

5. Microemulsion

6. Sonochemical

7. Pyrolysis Techniques

8. Petrochemistry

9. Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMW-PE)

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 45 (1), Serial Number 110, 2025, P 148-157

1. Deoxyribo-Nucleic Acid

2. Polarization



میکرو و نانو دزیمتری، تصویربرداری، حفاظت در برابر پرتو و پزشکی هسته‌ای استفاده می‌شود. این ابزار شبیه‌سازی از محک‌زدن کمیت‌های بنیادی فیزیک گرفته تا آزمایش تنظیمات شبیه‌سازی مونت‌کارلو در کاربردهای فیزیک پزشکی را شامل می‌شود. هر دو فرایند و مدل‌های فیزیک الکترومغناطیسی و هادرونیک در لیست‌های فیزیک Geant4 از پیش ساخته شده آزمایش می‌شوند. Geant4 این توانایی را دارد که هندسه‌های پیچیده را از طریق یک رابط طراحی مدل کند و همچنین مدل مواد در ابعاد میکرو و نانو نیز در آن وجود دارد. اجزای اصلی برنامه محاسبه کمیت‌های پرتویی توسعه یافته عبارتند از: هسته Geant4 که انتقال رویداد به رویداد را در یک هندسه تعریف شده توسط کاربر انجام می‌دهد، یک رابط داده و پارامترسازی مواد مربوطه، یک رابط مولد رویداد اولیه با توزیع‌های فاز- فضا که بخش پرتو تابشی و یک سرویس تجزیه و تحلیل داده را توصیف می‌کند تا دز منتقل شده در هندسه را در نظر بگیرد. شروع این شبیه‌سازی با یک طیف گاما با انرژی ۰٫۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت می‌باشد که بر روی نمونه‌ها تابیده می‌شود. نمونه‌ها به صورت مکعب مستطیل بین کولیماتور، بعد از چشمه گاما و قبل از آشکارساز براساس شکل ۱ قرار می‌گیرد. سپس، فوتون‌های خروجی از نمونه‌ها با استفاده از آشکارساز ثبت می‌شوند. برای تحلیل ضرایب تضعیف نمونه‌ها، با استفاده از روش انتقال، طبق قانون بیر-لامبرت بر اساس شدت فوتون فرودی و میزان تضعیف به دست می‌آید. تضعیف فوتون‌ها به وسیله شبیه‌سازی تمام فرایندهای فیزیکی احتمالی برای فوتون‌ها (مانند اثرات فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، پراکندگی ریلی، تولید زوج) و تابش ترمزی، یونیزاسیون و نابودی پوزیترون برای الکترون‌ها و پوزیترون‌ها تعیین می‌شود. این فرایندها با استفاده از مدل‌های فیزیک برای فرایندهای الکترومغناطیس در G4EMStandardphysics-option(1-4) شبیه‌سازی می‌شوند. این مدل‌های فیزیک مبتنی بر بسته الکترومغناطیس هستند که از کتابخانه‌های داده‌های ارزیابی شده استفاده می‌کند که داده‌هایی را برای محاسبه برش‌ها هنگام مدل‌سازی برهم‌کنش فوتون‌ها و الکترون‌ها با ماده ارائه می‌دهد. در این کار، با تأثیرپذیری از مدل‌های Geant4_DNA_AU در برابر مدل‌های متداول Geant4 برای شبیه‌سازی مقیاس نانومتری استفاده شده است [۲۷-۳۰].

۲.۲ مواد

مشخصات نانو هیدروکسیدها شامل کسر وزنی عناصر تشکیل‌دهنده و چگالی آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

دریافتند که تابش گاما را به خوبی تضعیف می‌کنند. افزایش محتوای نانوذرات تنگستن در کامپوزیت‌های پلی‌دی‌متیل سیلوکسان^۱ همراه با نانوذرات اکسید بیسموت نیز در تضعیف پرتوهای گاما مؤثر می‌باشد [۱۸، ۲۰]. نقش نانوپودرها ایجاد خواص تضعیف پرتویی در کامپوزیت‌ها بوده، در حالی که، نقش ماتریس پلیمری کاهش وزن، به دست آوردن انعطاف‌پذیری، شکل‌پذیری آسان و قابلیت استحکام بالا برای کامپوزیت‌ها می‌باشد [۲۱، ۲۲]. در زمینه نانوکامپوزیت‌های بر پایه نانوپودرها، مطالعات سید و همکاران نشان داد که این نانوکامپوزیت‌ها از نظر ویژگی‌های حفاظتی در برابر پرتوهای گاما مناسب می‌باشند [۲۳]. نانوهیدروکسیدها به روش جایگزینی سنتزگرمایی تولید می‌شوند. نانوساختارهای هیدروکسید اغلب به عنوان یک عامل ضد میکروبی در صنعت یا به عنوان کاتالیزگر نوری^۲ برای تجزیه ترکیبات آلی استفاده می‌شوند، زیرا این نانوساختارها پردازش ساده و هزینه پایینی دارند. علاوه بر آن، ترکیبات آهن خود هزینه پایینی دارند، به وفور یافت می‌شود، سمی نیستند و از نظر شیمیایی بی‌اثر هستند. بنابراین به دلیل این که نانوساختارهای هیدروکسید از نظر شیمیایی پایدار هستند، به نانو هیدروکسیدها اجازه می‌دهد تا به عنوان پرکننده برای بهبود ویژگی‌های شیمیایی مواد استفاده شوند. همچنین ویژگی آنتی باکتریال بودن در مراکز درمانی که تجهیزات و پوشش‌های بیمارستانی در تماس مستقیم با افراد آلوده می‌باشد، می‌تواند اثر خودش را نشان دهد [۲۴-۲۶].

بنابراین با نانوهیدروکسیدهای آلاییده شده با آهن می‌توان لباس‌ها یا پوشش‌های سبک وزنی را ارائه داد که عملکرد محافظتی قابل قبولی در مقابل پرتوهای گاما داشته باشند، از نظر اقتصادی نیز با صرفه و ارزان باشند. همچنین، نیازمند ضد عفونی پی‌درپی، برای استفاده بیماران نیازمند محافظت از عوامل میکروبی و ویروسی ندارد.

۲. مواد و روش تحقیق

در این قسمت، ابزار مونت‌کارلو Geant4 و مشخصات نانوهیدروکسیدها مورد استفاده به اختصار توضیح داده شده است.

۱.۲ ابزار شبیه‌سازی Geant4

Geant4^۳ یک کد مونت کارلویی است که به طور گسترده در فیزیک پزشکی برای طیف وسیعی از کاربردها مانند دزیمتری،

1. Polydimethylsiloxane (PDMS)
2. Photocatalyst
3. Geometry and Tracking



میانگین (MFP) به عنوان مسافت متوسط طی شده توسط یک فوتون بین دو واکنش متوالی شناخته می شود که در رابطه (۳) تعریف و توضیح داده شده است [۳۳]:

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (3)$$

لایه های نیم مقدار (HVL)، یک دهم مقدار (TVL) دو کمیت مهم در طراحی یک ماده محافظ پرتویی مناسب هستند. این کمیت ها به عنوان ضخامت های مورد نیاز برای کاهش شدت پرتو به ترتیب به ۵۰٪ و ۱۰٪ مقدار اولیه آن با استفاده از معادلات (۴) و (۵) محاسبه می شوند [۳]:

$$RD(\%) = \left| \left(\left(1 - \left(\frac{\mu_{Geant4}}{\mu_{XCOM}} \right) \right) \times 100 \right) \right| \quad (4)$$

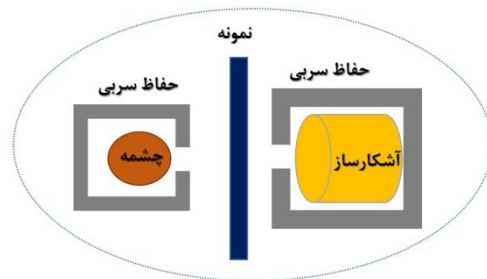
$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (5)$$

درصد انحراف (RD) بین نتایج حاصل از کد Geant4 و داده های مستخرج از پایگاه XCOM بر اساس رابطه ۶ محاسبه می شود [۳۱]:

$$RD(\%) = \left| \left(\left(1 - \left(\frac{\mu_{Geant4}}{\mu_{XCOM}} \right) \right) \times 100 \right) \right| \quad (6)$$

۳. یافته ها و تحلیل ها

ضریب تضعیف کل معیاری است که نشان می دهد یک ماده در حین عبور از حفاظ، شدت پرتوی تابش را چقدر تضعیف می کند. ضریب جذب نشان دهنده قسمتی از تابش فرودی است که توسط ماده جاذب در واحد طول جذب می شود. ضریب پراکندگی نشان دهنده قسمتی از تابش فرودی است که توسط ماده در واحد طول پراکنده می شود. پراکندگی می تواند به روش های مختلفی رخ دهد، مانند پراکندگی رابلی که در آن تابش پراکنده انرژی مشابه تابش فرودی دارد و پراکندگی کامپتون که در آن تابش پراکنده انرژی کمتری نسبت به تابش فرودی دارد. هنگام در نظر گرفتن پراکندگی همدوس، ضریب تضعیف کل را می توان به سه جزء تقسیم کرد: ضریب جذب فوتوالکتریک، ضریب پراکندگی کامپتون و ضریب پراکندگی ناهمدوس. ضریب جذب فوتوالکتریک نشان دهنده احتمال جذب فوتون فرودی در ماده است و باعث می شود که یک الکترون از پوسته اتمی داخلی خارج شود. پس از تولید فوتوالکترون یک پدیده وابسته به فوتوالکتریک نیز که پرتوایکس مشخصه یا



شکل ۱. شماتیکی از هندسه مدل سازی شده.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی و کسر وزنی از عناصر برای نمونه های منتخب

نمونه ها	چگالی	کسر وزنی عناصر %			
		کلسیم	فسفر	اکسیژن	آهن
Fe-HAp-۱	۱,۳۶	۲۳,۰۴	۱۹,۷۴	۵۷,۲۲	--
Fe-HAp-۱۲	۱,۳۸	۲۱,۳۵	۱۹,۰۳	۵۸,۶۵	۰,۰۲۷
Fe-HAp-۲۴	۱,۵۹	۱۹,۱۷	۱۸,۹۳	۵۸,۱۹	۳,۶۵
Fe-HAp-۳۶	۱,۸۱	۱۵,۸۶	۱۵,۰۸	۶۱,۴۷	۷,۵۹
Fe-HAp-۴۸	۱,۹۶	۱۱,۲۹	۱۸,۷۴	۶۰,۲۳	۹,۷۴

۳.۲ مبانی نظری

در این بخش، روابط نظری را که برای تعیین ضریب تضعیف خطی μ ، ضریب تضعیف جرم μ_m ، لایه نیم مقدار HVL، مسیر آزاد میانگین MFP و ضریب انباشت استفاده شده است، به طور خلاصه ارائه می دهیم.

ضریب تضعیف خطی (μ) یک عامل کلیدی برای ارزیابی اثر پرتو گاما با مواد مورد مطالعه است و می تواند از قانون بیر-لامبرت [۳۱] به شرح زیر در معادله (۱) استنباط شود:

$$LAC = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (1)$$

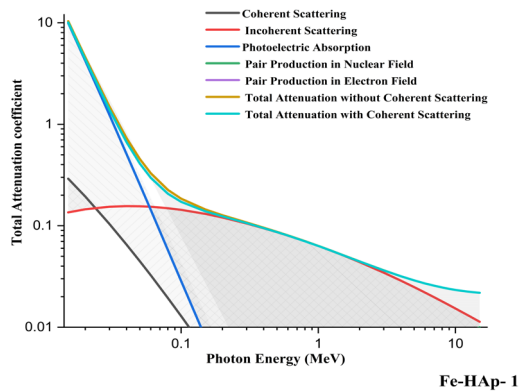
که در رابطه بالا x ضخامت نمونه، I شدت پرتو تضعیف شده و I_0 شدت پرتو اولیه می باشد.

قابلیت کامپوزیت ها به عنوان مواد محافظ پرتو را می توان با استفاده از رابطه (۲) و به وسیله ضریب تضعیف جرمی که با محاسبه نسبت ضریب تضعیف خطی محاسبه شده نمونه ها بر حسب چگالی آن (ρ) ارزیابی کرد [۳۲]:

$$MAC = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (2)$$

که در آن w_i کسر وزن عناصر تشکیل دهنده در ماده می باشد. با توجه به برهم کنش پرتوهای گاما با نمونه ها، مسیر آزاد





شکل ۲. تغییرات ضریب تضعیف کل برای نمونه Fe-Hap-1 برحسب تغییرات انرژی.

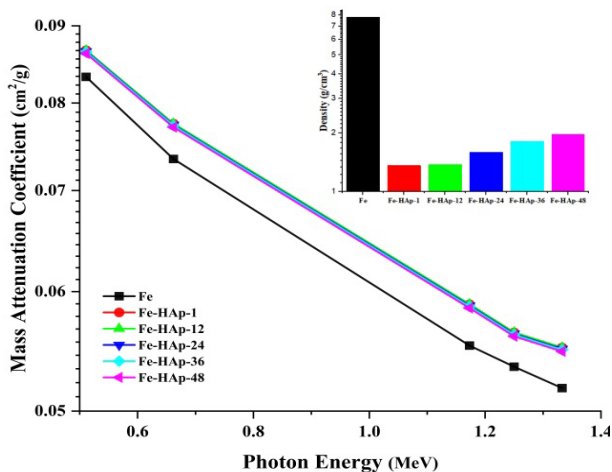
مقدار ضریب تضعیف جرمی در انرژی‌های مختلف نانوهیدروکسیدها در محدوده انرژی‌های بین ۰/۱۵ تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 محاسبه شد. داده‌های پایگاه XCOM نیز برای اعتبارسنجی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی استخراج شد. باید به این نکته دقت شود که کد XCOM تنها قادر به محاسبه توانایی تضعیف مواد معمولی می‌باشد و نمی‌تواند ضریب تضعیف مواد نانویی را محاسبه کند. نتایج به دست آمده از رابطه ۶ در جدول ۲ شرح داده شده است. درصد انحراف بین نتایج حاصل از ابزار شبیه‌سازی Geant4 و داده‌های مستخرج از پایگاه XCOM برای ترکیب‌های مورد بررسی در محدوده ۰/۱-۰/۹۸ درصد بود. این نتایج نشان می‌دهد که مقادیر μ_m شبیه‌سازی شده ابزار شبیه‌سازی Geant4 برای نانو هیدروکسیدهای آلاییده شده با آهن بسیار نزدیک به داده‌های تجربی برنامه XCOM است و با افزایش غلظت نانومواد درصد انحراف داده‌ها نیز افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که برای نانوهیدروکسید Fe-Hap-۴۸ انحراف داده‌ها بیش‌ترین مقدار می‌باشد. بنابراین برای بررسی مواد نانو باید شبیه‌سازی‌ها با دقت بر روی خواص نانو مواد و مدل‌سازی ابعاد نانویی انجام شود تا نتایج حاصل شده قابل اتکا باشد. مقایسه حاضر برای نشان دادن این تفاوت بین داده‌ها انجام شده است. ضریب تضعیف جرمی کمیت فوق‌العاده مهمی است، زیرا به ما امکان می‌دهد خواص تضعیف مواد مختلف را بدون در نظر گرفتن چگالی آن‌ها مقایسه کنیم. ضریب تضعیف جرمی به انرژی تابش، ترکیب اتمی و مولکولی و چگالی مواد بستگی دارد. مواد مختلف ساختارهای اتمی و مولکولی متفاوتی دارند که بر توانایی آن‌ها در کاهش تابش تأثیر می‌گذارد. با افزایش میزان غلظت آهن در نانوهیدروکسیدها ساختار مواد به گونه‌ای تغییر می‌کند که با کاهش نقص ساختار شبکه اتمی، شدت پرتوهای گاما را بهتر کاهش می‌دهد.

الکترون انرژی‌ها می‌باشد، رخ می‌دهد. بنابراین، در انرژی‌هایی که فوتوالکتریک غالب بوده و باید حفاظت از پرتوهای ثانویه نیز در نظر گرفته شوند. این فرایند بسیار وابسته به انرژی بوده و در انرژی‌های فوتون پایین و برای موادی با اعداد اتمی بالا بسیار مهم است. ضریب پراکندگی کامپتون، نشان‌دهنده احتمال برهم‌کنش فوتون فرودی با یک الکترون لایه بیرونی است که باعث پرتاب شدن الکترون و پراکندگی فوتون با انرژی کمتر می‌شود. این فرایند همچنین وابسته به انرژی بوده و در انرژی‌های فوتون بالاتر قابل توجه‌تر می‌شود. ضریب پراکندگی همدوس، نشان‌دهنده این احتمال است که فوتون فرودی با الکترون‌های اتمی به صورت منسجم و بدون ایجاد اتلاف انرژی برهم‌کنش خواهد کرد. این فرایند در انرژی‌های فوتون بسیار پایین غالب بوده و با مجذور عدد اتمی متناسب است. بنابراین، ضریب تضعیف کل، مجموع سه ضریب جذب، پراکندگی همدوس و کامپتون است و به انرژی فوتون‌های فرودی، ترکیب اتمی و مولکولی ماده و چگالی ماده بستگی دارد. هنگامی که پراکندگی همدوس در نظر گرفته نمی‌شود، ضریب تضعیف کل مجموع ضریب جذب فوتوالکتریک، ضریب پراکندگی کامپتون و تولید زوج است. با توجه به شکل ۲، پراکندگی همدوس با افزایش انرژی با شیب زیادی کاهش می‌یابد و در انرژی‌های بالای ۱۰۰ کیلو الکترون‌ولت پراکندگی همدوس مشاهده نمی‌شود. پدیده فوتوالکتریک نیز با افزایش انرژی به دلیل عدد اتمی پایین نانو هیدروکسیدها به شدت افت می‌کند و بعد از ۱۵۰ کیلو الکترون‌ولت تقریباً مشاهده نمی‌شود. پراکندگی کامپتون نیز در انرژی‌های بین ۰/۱ تا ۲ مگا الکترون‌ولت پدیده غالب می‌باشد. پدیده تولید زوج نیز اتفاق نمی‌افتد، یا مقدار آن نسبت فوتوالکتریک و پراکندگی کامپتون به قدری کم است که قابل مشاهده نمی‌باشد. براینده تمام این برهم‌کنش‌های ضریب تضعیف کل را می‌دهد. حال برای بررسی ویژگی یک حفاظ باید به بازه انرژی‌هایی که جذب صورت می‌گیرد، دقت شود زیرا پدیده جذب همراه با پرتو ایکس مشخصه یا الکترون انرژی خواهد بود که باید برای آن‌ها نیز تمهیداتی انجام شود. حفاظ علاوه بر کاهش فوتون‌های اولیه، باید پرتو ثانویه را نیز به حداقل برساند، تا از آسیب به افراد و تجهیزات جلوگیری کند.



جدول ۲. تغییرات ضریب تضعیف جرمی (cm²/g) نمونه‌ها برحسب تغییرات انرژی فوتون‌های گاما

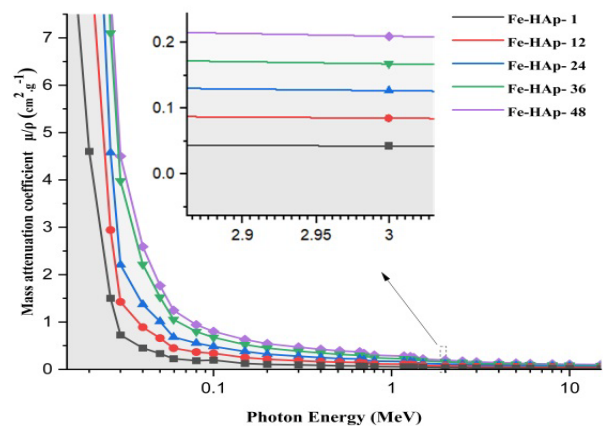
انرژی (MeV)	Fe-HAp-۱			Fe-HAp-۱۲			Fe-HAp-۲۴			Fe-HAp-۳۶			Fe-HAp-۴۸		
	Geant4	XCOM	RD%	Geant4	XCOM	RD%	Geant4	XCOM	RD%	Geant4	XCOM	RD%	Geant4	XCOM	RD%
۰.۱۵	۱۰.۳۴۵۲	۱۰.۳۵	۰.۰۴	۹.۸۸۹۵	۹.۹۰۴	۰.۱۴	۱۱.۲۹۱۹	۱۱.۲۲	۰.۶۴	۱۲.۱۹۲۳	۱۲.۰۹	۰.۸۴	۱۲.۴۱۴۵	۱۲.۲۳	۱.۵
۰.۲	۴۶۰.۳۳۸	۴.۵۹۹	۰.۰۹	۴.۴۰۳۱	۴.۴۲۰	۰.۳۸	۵.۰۰۶۷	۴.۹۸۶	۰.۴۱	۵.۴۸۰۹	۵.۴۳۹۲	۰.۷۶	۵.۶۸۹۹	۵.۵۴۹۵	۲.۵۳
۰.۵۹۶	۰.۳۳۴۲	۰.۳۳۳۹	۰.۱۱	۰.۳۲۶۶	۰.۳۲۵۵	۰.۳۴	۰.۳۵۲۴	۰.۳۵۱۳	۰.۳۱	۰.۳۷۱۱	۰.۳۷۳۱	۰.۵۳	۰.۳۷۸۷	۰.۳۷۴۱	۱.۲۴
۰.۵۱۱	۰.۰۸۶۷	۰.۰۸۶۹	۰.۲۱	۰.۰۸۶۷	۰.۰۸۶۹	۰.۲۳	۰.۰۸۶۵	۰.۰۸۶۲	۰.۴۳	۰.۰۸۶۴	۰.۰۸۶۱	۰.۴۴	۰.۰۸۸۶	۰.۰۸۵۹	۳.۱۶
۰.۶۶۲	۰.۰۷۷۵	۰.۰۷۷۳	۰.۲۸	۰.۰۷۷۵	۰.۰۷۷	۰.۶۹	۰.۰۷۷۳	۰.۰۷۶۸	۰.۷۱	۰.۰۷۵۲	۰.۰۷۴۷	۰.۸۲	۰.۰۷۸۱	۰.۰۷۶۶	۱.۹۹
۰.۸	۰.۰۷۱۰	۰.۰۷۱۱	۰.۰۵	۰.۰۷۱	۰.۰۷۱۵	۰.۶۱	۰.۰۷۰۹	۰.۰۷۰۴	۰.۷۲	۰.۰۷۰۸	۰.۰۷۰۳	۰.۷۳	۰.۰۷۲۰	۰.۰۷۰۲	۲.۷۱
۱.۱۷۳	۰.۰۵۸۸	۰.۰۵۸۸	۰.۱۱	۰.۰۵۸۸	۰.۰۵۸۵	۰.۵۶	۰.۰۵۸۷	۰.۰۵۸۴	۰.۵۷	۰.۰۵۸۶	۰.۰۵۸۳	۰.۵۶	۰.۰۵۹۳	۰.۰۵۸۲	۱.۹۹
۱.۲۷۵	۰.۰۵۶۳	۰.۰۵۶۲	۰.۳۱	۰.۰۵۶۳۸	۰.۰۵۶۱	۰.۵۰	۰.۰۵۶۲	۰.۰۵۶	۰.۵۰	۰.۰۵۶۱	۰.۰۵۵۹	۰.۵۱	۰.۰۵۷	۰.۰۵۵۸	۲.۸۲
۱.۳۳۳	۰.۰۵۵۰	۰.۰۵۴۹	۰.۲۸	۰.۰۵۵	۰.۰۵۴۸	۰.۴۵	۰.۰۵۴۹	۰.۰۵۴۷	۰.۴۶	۰.۰۵۴۹	۰.۰۵۴۶	۰.۶۲	۰.۰۵۶۱	۰.۰۵۴۵	۳.۰۵
۲	۰.۰۴۴۵	۰.۰۴۴۶	۰.۰۸	۰.۰۴۴۵	۰.۰۴۴۷	۰.۴۵	۰.۰۴۴۶	۰.۰۴۴۵	۰.۵۸	۰.۰۴۴۷	۰.۰۴۴۴	۰.۸۲	۰.۰۴۴۸	۰.۰۴۴۳	۱.۲۸
۲.۵	۰.۰۳۹۶	۰.۰۳۹۸	۰.۲۲	۰.۰۳۹۶	۰.۰۳۹۸	۰.۳۱	۰.۰۳۹۵	۰.۰۳۹۸	۰.۴۸	۰.۰۳۹۴	۰.۰۳۹۶	۰.۵۳	۰.۰۳۹۹	۰.۰۳۹۵	۱.۰۴
۵	۰.۰۲۸۷	۰.۰۲۸۹	۰.۳۸	۰.۰۲۸۷۳	۰.۰۲۸۹	۰.۵۱	۰.۰۲۸۷	۰.۰۲۸۹	۰.۵۱	۰.۰۲۸۶	۰.۰۲۸۹	۰.۸۵	۰.۰۲۹۴	۰.۰۲۸۸	۲.۳۱
۱۰	۰.۰۲۳۲	۰.۰۲۳۳	۰.۳۸	۰.۰۲۳۱	۰.۰۲۳۲	۰.۴۱	۰.۰۲۳۲	۰.۰۲۳۴	۰.۴۲	۰.۰۲۳۵	۰.۰۲۳۳	۰.۹۰	۰.۰۲۳۶	۰.۰۲۳۳	۱.۵۵



شکل ۳. تغییرات ضریب تضعیف جرمی برای نمونه‌های منتخب با عنصر آهن برحسب تغییرات انرژی.

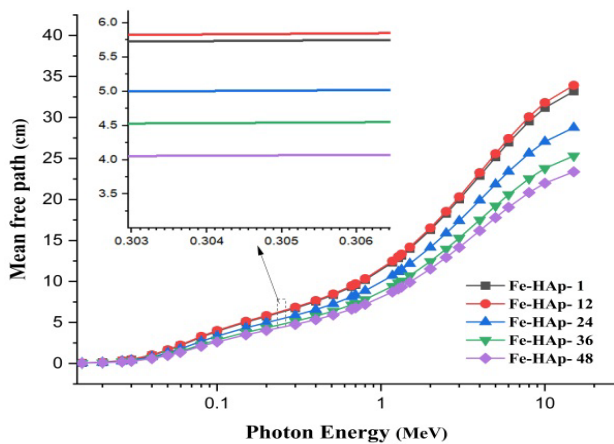
ضریب تضعیف خطی (LAC¹) که با نماد μ نشان داده می‌شود، معیاری است که نشان می‌دهد، یک ماده چقدر شدت پرتو را در واحد مسافت طی شده از ماده کاهش می‌دهد. این ضریب به چگالی ماده وابسته می‌باشد. با افزایش میزان درصد آهن در ترکیب نانو هیدروکسیدها، چگالی افزایش یافته و اثر چگالی در میزان تضعیف خطی به خوبی قابل مشاهده است، بنابراین ضریب تضعیف خطی در طیف انرژی ۰.۱۵-۱۰ مگا الکترون‌ولت به‌طور پیوسته برای نانو هیدروکسید Fe-HAp-۴۸ به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه در ضریب

به‌گونه‌ای که نانو هیدروکسید Fe-HAp-۴۸ نسبت به نانو هیدروکسید Fe-HAp-۱ توانایی تضعیف بهتری را در انرژی‌های کمتر از ۱ مگا الکترون‌ولت نشان می‌دهد (شکل ۳). در شکل ۴، ضریب تضعیف جرمی عنصر آهن با نانو هیدروکسیدها در انرژی‌های ۰.۵ مگا الکترون‌ولت تا ۱/۳ مگا الکترون‌ولت رسم شده است. مشاهده می‌شود که نانو هیدروکسیدها، چگالی کمتری نسبت به آهن داشته که با این چگالی کمتر ضریب تضعیف جرمی بالاتری نسبت به عنصر آهن دارند. همین ویژگی برتری نسبی این ترکیبات نانویی را نسبت به عنصر آهن نشان می‌دهد.



شکل ۴. تغییرات ضریب تضعیف جرمی برای نمونه‌های منتخب برحسب تغییرات انرژی.





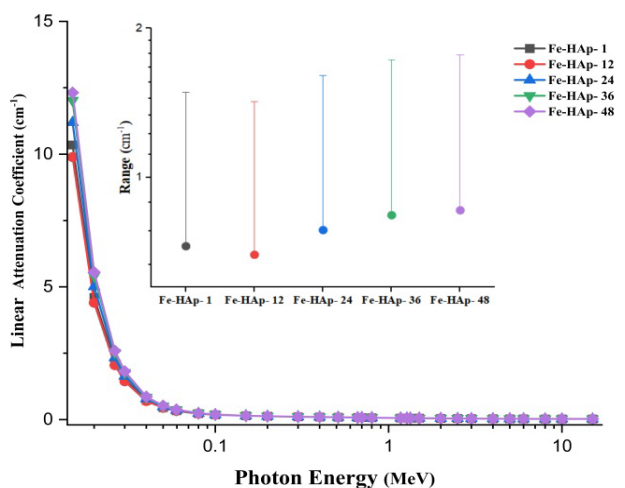
شکل ۶. تغییرات مسیر آزاد میانگین برای نمونه‌های منتخب برحسب تغییرات انرژی.

لایه نیم‌مقدار معیاری برای سنجش توانایی یک ماده برای تضعیف یک پرتو است. به‌عنوان ضخامت ماده مورد نیاز برای کاهش شدت پرتو تابشی به نصف مقدار اولیه آن تعریف می‌شود. لایه نیم‌مقدار به انرژی پرتو و خواص ماده از جمله چگالی و عدد اتمی آن بستگی دارد. ماده‌ای با لایه نیم‌مقدار بالاتر به ضخامت بیشتری نیاز دارد تا یک سطح ایمن از پرتو را داشته باشیم. در شکل ۷، منحنی‌های لایه نیم‌مقدار نانوهیدروکسیدها به ترتیب با مقادیر مختلف آهن نشان داده شده است. ظاهراً، برای همه نانوهیدروکسیدها با مقادیر مختلف ناخالصی‌ها، لایه نیم‌مقدار رفتار فزاینده‌ای نشان می‌دهد زیرا انرژی به تدریج از ۱۵ کیلو الکترون‌ولت به ۱۰ مگا الکترون‌ولت تغییر می‌کند. نتایج همچنین نشان می‌دهد که افزودن آهن مقادیر لایه نیم‌مقدار را به ویژه در انرژی‌های کم کاهش می‌دهد. از این یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت که یک نمونه نازک‌تر از نانوهیدروکسیدها Fe-Hap-۴۸ ویژگی‌های تضعیف بهتری نسبت به نانوهیدروکسیدهای دیگر نشان می‌دهد. شکل ۷ نشان می‌دهد که لایه نیم‌مقدار نانوهیدروکسیدها به انرژی فوتون و مقدار مواد ناخالص بستگی دارد. به عبارت دیگر، به چگالی نانوهیدروکسیدها بستگی دارد، زیرا مواد ناخالص بر مقدار چگالی تأثیر می‌گذارند.

لایه یک‌دهم مقدار، به‌عنوان ضخامت ماده مورد نیاز برای کاهش شدت پرتو به یک‌دهم مقدار اولیه آن تعریف می‌شود. لایه یک‌دهم مقدار اغلب در حفاظت در برابر پرتو برای تعیین ضخامت مناسب مواد محافظ در برابر پرتو استفاده می‌شود. شکل ۸ تغییرات مقادیر لایه یک‌دهم مقدار را در بین تمام نمونه‌ها به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی نشان می‌دهند و

تضعیف خطی Fe-Hap-۱ و Fe-Hap-۱۲ می‌باشد که انتظار می‌رود، با افزایش غلظت آهن ضریب تضعیف خطی افزایش یابد در حالی که خلاف انتظار صورت گرفت. با افزایش میزان آهن در Fe-Hap-۲۴ الی Fe-Hap-۴۸ افزایش ضریب تضعیف مشاهده می‌شود. این پیوستگی با نمودار میانگین ضریب تضعیف خطی در بزرگ‌نمایی شکل ۵ نشان داده شده است.

مسیر آزاد میانگین، اندازه‌گیری میانگین مسافت طی شده توسط یک ذره یا فوتون بین برخوردهای متوالی با سایر ذرات یا اجسام در یک ماده است. افزایش میزان مسیر آزاد میانگین بدان معناست که با افزایش انرژی فوتون، احتمال برهم‌کنش فوتون با نمونه کاهش می‌یابد و امکان نفوذ فوتون بیشتر می‌شود. با افزایش انرژی و غالب شدن پراکندگی کامپتون میزان مسیر آزاد میانگین به شدت افزایش می‌یابد که این افزایش نیز به چگالی و ترکیب اتمی ماده هدف نیز وابسته است که به‌وضوح در شکل ۶ مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت با افزایش انرژی، مسیر آزاد میانگین برای یک پرتو در تمامی نانو مواد مورد بررسی به صورت یکنواخت با شیب زیادی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت وزنی آهن به حدود ۱۰ درصد در ترکیب نانو هیدروکسیدها، مسیر آزاد میانگین نیز کاهش یافته که خود نوید بخش عملکرد بهتر این ترکیب برای استفاده به عنوان ماده حفاظ نسبت به سه ترکیب دیگر می‌باشد. این تفاوت در میزان مسیر آزاد میانگین در انرژی‌های بالاتر از ۱ مگا الکترون‌ولت به خوبی مشاهده می‌شود.



شکل ۵. تغییرات ضریب تضعیف خطی برای نمونه‌های منتخب برحسب تغییرات انرژی.



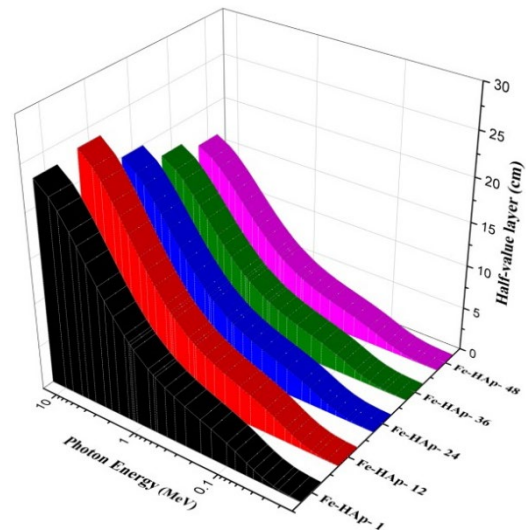
۴. نتیجه گیری

در این مطالعه، خواص محافظ گاما نانو هیدروکسید با ناخالصی آهن از جمله ضریب تضعیف جرمی، ضریب تضعیف خطی، لایه نیم مقدار، لایه یک دهم مقدار، مسیر آزاد میانگین و موارد دیگر را در محدوده انرژی فوتون ۰/۱۵ تا ۱۰ مگا الکترون ولت با استفاده از ابزار Geant4 مورد بررسی قرار گرفتند.

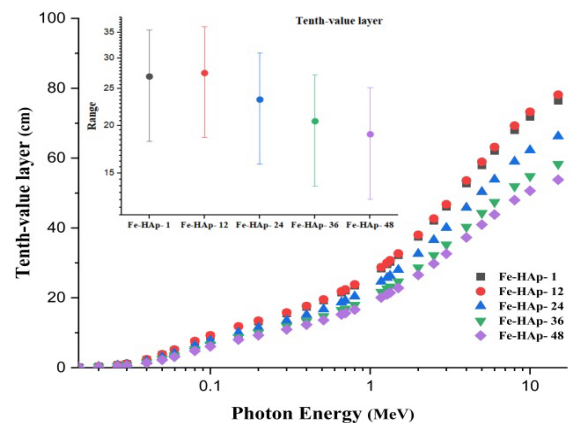
نتایج نشان می دهد که با ورود ناخالصی آهن در ترکیب منتخب، ابتدا ضریب تضعیف خطی و دیگر کمیت های وابسته افزایش یافت که نشانه مناسبی برای استفاده این ماده به عنوان حفاظ پرتویی نمی باشد؛ اما با افزایش میزان درصد عنصر آهن در ترکیب ضریب به آرامی مقادیر تضعیف جرمی افزایش می یابد. بنابراین، ضخامت لایه یک دهم مقدار نیز به صورت قابل توجهی کاهش یافته که باعث بهتر شدن عملکرد ماده در برابر پرتوهای گاما می شود.

همچنین، با توجه به بررسی صورت گرفته، نانو هیدروکسیدها، چگالی کمتری نسبت به آهن داشته که با این چگالی کمتر ترکیبات منتخب، ضریب تضعیف جرمی بالاتری نسبت به عنصر آهن دارند. همین ویژگی برتری نسبی این ترکیبات نانویی را نسبت به عنصر آهن نشان می دهد. در نهایت، با توجه به پردازش ساده، هزینه پایین، کیفیت بالا برای استفاده طولانی مدت و آنتی باکتریال بودن نانو هیدروکسیدها، این محافظها برای محیط های پرتو درمانی که افراد بیمار نیازمند حفاظت از عوامل میکروبی حضور دارند، مناسب بوده و نیازی به استریل کردن تجهیزات نخواهد بود و باعث صرفه جویی در هزینه می شود.

نشان می دهند که این کمیت وابسته به انرژی فوتون می باشد که در آن افزایش انرژی فوتون فرودی منجر به افزایش ضخامت لایه یک دهم مقدار می شود. همان طور که مشاهده می شود با اضافه شدن آهن به عنوان ناخالصی (ناخالصی یعنی درصد پایینی از یک ماده) میانگین ضخامت لایه یک دهم مقدار افزایش می یابد، ولی با افزایش نسبت عنصر آهن رفته رفته میزان میانگین ضخامت کاهش یافته و بهینه تر می شود. شکل ۸ نشان می دهد که Fe-Hap-۴۸ در مقایسه با سایر نانو هیدروکسیدها، فوتون های گامای بیشتری را با حداقل ضخامت مورد نیاز ضعیف می کند. مقادیر پایین لایه یک دهم مقدار نیز به دلیل بالاترین چگالی Fe-Hap-۴۸ نسبت به نمونه های دیگر است و به کمترین ضخامت برای جذب پرتوهای گاما در تمام طیف پرتویی نیاز دارد. این میزان برتری در میانگین ضخامت در تمام طیف انرژی در شکل داخلی نمودار ۸ به وضوح نشان داده شده است.



شکل ۷. تغییرات لایه نیم مقدار برای نمونه های منتخب بر حسب تغییرات انرژی.



شکل ۸. تغییرات لایه یک دهم مقدار برای نمونه های منتخب بر حسب تغییرات انرژی.



مراجع

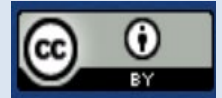
- Chen Q, Naseer K.A, Marimuthu K, Kumar P, Miao B, Mahmoud K.A, Sayyed M.I. Influence of Modifier Oxide on the Structural and Radiation Shielding Features of Sm³⁺-Doped Calcium Telluro-Fluoroborate Glass Systems. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2020;57(1):275–286.
- McCaffrey J.P, Shen H, Downton B, Mainegra-Hing E. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. *Medical Physics*. 2007;34(2):530–537.
- Hu H, Wang Q, Qin J, Wu Y.L, Zhang T, Xie Z, Jiang X, Zhang G, Xu H, Xiang-Yang Z, Zhang J, Liu W, Li Z, Zhang B, Li L, Zhang S, Ouyang X, Zhu J, Zhao Y, Zhan Y. Study on Composite Material for Shielding Mixed Neutron and gamma-Rays. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2008;55(4):2376–2384.
- Hu G, Shi G, Hu H, Yang Q, Yu B, Sun W. Development of gradient composite shielding material for shielding neutrons and gamma rays. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020;52(10):2387–2393.
- Zahran H.Y, Yousef E.S, Alqahtani M, Reben M, Algarni H, Umar A, Albargi H, Yahia I.S, Sabry N. Analysis of the Radiation Attenuation Parameters of CU₂HGL₄, AG₂HGL₄, and (CU/Ag/HGI) Semiconductor Compounds. *Crystals*. 2022;12(2):276.
- Selly J.B, Roga A.U, Berek N.C. Efek paparan radiasi pengion terhadap jumlah leukosit pekerja di instalasi radiologi rumah sakit di kupang, ntt. *Medica Hospitalia: Journal of Clinical Medicine*. 2022;9(1):14–19.
- Bystrov V, Piccirillo C, Tobaldi D.M, Castro P.M.L, Coutinho J.a.P, Kopyl S, Pullar R.C. Oxygen Vacancies, the Optical Band Gap (Eg) and Photocatalysis of Hydroxyapatite: Comparing Modelling with Measured Data. *Applied Catalysis B-environmental*. 2016;196:100–107.
- Hołyńska B. Study of the Effect of Grain Size Heterogeneity in the X-Ray Absorption Analysis of Simulated Aqueous Slurries. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 1972;27(6):237–245.
- Kim S.Y, Jun J, Lee M.G. Particle size-dependent pulverization of b4c and generation of b4c/sts nanoparticles used for neutron absorbing composites. *Nuclear Engineering and Technology*. 2014;46(5):675–680.
- Bayat M, He Y, Ko F, Michelson D.G, Mei A. Electromagnetic interference shielding effectiveness of hybrid multifunctional Fe₃O₄/carbon nanofiber composite. *Polymer*. 2014;55(3):936–943.
- Artem'ev V.A. Estimate of the Attenuation of γ Rays by Nanostructural Materials. *Atomic Energy*. 2002;93:665–672.
- Nambiar S, Osei E, Yeow J.T.W. Polymer Nanocomposite-Based Shielding against Diagnostic X-Rays. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012;127(6):4939–4946.
- Botelho M.Z, Künzel R, Okuno E, Levenhagen R.S, Basegio T.M, Bergmann C.P. X-Ray Transmission through Nanostructured and Microstructured CuO Materials. *Applied Radiation and Isotopes*. 2011;69(2):527–530.
- Martínez G, Malumbres A, Mallada R, Hueso J.L, Irusta S, Bomati-Miguel O, Santamaría J. Use of a polyol liquid collection medium to obtain ultrasmall magnetic nanoparticles by laser pyrolysis. *Nanotechnology*. 2012;23(42):425605.
- Roh Y, Vali H, Phelps T.J, Moon J.W. Extracellular synthesis of magnetite and metal-substituted magnetite nanoparticles. *J Nanosci Nanotechnol*. 2006;6(11):3517–3520.
- Wu W, He Q, Jiang C. Magnetic Iron Oxide Nanoparticles: Synthesis and surface Functionalization Strategies. *Nanoscale Research Letters*. 2008;3(11).
- Marişca O.T, Leopold N. Anisotropic Gold Nanoparticle-Cell Interactions Mediated by Collagen. *Materials*. 2019;12(7):1131.
- Landström L, Elihn K, Boman M, Granqvist C.G, Heszler P. Analysis of Thermal Radiation from Laser-Heated Nanoparticles Formed by Laser-Induced Decomposition of Ferrocene. *Applied Physics A*. 2005;81(4):827–833.
- Vallet-Regí M, González-Calbet J.M. Calcium Phosphates as Substitution of Bone Tissues. *Progress in Solid State Chemistry*. 2004;32(1–2):1–31.
- Suchanek W, Yoshimura M. Processing and Properties of Hydroxyapatite-Based Biomaterials for Use as Hard Tissue Replacement Implants. *Journal of Materials Research*. 1998;13(1):94–117.
- Feki H.E, Savariault J.M, Salah A.B. Structure Refinements by the Rietveld Method of Partially Substituted Hydroxyapatite: Ca₉Na_{0.5}(PO₄)_{4.5}(CO₃)_{1.5}(OH)₂. *Journal of Alloys and Compounds*. 1999;287(1–2):114–120.
- Badawy S.M, El-Latif A.A. Synthesis and characterizations of magnetite nanocomposite films for radiation shielding. *Polymer Composites*. 2015;38(5):974–980.
- Samb-Joshi K.M, Sethi Y.A, Ambalkar A.A, Sonawane H, Rasale S.P, Panmand R.P, Patil R, Kale B.B, Chaskar M.G. Lignin-Mediated biosynthesis of ZNO and TIO₂ nanocomposites for enhanced antimicrobial activity. *Journal of Composites Science*. 2019;3(3):90.



24. Sagadevan S, Oh W.C, Comprehensive Utilization and Biomedical Application of MXenes-A Systematic Review of Cytotoxicity and Biocompatibility. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2023;85:104569.
25. Curcio M, Rau J.V, Santagata A, Teghil R, Laureti S, De Bonis A. Laser Synthesis of Iron Nanoparticle for Fe Doped Hydroxyapatite Coatings. *Materials Chemistry and Physics*. 2019;225:365–370.
26. Anjaneyulu U, Vijayalakshmi U. Preparation and Characterization of Novel Sol-Gel Derived Hydroxyapatite/Fe₃O₄ Composites Coatings on Ti-6Al-4V for Biomedical Applications. *Materials Letters*. 2017;189:118–121.
27. Chatzipapas K.P, Sakata D, Shin W.G, Zein S.A, Brown J.M.C, Kyriakou I. Geant4-DNA Simulation of Human Cancer Cells Irradiation with Helium Ion Beams. *Physica Medica*. 2023;112:102613.
28. Thiam C, Breton V, Donnarieix D, Habib B, Maigne L. Validation of a dose deposited by low-energy photons using GATE/GEANT4. *Physics in Medicine and Biology*. 2008;53(11):3039–3055.
29. Alipoor M, Eshghi M. A Comprehensive Study of Gamma-Rays Shielding Features of Binary Compounds. *Progress in Physics of Applied Materials*. 2024;4(4):59-67.
30. Martínez-Rovira I, Sempau J, Prezado Y. Development and commissioning of a Monte Carlo photon beam model for the forthcoming clinical trials in microbeam radiation therapy. *Medical Physics*. 2011;39(1):119–131.
31. Alipoor M, Eshghi M. Nickel/Multiwalled Carbon Nanotube Composites as Gamma-Ray Shielding. *NANO*. 2024;19(6): 2450027.
32. Ahmadi S.J, Rafiei-Sarmazdeh Z, Zahedi Dizji S.M, Jafari S.H, Kasesaz Y. Comparison of performance of composite and nanocomposites based on heavy polyethylene and boron nitride for use in neutron shielding. *Journal of Nuclear Sciences and Techniques*. 97(3);79-88 (2021) (In Persian).
33. Arwaneh A, Asadi A, Hosseini S.A. Investigating the properties of gamma ray shielding with increasing 2TiO concentration in 3O2Al-4O3Pb-ZnO-3O2Bi glass sample with simulation and computing tools. *Journal of Nuclear Sciences and Techniques*. 2024;106(4):76-84 [In Persian].

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

علی پور، محمد رضا، عشقی، مهدی. (۱۴۰۳)، خواص حفاظتی نانوهیدروکسیدهای آلاییده شده با آهن در برابر پرتو گاما. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*.
 Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1643.html .DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1643> .۱۵۷-۱۴۸، (۴)۱۱۰

