



Research Article

Investigating the Effect of the Concentration of Silver Nanoparticles in MAGIC-f Polymer Gel on the Absorbed Dose of Gamma Rays From ^{241}Am and ^{137}Cs Sources

Mozhde Nabati and Hossein Tavakoli-Anbaran* 

Faculty of Physics and Nuclear Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Semnan, Iran

* Corresponding author, Email: Tavakoli.anbaran@gmail.com & Tavakoli-Anbaran@shahroodut.ac.ir

(Received: 16 December 2025; Revised: 6 April 2026; Accepted: 22 May 2026; Available online: 1 July 2026)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: This study investigated the effect of silver nanoparticles (AgNPs) in MAGIC-f polymer gel on the absorbed dose of gamma rays from americium-241 (^{241}Am) and cesium-137 (^{137}Cs) sources. The main objectives were to evaluate changes in the transmission coefficient, linear and mass attenuation coefficients, linear energy absorption, and absorbed dose for different concentrations of AgNPs, and to compare the experimental behavior with theoretical results.

Materials and Methods: MAGIC-f gel samples were prepared with 14 different concentrations of AgNPs (ranging from 0 to 1.22% by weight). After polymerization, the transmission spectra of the gels, both with and without nanoparticles, using a NaI(Tl) detector under irradiation from ^{241}Am (59 keV) and ^{137}Cs (662 keV) gamma-ray sources. Following background subtraction, the spectral data were used to calculate the target parameters.

Results: Experimental results showed that adding AgNPs reduced the transmission coefficient: for ^{241}Am , it decreased from 0.895 (pure gel) to 0.810 (gel with 1.04 wt. % AgNPs), and for ^{137}Cs , from 0.891 to 0.859. Furthermore, the linear and mass attenuation coefficients for both gamma energies exhibited an increasing trend, and the absorbed dose parameter showed a measurable increase. Theoretical calculations indicated a decrease in the transmission coefficient for ^{241}Am from 0.745 (pure gel) to 0.670. In contrast, this parameter remained nearly constant for ^{137}Cs in the theoretical data.

Conclusion: The findings indicate that silver nanoparticles, particularly at lower gamma energies, enhance the attenuation and absorption of gamma rays, thereby increasing the absorbed dose in the MAGIC-f polymer gel.

Keywords: MAGIC-f polymer gel, Silver nanoparticles, Gamma ray transmission coefficient, Linear attenuation coefficient of gamma rays, Absorption dose.

How to Cite: Nabati M, Tavakoli-Anbaran H. Investigating the effect of the concentration of silver nanoparticles in MAGIC-f polymer gel on the absorbed dose of gamma rays from ^{241}Am and ^{137}Cs sources. J Adv Mater Eng. 2026;45(4):69–87 (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jame.45.4.1179>


Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



بررسی اثر غلظت نانوذرات نقره در ژل پلیمر MAGIC-f روی دز جذبی پرتوهای گامای چشمه‌های ^{241}Am و ^{137}Cs

مژده نباتی و حسین توکلی انبران* 

گروه آموزشی فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران
* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: Tavakoli.anbaran@gmail.com & Tavakoli-Anbaran@shahroodut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۹/۲۵، بازنگری: ۱۴۰۵/۱/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۱، انتشار: ۱۴۰۵/۴/۱۰)

چکیده

مقدمه و اهداف: در این پژوهش، تأثیر نانوذرات نقره در ژل پلیمری MAGIC-f بر دز جذبی پرتوهای گامای چشمه‌های آمرسیوم-۲۴۱ (^{241}Am) و سزیم-۱۳۷ (^{137}Cs) بررسی شد. هدف مطالعه، ارزیابی تغییرات ضرایب عبور، تضعیف خطی و جرمی، جذب خطی انرژی و دز جذبی درصدهای مختلف نانوذرات نقره در ژل و مقایسه رفتار تجربی با نتایج تئوری بود.

مواد و روش‌ها: ابتدا نمونه‌های ژل MAGIC-f در ۱۴ غلظت مختلف از صفر تا ۱/۲۲ درصد وزنی نانوذرات نقره تهیه شدند و پس از پلیمریزاسیون، طیف پرتوهای عبوری از ژل پلیمر MAGIC-f در حضور و بدون حضور نانوذرات نقره با آشکارساز NaI(Tl) تحت تابش چشمه‌های ^{241}Am (۵۹ keV) و ^{137}Cs (۶۶۲ keV) قرار گرفتند. داده‌های طیفی پس از حذف زمینه، برای محاسبه پارامترهای هدف به کار رفتند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد برای داده‌های تجربی در انرژی پرتوهای گامای ^{241}Am ، ضریب عبور از ۸۹۵٪ برای ژل خالص به ۸۱۰٪ برای نمونه ژل با ۱/۰۴ درصد وزنی نانوذرات نقره کاهش یافت و در انرژی پرتوهای گامای ^{137}Cs از ۸۹۱٪ به ۸۵۹٪ رسید. همچنین ضریب تضعیف خطی و جرمی برای پرتوهای گامای هر دو چشمه روند افزایشی داشت و پارامتر دز جذبی نیز افزایش قابل‌اندازه‌گیری را نشان داد. برای داده‌های تئوری در انرژی پرتوهای گامای ^{241}Am ، ضریب عبور از ۷۴۵٪ برای ژل خالص به ۶۷۰٪ کاهش یافت. این پارامتر در داده‌های تئوری چشمه ^{137}Cs تقریباً ثابت است و تغییر محسوسی ندارد.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها حاکی از آن است که نانوذرات نقره به‌ویژه در انرژی‌های پایین‌تر، موجب افزایش تضعیف و جذب پرتوهای گاما و دز جذبی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: ژل پلیمر MAGIC-f، نانوذرات نقره، ضریب عبور پرتوهای گاما، ضریب تضعیف خطی پرتوهای گاما، دز جذبی.



۱- مقدمه

پرتودرمانی، یکی از روش‌های مؤثر درمان سرطان است که در آن از پرتوهای یونیزان مانند پرتو ایکس، گاما و الکترون برای تخریب سلول‌های توموری استفاده می‌شود. با پیشرفت مداوم فناوری‌های پرتویی، طراحی و اجرای طرح‌های درمانی نیز پیچیده‌تر شده و به همین دلیل، تعیین دقیق دز دریافتی اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند. هدف اصلی در پرتودرمانی و براکی‌تراپی، رساندن بیش‌ترین دز ممکن به بافت توموری و درعین‌حال کاهش دز واردشده به بافت‌های سالم است؛ رویکردی که در قالب اصل آلازا^۱ تعریف می‌شود و اساس ایمنی پرتویی را تشکیل می‌دهد. از این‌رو، کنترل و حداقل‌سازی پرتودهی ناخواسته به بافت‌های سالم همواره یکی از چالش‌ها و دغدغه‌های مهم در فرایند پرتودرمانی است (۳-۱). در پرتودرمانی روش تحویل دز و خطاهای احتمالی آن از حساسیت بسیار بالایی برخوردار هستند. اندازه‌گیری دقیق دز پرتوهای یونیزان و تعیین نحوه تضعیف فوتونها در مواد مختلف، شناخت دقیق از برهم‌کنش‌های پرتو با ماده و ارزیابی انرژی جذب‌شده توسط بافت‌ها، از جمله پیش‌شرط‌های ضروری برای برنامه‌ریزی درمان‌های پرتودرمانی است. در این راستا، پارامترهایی مانند دز جذبی، آهنگ دز جذبی، ضریب تضعیف خطی و جرمی و ضریب عبور، ابزارهای استاندارد برای توصیف و سنجش اثر پرتوها بر ماده به شمار می‌روند. دز جذبی، بیانگر انرژی به‌جا گذاشته‌شده توسط پرتو در واحد جرم ماده است و با واحد گری (Gy) اندازه‌گیری می‌شود (۴)؛ درحالی‌که ضریب تضعیف جرمی، معیار مستقل از چگالی و حالت فیزیکی ماده برای مقایسه تعامل پرتوها با مواد مختلف است (۵). قانون بیر-لامبرت، رفتار کاهش نمایی شدت پرتوها در عبور از ماده را توضیح می‌دهد و نشان می‌دهد که میزان کاهش شدت پرتو وابسته به خواص فیزیکی و شیمیایی ماده و انرژی فوتون است (۶). این اصول نه‌تنها در طراحی محافظ‌ها و بررسی عملکرد آشکارسازها اهمیت دارند، بلکه در حوزه پزشکی و پرتودرمانی نیز کاربرد حیاتی دارند. در زمینه

اندازه‌گیری دز، آشکارسازها نقش کلیدی ایفا می‌کنند و با استفاده از انواع مختلف آن‌ها همچون گازی، سوسوزن و نیمه‌رسانا، امکان شناسایی و تحلیل دقیق تابش را فراهم می‌آورند. به‌ویژه، آشکارسازهای سوسوزن غیرآلی نظیر آشکارساز سدیم یدید آلیبده با تالیم^۲ با چگالی بالا و بازده نوری مناسب، ابزار رایج برای طیف‌سنجی گاما هستند و برای اندازه‌گیری دقیق انرژی و شدت تابش کاربرد دارند (۷). روش قدیمی استفاده از فانتوم آبی به دلیل شباهت خواص فیزیکی آب به بافت نرم بدن انسان، سال‌ها است که مورداستفاده قرار می‌گیرد، اما با خطاها و محدودیت‌هایی همراه است. امروزه برای کاهش این خطاها، از دزیمترهای سه‌بعدی که یک روش نسبی برای سنجش و ارزیابی توزیع دز تابشی مطرح شده‌اند استفاده می‌کنند. این دزیمترها، امکان اندازه‌گیری هم‌زمان دز در سه بعد فضایی را فراهم کرده است (۸). دزیمترهای شیمیایی همواره به‌عنوان یکی از گزینه‌های برتر برای اندازه‌گیری دز به‌صورت سه‌بعدی مطرح بوده‌اند. این ابزارها در انواع مختلفی ارائه می‌شوند که معمولاً تحت عنوان ژل دزیمتری شناخته می‌شوند. به‌عنوان نمونه، می‌توان به ژل‌های فریک اشاره کرد که با تبدیل یون‌های فرو به فریک، تغییرات دز را نمایش می‌دهند. باین‌حال، این روش دارای محدودیت‌هایی است؛ از جمله مسئله پخش یون‌ها که می‌تواند دقت سنجش را تحت تأثیر قرار دهد (۹). نسل بعدی، ژل‌های پلیمری هایپوکسیک^۳ هستند که با جایگزینی منومرها در ماتریس ژل، توزیع دز پایدار و قابل تصویربرداری تشدید مغناطیسی^۴ ارائه می‌دهند (۱۰). فرمولاسیون‌های جدیدتر همچون ژل‌های نورموکسیک (۱۱) و پلیمر جامد رادیوکرومیک (۱۲ و ۱۳)، علاوه بر رفع محدودیت‌های قبلی، امکانات عملیاتی و دقت اندازه‌گیری بالاتری دارند که در این تحقیق از ژل پلیمر دزیمتر نوع نورموکسیک با علامت اختصاری MAGIC-f^۵ استفاده شده است که نسخه بهبودیافته ژل پلیمر MAGIC^۶ می‌باشد (۱۴). ویژگی‌هایی از قبیل پایداری، حساس نبودن به دما تا بازه ۶۹ درجه سانتی‌گراد و وابستگی به آهنگ دز، موجب شده تا

پرتودرمانی‌های پیچیده جایگاه ویژه‌ای یافته است، بلکه با افزودن نانوذرات فلزی می‌تواند به‌عنوان بستری نوین برای افزایش کارایی و دقت در دزیمتری پیشرفته مورد توجه قرار گیرد. یکی از راهکارهای مهم برای بهبود پاسخ دزیمتری ژل‌های پلیمری، استفاده از نانوذرات فلزی است. توکلی عبران و واحدیان موحد (۲۱)، به بررسی اثر نانوذرات نقره^۸ در ژل پلیمر حامل بر ضریب انباشت دز در مسائل پرتودرمانی و حفاظتی گاما پرداختند. نتایج موجود در این پژوهش نشان می‌دهد که در غلظت‌های صفر تا دو میلی‌مولار نانوذرات نقره ضریب انباشت دز به‌صورت افزایشی بوده و با افزایش ارتفاع نمونه به مقدار بالاتری خواهد رسید، اما در غلظت‌های دو تا هشت میلی‌مولار نانوذرات نقره ضریب انباشت دز کاهش می‌یابد و افزایش ضخامت آن موجب تشدید اثر غلظت نانوذرات بر ضریب انباشت دز می‌شود که این موضوع نشان می‌دهد که نانوذرات نقره می‌توانند هم سبب بهبود در دقت اندازه‌گیری دز در مسائل پرتودرمانی و هم در طراحی حفاظت‌های سبک و غیرسمی نقش موثری ایفا کنند. نانوذرات با عدد اتمی بالا مانند نقره، به‌دلیل افزایش سطح مقطع فوتوالکتریک، موجب افزایش دز دریافت‌شده توسط بافت هدف می‌شوند و در مطالعات اخیر، به‌عنوان حامل‌های دارویی و عوامل حساس به تابش نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مجموع، پیشرفت‌های اخیر در زمینه دزیمتری، آشکارسازی و کاربرد نانوذرات، امکان بررسی دقیق‌تر و بهینه‌تر اثر پرتوهای یونیزان را فراهم کرده و افق‌های جدیدی در تحقیقات پرتودرمانی و حفاظت پرتویی گشوده است (۲۲).

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مشخصه‌یابی شیمیایی و عنصری ژلاتین

به‌منظور تعیین ترکیب عنصری و شیمیایی ژلاتین مورد استفاده در ساخت ژل MAGIC-f، نمونه ژلاتین خام ابتدا تحت آزمون‌های آنالیز کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد^۹ و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^{۱۰} قرار گرفت. هدف از

کاربردهای وسیعی داشته باشند. نقطه ذوب ژل پلیمر MAGIC-f در دمای ۶۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که نسبت به ژل پلیمر MAGIC که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دمای اتاق) ذوب می‌شد، پایداری دمایی دارد. تاکنون از ژل پلیمرها، به‌عنوان فانتوم در آزمایش‌ها و تحقیقات به‌عنوان دزیمترهای سه‌بعدی استفاده کرده‌اند (۱۵). با پیشرفت فناوری نانو، استفاده از نانوذرات، امکان افزایش جذب انرژی توسط بافت‌های هدف و ارتقای اثر درمانی پرتودرمانی را فراهم کرده است. مطالعه مارکز و همکاران (۱۶) در سال ۲۰۱۰، نشان داد که تطابق بین نتایج دزیمتری این ژل و داده‌های شبیه‌سازی شده مونت کارلو در بررسی تأثیر نانوذرات طلا بر افزایش دز، در تمامی غلظت‌ها بیش از ۹۷٪ است که آن را به ابزاری ایده‌آل برای اعتبارسنجی کاربرد نانوذرات در پرتودرمانی تبدیل می‌کند. کوودو و همکاران (۱۷) در سال ۲۰۱۶، عملکرد MAGIC-f را در براکی‌تراپی با منبع ^{۱۹۲}Ir بررسی کرده و نتایج حاصل را با شبیه‌سازی مونت کارلو مقایسه کردند. یافته‌های آن‌ها تأیید کرد که ژل قادر است توزیع دز اطراف منابع رادیواکتیو را با دقتی قابل توجه بازتاب دهد. در همین راستا، توجه پژوهشگران به ترکیب MAGIC-f با نانوذرات فلزی جلب شد؛ خسروی و همکاران (۱۸) در سال ۲۰۱۶، نشان دادند که افزودن نانوذرات طلا به این ژل موجب افزایش حدود ۱۴٪ در دز جذبی پروستات تحت براکی‌تراپی می‌شود. نتایج مشابهی توسط قریشی و همکاران (۱۹) در سال ۲۰۱۷ گزارش گردید که نشان دادند در پرتودهی با پرتوهای ایکس ۶ MV، حضور نانوذرات طلا میانگین فاکتور دوز جذبی^۷ را تا ۷/۸٪ افزایش می‌دهد. خسروی و همکاران (۲۰) در سال ۲۰۱۹ گزارش کردند، در پرتودهی با فوتون‌های ۱۸ MeV، تطابق خوبی میان محاسبات تئوری و تجربی در دز جذبی وجود دارد. این نتایج بیانگر پتانسیل بالای MAGIC-f غنی‌شده با نانوذرات در افزایش حساسیت دزیمتری و بهبود کیفیت پرتودرمانی است. به‌طور کلی، نتایج این مجموعه مطالعات نشان می‌دهد که MAGIC-f نه تنها در دزیمتری سه‌بعدی و کنترل کیفیت

جدول ۱- داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون EDS با بزرگنمایی ۲۵ μm

عنصر	نوع خط	درصد وزنی	انحراف معیار درصد اتمی	درصد وزنی
کربن	سری K	۵۰/۵۴	۰/۴۴	۵۶/۳۲
اکسیژن	سری K	۳۰/۰۵	۰/۳۴	۲۵/۱۴
نیتروژن	سری K	۱۹/۴۰	۰/۶۲	۱۸/۵۴
جمع کل		۱۰۰		۱۰۰

جدول ۲- داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون EDS با بزرگنمایی ۵۰ μm

عنصر	نوع خط	درصد وزنی	انحراف معیار درصد اتمی	درصد وزنی
کربن	سری K	۵۳/۶۳	۰/۶۰	۵۹/۳۹
اکسیژن	سری K	۲۸/۹۲	۰/۴۲	۲۴/۰۴
نیتروژن	سری K	۱۷/۴۵	۰/۸۳	۱۶/۵۷
جمع کل		۱۰۰		۱۰۰

آزمون‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۱۱} و EDS مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های EDS در بزرگنمایی‌های ۲۵ μm و ۵۰ μm نشان داد که عناصر غالب موجود در نمونه شامل کربن، اکسیژن و نیتروژن هستند. نتایج وزنی و اتمی برای هر بزرگنمایی در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

با استفاده از داده‌های وزنی و با به‌کارگیری روش محاسبه فرمول تجربی، ترکیب عنصری ژلاتین در بزرگنمایی ۲۵ μm به‌صورت تقریبی $C_6H_{12}NO_2$ و در بزرگنمایی ۵۰ μm به‌صورت $C_7N_2O_3$ تعیین شد. از آنجا که روش EDS قادر به شناسایی عنصر هیدروژن نیست، مقدار هیدروژن از نتایج CHNS استخراج و در محاسبه نسبت‌های مولی لحاظ شد.

با توجه به این‌که ژلاتین یک پلی پپتید طبیعی با ساختاری ماکرومولکولی است، نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های CHNS و EDS تنها نسبت‌های عنصری را نشان می‌دهند و به‌طور ذاتی قادر به بازسازی ساختار کامل زنجیره پروتئینی ژلاتین نیستند. فرمول‌های تجربی حاصل‌شده مانند $C_3H_6NO_2$ یا $C_6H_{12}NO_2$ و $C_7N_2O_3$ صرفاً نمایانگر نسبت مولی عناصر در واحدهای



شکل ۱- تصویر دستگاه آنالیز CHNS.

این مرحله، مشخصه‌یابی دقیق عناصر اصلی تشکیل‌دهنده ژلاتین و استخراج فرمول تجربی آن بود تا در محاسبات و تعیین ترکیب جرمی ژل، از مقادیر واقعی و معتبر استفاده شود.

• آنالیز CHNS

برای تعیین درصد وزنی عناصر کربن، هیدروژن و نیتروژن در ژلاتین، آزمون CHNS انجام شد. در این روش، نمونه تحت احتراق کامل قرار می‌گیرد و کربن به‌صورت دی‌اکسید کربن (CO_2)، هیدروژن به شکل بخار آب (H_2O) و نیتروژن به‌صورت گازهای نیتروژن (N_2) تحلیل می‌گردند و در نتیجه غلظت عناصر C، H و N اندازه‌گیری می‌شود (۲۳) که در شکل (۱) تصویر دستگاه آنالیز CHNS آورده شده است. مقدار اکسیژن نیز از طریق محاسبه اختلاف مجموع درصد وزنی عناصر اندازه‌گیری شده از ۱۰۰ درصد به‌دست آمد. نتایج نشان داد که ژلاتین استفاده‌شده شامل ۴۳/۷۷٪ کربن، ۶/۷۲٪ هیدروژن، ۱۵/۹۵٪ نیتروژن و ۳۳/۵۶٪ اکسیژن است.

بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، تعداد مول نسبی هر عنصر محاسبه و با تقسیم بر کوچک‌ترین مقدار (نیتروژن) نرمال‌سازی شد. نتیجه نهایی منجر به استخراج فرمول تجربی ژلاتین به‌صورت $C_3H_6NO_2$ گردید.

• آزمون EDS

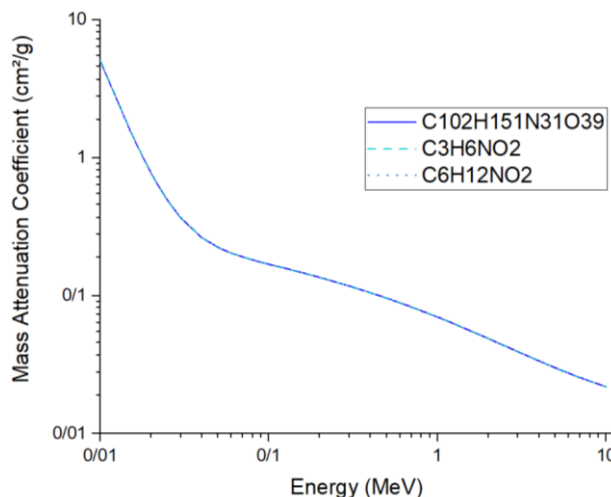
برای تکمیل تحلیل عنصری و بررسی ساختار سطحی ژلاتین،

جدول ۳- درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده ژل پلیمر MAGIC-f

نام عنصر یا ترکیب	فرمول شیمیایی	کسر وزنی
آب دوبار تقطیر	H ₂ O	۰/۸۲۳۱۸
اسید متااکریلیک	C ₄ H ₆ O ₂	۰/۵۹۹
فرمالین	CH ₂ O	۰/۰۳۲۲
ژلاتین	C ₁₀₂ H ₁₅₁ O ₃₉ N ₃₁	۰/۰۸۳۳
اسید اسکوربیک	C ₆ H ₈ O ₆	۰/۰۰۰۳
سولفات مس پنج آبه	CuSO ₄ . 5H ₂ O	۰/۰۰۰۲

فرآیند التراسونیک قرار گرفتند. این مرحله با شکستن تجمعات احتمالی، از کلوخه شدن ذرات در ساختار ژل جلوگیری می کند و پایداری محلول اولیه را افزایش می دهد. پس از اتمام فرآیند التراسونیک، ژلاتین به محلول نقره افزوده گردید و به همراه یک مگنت همزن در ظرف مناسبی ریخته شدند. ظرف روی همزن مغناطیسی حرارتی قرار گرفت و مخلوط تا دمای ۴۵ درجه سانتی گراد گرم شد. این حرارت دهی حدود ۳۰ دقیقه ادامه یافت تا ذرات ژلاتین به طور کامل در محلول حل شوند. پس از آن، دستگاه گرمایش خاموش شد تا دمای مخلوط به حدود ۳۵ درجه سانتی گراد کاهش یابد. در این مرحله، اسید اسکوربیک، سولفات مس و محلول فرمالدئید با غلظت ۳۷ درصد وزنی به ترکیب اضافه شدند. حدود پنج دقیقه بعد، مونومر متااکریلیک نیز به مخلوط افزوده شد. در طول تمام مراحل، محلول به طور مداوم هم زده می شود تا یکنواختی ترکیب حفظ شود که در شکل (۳) طرحواره ساخت نمونه آورده شده است.

برای بررسی اثر غلظت نانوذرات نقره بر رفتار دزیمتری ژل، نمونه های MAGIC-f در چند درصد وزنی مختلف از نانوذرات نقره تهیه شدند. غلظت نانوذرات در محدوده صفر تا ۱/۲۲ درصد وزنی انتخاب شد تا تأثیر تغییرات تدریجی نقره بر پارامترهای عبور و تضعیف فوتون ارزیابی شود. در شکل (۴)، نمای کلی از نمونه های ساخته شده و جدول (۴) به عنوان راهنمای نام گذاری نمونه ها همراه کسر وزنی نانوذرات نقره و مشخصات آنها آورده شد.

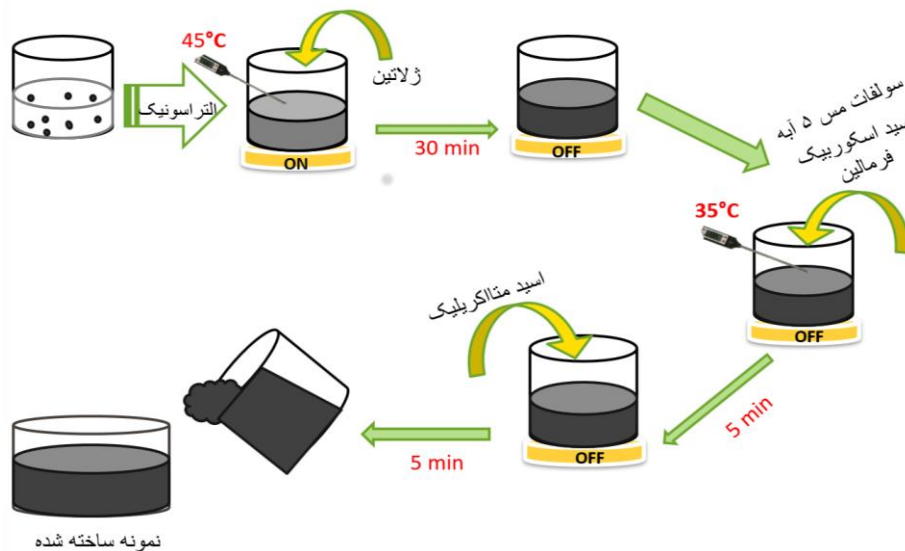


شکل ۲- نمودار ضریب تضعیف جرمی برحسب انرژی برای هر سه فرمول شیمیایی معرفی شده ژلاتین استخراج شده از پایگاه داده های XCOM.

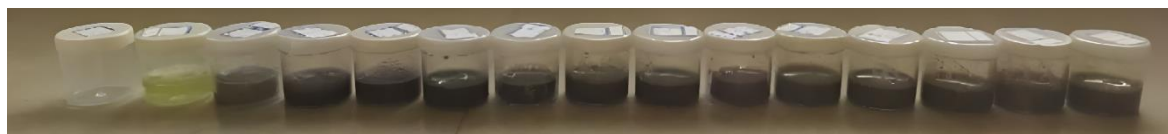
کوچک تر ماده هستند و نباید به عنوان ساختار مولکولی کامل ژلاتین تفسیر شوند. از طرفی با توجه به شکل (۲)، هم پوشانی کامل نمودار ضریب تضعیف جرمی برحسب انرژی در هر سه فرمول شیمیایی مشاهده می شود. براین اساس، در محاسبات تئوری، از فرمول شیمیایی ماکرومولکولی گزارش شده در منابع معتبر، یعنی $C_{102}H_{151}O_{39}N_{31}$ ، استفاده گردید که ترکیب یک واحد پروتئینی ژلاتین را با دقت بیش تری نمایش می دهد (۲۴).

۲-۲- فرآیند تهیه ژل MAGIC-f

برای تهیه ژل دزیمتر MAGIC-f از ترکیبات آزمایشگاهی با گرید مناسب شامل ژلاتین، اسید متااکریلیک، اسید اسکوربیک، سولفات مس پنج آبه، فرمالین و آب مقطر فوق خالص استفاده شد. نانوذرات نقره خریداری شده از شرکت توسعه مهندسی الماسواره دانش (تمادکالا)، با اندازه مشخص (۲۰ تا ۶۰ نانومتر) و در غلظت های متفاوت مطابق اهداف پژوهش به کار گرفته شدند که در جدول (۳)، کسر وزنی عناصر تشکیل دهنده ژل خالص MAGIC-f آورده شده است. جهت دستیابی به پراکنش یکنواخت، نانوذرات نقره ابتدا در آب مقطر ترکیب شده و سپس به مدت ۲۲ دقیقه در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد تحت



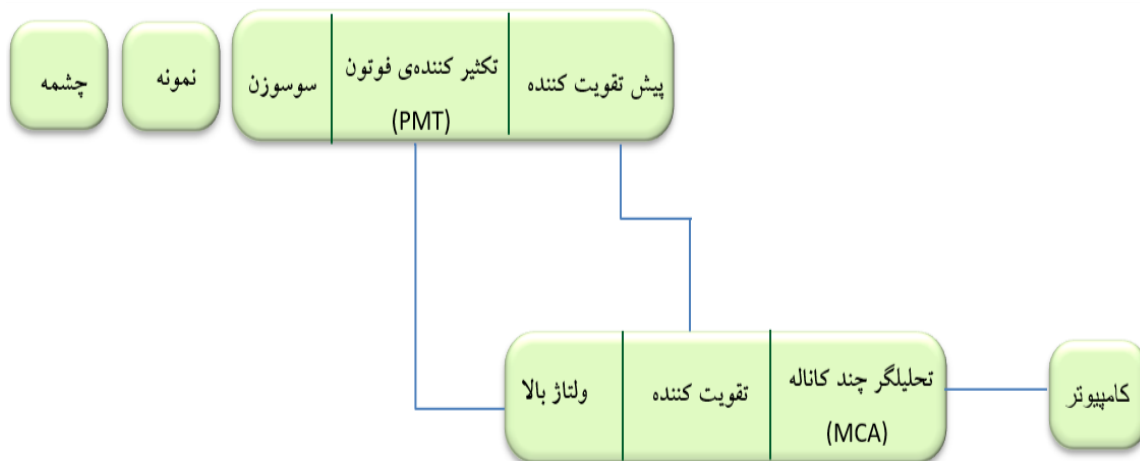
شکل ۳- طرحواره ساخت نمونه.



شکل ۴- نمای کلی از نمونه ژل MAGIC-f با غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره.

جدول ۴- نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها، به همراه جرم و چگالی آن‌ها

نماد نمونه	نمونه	مقدار نانوذرات نقره به کسر وزنی	جرم با خطای ± 0.0001	چگالی با خطای نسبی ± 0.004
N00	ظرف خالی	-	-	-
N0	ژل خالص	0/0	22/6770	0/986
N1	ژل همراه با 0/23 گرم نانوقره	0/00095	22/2922	0/969
N2	ژل همراه با 0/46 گرم نانوقره	0/00197	23/8637	0/994
N3	ژل همراه با 0/69 گرم نانوقره	0/00300	21/5245	0/936
N4	ژل همراه با 0/92 گرم نانوقره	0/00399	22/0370	0/958
N5	ژل همراه با 0/115 گرم نانوقره	0/00500	22/5458	0/980
N6	ژل همراه با 0/139 گرم نانوقره	0/00570	22/8098	0/992
N7	ژل همراه با 0/161 گرم نانوقره	0/00700	22/4941	0/978
N8	ژل همراه با 0/184 گرم نانوقره	0/00797	22/5576	0/981
N9	ژل همراه با 0/21 گرم نانوقره	0/00870	22/4550	0/976
N10	ژل همراه با 0/23 گرم نانوقره	0/00929	22/8063	0/992
N11	ژل همراه با 0/253 گرم نانوقره	0/01040	22/5228	0/979
N12	ژل همراه با 0/28 گرم نانوقره	0/01130	23/3130	1/013
N13	ژل همراه با 0/299 گرم نانوقره	0/01220	22/8152	0/992



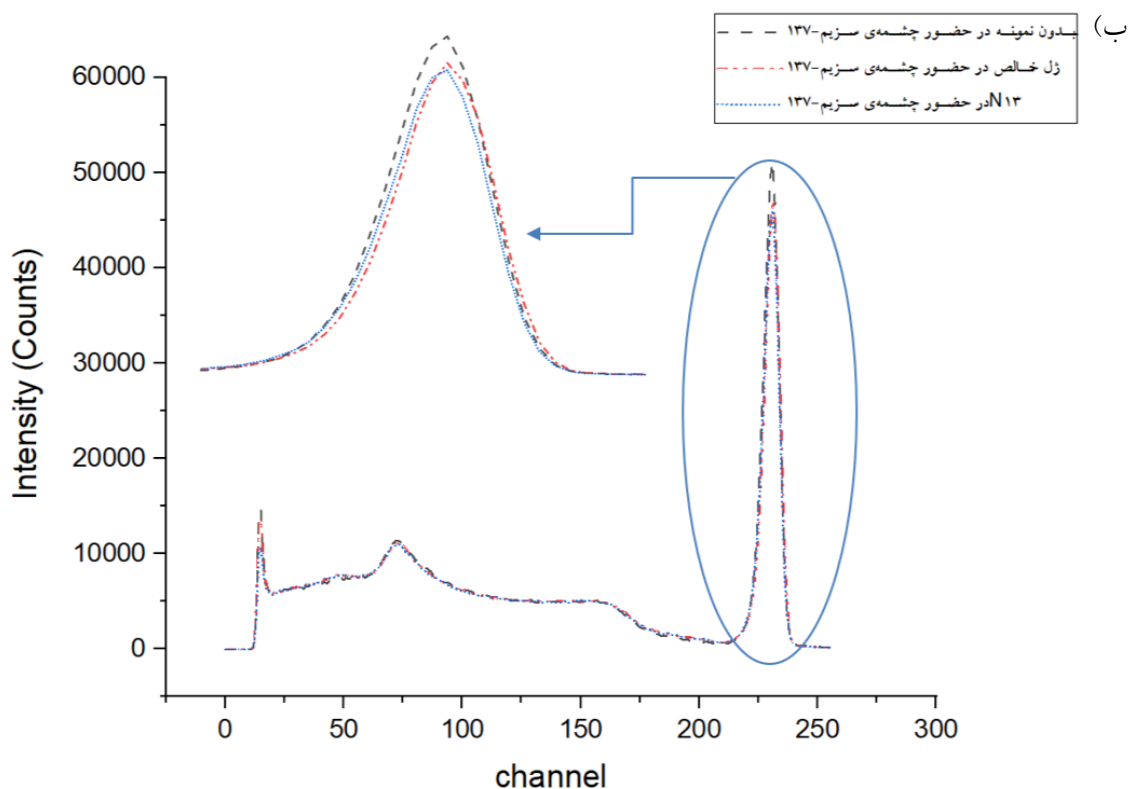
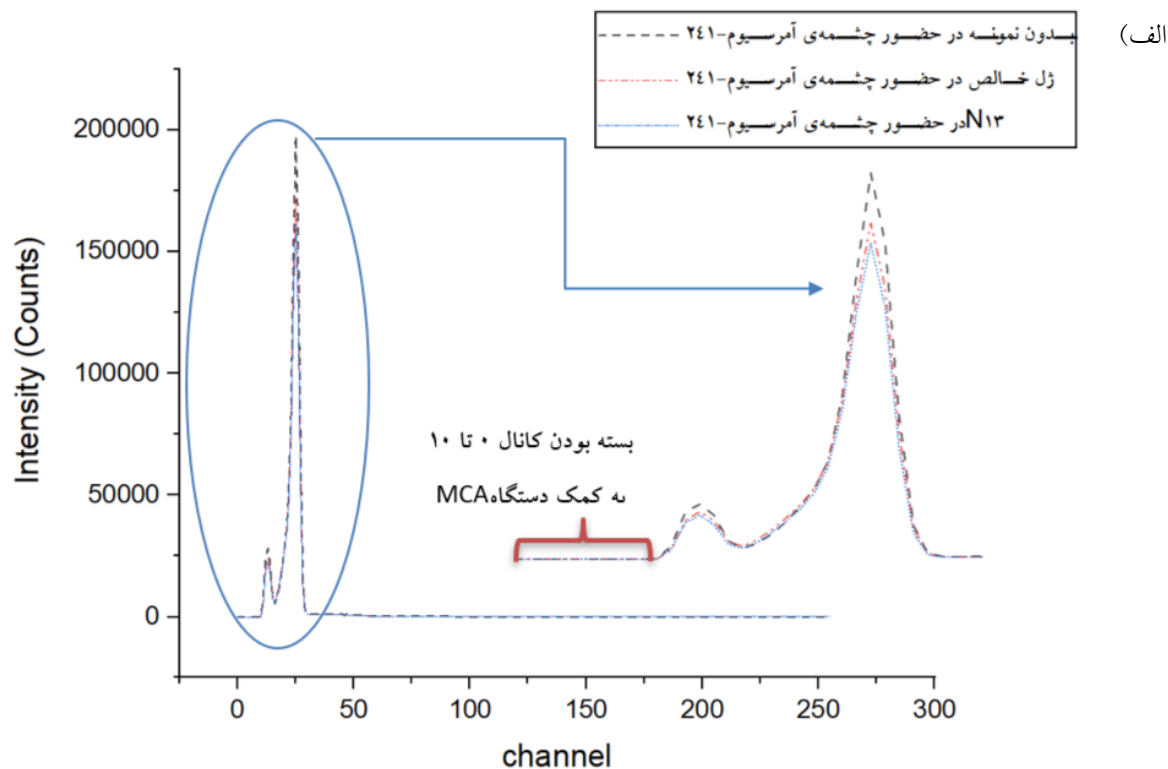
شکل ۵- چیدمان آزمایشگاهی و زنجیره الکترونیک هسته‌ای به صورت بلوک دیاگرام.

۳-۲- پرتودهی

تمامی نمونه‌های تهیه شده پس از فرایند پلیمریزاسیون کامل، در شرایط یکسان برای انجام پرتودهی آماده‌سازی شدند. در شکل (۵)، طرحواره چیدمان آزمایشگاهی به صورت بلوک دیاگرام رسم شد. فرآیند تابش‌دهی با استفاده از دو چشمه پرتو گامای آمرسیوم-۲۴۱ و سزیم-۱۳۷ انجام گرفت. تمامی نمونه‌ها به مدت ۳۰۰ ثانیه تحت تابش قرار گرفتند. در چیدمان آزمایشگاه نمونه مابین چشمه و آشکارساز فاصله‌ای وجود نداشت و به چشمه چسبیده بودند. شدت پرتودهی با استفاده از چهار چشمه آمرسیوم-۲۴۱ با اکتیویته هنگام ساخت پنج میکروکوری (جمعاً ۲۰ میکروکوری) و سه چشمه سزیم-۱۳۷ با اکتیویته هنگام ساخت ۵ میکروکوری (جمعاً ۱۵ میکروکوری) انجام شد. با استفاده از یک آشکارساز NaI(Tl) طیف‌های هر نمونه ثبت شد و با اندازه‌گیری سطح زیر قله فوتوپیک طیف‌های ثبت شده پارامترهای موردنظر شامل: ضریب عبور، ضرایب تضعیف خطی، جرمی و دز جذبی به دست آمد. لازم به ذکر است که به کمک دستگاه تحلیلگر چندکاناله^{۱۲}، کانال‌هایی که در ناحیه نویز بودند بسته شدند و اثرات نوفه^{۱۳} حذف شد. دلیل بسته شدن این کانال‌ها این است که نویز در سیستم الکترونیکی و پرتوهای ایکس در این ناحیه شدت زیادی داشتند و طیف به وضوح دیده نمی‌شد؛ بنابراین تا کانال ۱۰ بسته شد که در شکل (۶) مشاهده می‌شود.

۴-۲- اندازه‌گیری داده‌های تجربی

برای تحلیل داده‌های تجربی، ابتدا طیف‌های ثبت شده توسط آشکارساز برای هر نمونه رسم شد. داده‌های جمع‌آوری شده پس از پرتودهی به صورت نمودارهای خطی در نرم‌افزار Origin رسم شدند. برای استخراج پارامترهای فیزیکی موردنظر، نظیر سطح زیر قله برازش منحنی به کار گرفته شد. برای این فرآیند، از قسمت Analysis گزینه Nonlinear curve Fit → Fiting انتخاب شد. انتخاب مدل ریاضی توابع گاوسی بود. برای شناسایی و تحلیل دقیق قله‌های موجود در طیف، نمودار فیت شده، انتخاب شد و از قسمت Analysis، Peak Analyzer → Peak and Baseline بهره گرفته شد. برازش قله‌ها به‌طور کامل خودکار توسط برنامه انجام گرفت. این امر نیاز به اصلاح خط پایه یا تعیین دستی محدوده قله‌ها را ندارد. در نتیجه، نرم‌افزار به صورت مستقیم پارامترهای اصلی هر قله، از جمله موقعیت قله فوتوپیک^{۱۴}، سطح زیر قله^{۱۵} و پهنای نیم بیشینه^{۱۶} را محاسبه کرده و ارائه داد که در این تحقیق فقط سطح زیر قله که همان شمارش ناخالص است استفاده شد. آهنگ شمارش سطح زیر نمودار زمینه از آهنگ شمارش سطح زیر قله فوتوپیک کم شد؛ بدین صورت اثر زمینه حذف گردید و آهنگ شمارش خالص نمونه‌ها برای هر یک از دو چشمه آمرسیوم-۲۴۱ و سزیم-۱۳۷ به دست آمد.



شکل ۶- نمایه‌ای از طیف ثبت شده برای سه حالت بدون هیچ نمونه‌ای، با نمونه ژل خالص و نمونه با بیشترین غلظت نانوذرات نقره: الف) در حضور چشمه آمرسیوم-۲۴۱، ب) در حضور چشمه سزیم-۱۳۷.

$$\mu_a = \tau + \frac{T_e}{E_\gamma} \sigma_c + \kappa \quad (10)$$

μ_a نمایانگر ضریب خطی جذب انرژی است که به کمک رابطه (10) به دست می‌آید که در آن τ احتمال رخداد فوتوالکتریک، σ احتمال رخداد پراکندگی کامپتون، k احتمال تولید زوج و $\frac{T_e}{E_\gamma}$ نسبت انرژی متوسط الکترون در پراکندگی کامپتون به انرژی فوتون اولیه است. چنانچه انرژی پرتوگاما زیر آستانه تولید زوج (1020 keV) باشد، در آن صورت $k=0$ و از آن صرف‌نظر می‌نماییم (رابطه 11).

$$\mu = \tau + \sigma \quad (11)$$

حال اگر انرژی پرتو گاما به اندازه‌ای کم باشد که پدیده فوتوالکتریک بر پدیده پراکندگی کامپتون غالب باشد آنگاه مطابق رابطه (12) می‌توان نوشت:

$$\mu_a \cong \tau \cong \mu \quad (12)$$

چنانچه انرژی پرتو گاما طوری باشد که پدیده کامپتون بر فوتوالکتریک غالب باشد، می‌توان روابط (13) و (14) را در نظر گرفت.

$$\mu \cong \sigma \quad (13)$$

$$\mu_a \cong \frac{T_e}{E_\gamma} \quad \sigma \cong \frac{T_e}{E_\gamma} \mu \quad (14)$$

انرژی متوسط الکترون‌های حاصل از برهم‌کنش کامپتون برای فوتون‌های چشمه آمرسیوم-241 برابر $5/45 \text{ keV}$ و برای چشمه سزیم-137 برابر $252/48 \text{ keV}$ می‌باشد.

انرژی جذب‌شده در ماده به کمک رابطه (15) به دست می‌آید که در آن Φ شار فوتون‌های فرودی، E_γ انرژی فوتون و μ_a ضریب خطی جذب انرژی فوتون است. شار فوتون‌ها به اکتیویته چشمه وابسته است و ما در این مسئله انرژی جذب‌شده را برای واحد شار به دست آوردیم ($\Phi=1$) که پس از آن با ضرب مقدار به دست آمده در اکتیویته چشمه می‌توان آن را برای هر چشمه با اکتیویته دلخواه به دست آورد.

$$E_a \left(\frac{\text{MeV}}{\text{cm}^3} \right) = \Phi \left(\frac{1}{\text{cm}^2} \right) \cdot \mu_a \left(\frac{1}{\text{cm}} \right) \cdot E_\gamma \text{ (MeV)} \quad (15)$$

برای محاسبه ضریب عبور (T)، به کمک رابطه (1) به دست آمد. نسبت شمارش خالص نمونه‌های دارای نانوذره به شمارش خالص نمونه شاهد (فاقد نانوذره) به دست آمد و سپس با استفاده از رابطه بیر-لامبرت (رابطه 3)، ضریب تضعیف خطی نمونه‌ها از رابطه (5) محاسبه شد که در آن x ضخامت (ارتفاع) ژل است. برای محاسبه خطای نسبی ضریب عبور و ضریب تضعیف خطی از روش استاندارد انتشار خطا روابط (2) و (6) استفاده شد.

ضریب عبور معیاری استاندارد برای سنجش مقدار شدت یک پرتو پس از عبور از ضخامت مشخصی از ماده است.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

برای محاسبه خطای نسبی ضریب عبور، از روش استاندارد انتشار خطا استفاده می‌شود.

$$\frac{\sigma_T}{T} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_0}}{I_0}\right)^2} \quad (2)$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

ضریب عبور به صورت نمایی وابسته به ضریب تضعیف خطی و ضخامت نمونه است.

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad (4)$$

$$\mu = -\frac{\ln(T)}{x} \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_\mu}{\mu} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\ln T}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2} \quad (6)$$

ضریب تضعیف جرمی از تقسیم ضریب تضعیف خطی بر چگالی نمونه به دست می‌آید که رابطه (7) نمایانگر این موضوع است و از رابطه (8) خطای آن به دست می‌آید.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_{\mu_m}}{\mu_m} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_\mu}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\rho}{\rho}\right)^2} \quad (8)$$

می‌دانیم ضریب تضعیف خطی کل و ضریب خطی جذب انرژی مطابق روابط (9) و (10) است.

$$\mu_l = \tau + \sigma_c + \kappa \quad (9)$$

جدول ۵- مقادیر تجربی ضرایب عبور و ضریب جذب به همراه درصد خطا در حضور چشمه‌های آمرسیوم-۲۴۱ و سزیم-۱۳۷

چشمه سزیم-۱۳۷		چشمه آمرسیوم-۲۴۱		نمونه
ضریب جذب با بیشینه خطای	ضریب عبور با بیشینه خطای	ضریب جذب با بیشینه خطای	ضریب عبور با بیشینه خطای	
۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	
۰/۱۰۹	۰/۸۹۱	۰/۱۰۵	۰/۸۹۵	N0
۰/۱۲۳	۰/۸۷۷	۰/۱۰۱	۰/۸۹۹	N1
۰/۱۵۱	۰/۸۴۹	۰/۱۴۸	۰/۸۵۲	N2
۰/۱۰۴	۰/۸۹۶	۰/۰۹۸	۰/۹۰۲	N3
۰/۱۳۴	۰/۸۶۶	۰/۱۵۲	۰/۸۴۸	N4
۰/۱۱۹	۰/۸۸۱	۰/۱۴۲	۰/۸۵۸	N5
۰/۱۲۷	۰/۸۷۳	۰/۱۴۷	۰/۸۵۳	N6
۰/۱۲۶	۰/۸۷۴	۰/۱۴۷	۰/۸۵۳	N7
۰/۱۷۶	۰/۸۲۴	۰/۱۶۵	۰/۸۳۵	N8
۰/۱۲۵	۰/۸۷۵	۰/۱۷۵	۰/۸۲۵	N9
۰/۱۳۷	۰/۸۶۳	۰/۱۸۱	۰/۸۱۹	N10
۰/۱۴۰	۰/۸۵۹	۰/۱۹۰	۰/۸۱۰	N11
۰/۱۴۱	۰/۸۵۹	۰/۱۶۱	۰/۸۳۳	N12
۰/۱۳۴	۰/۸۶۶	۰/۱۷۲	۰/۸۲۷	N13

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، اثر غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره در ژل دزیتری MAGIC-f مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی برای دو چشمه گامای آمرسیوم-۲۴۱ و سزیم-۱۳۷ تحلیل و با محاسبات تئوری نرم‌افزار XCOM مقایسه شد. آهنگ شمارش خالص برای هر نمونه به‌دقت ثبت شد.

۳-۱- اندازه‌گیری و محاسبه ضرایب عبور و جذب

در این بخش، ضرایب عبور و ضریب جذب نمونه‌های ژل MAGIC-f حاوی غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره برای دو چشمه گاما آمرسیوم-۲۴۱ و سزیم-۱۳۷ گزارش شده است. بررسی داده‌های جدول (۵) نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات نقره در ژل، مقدار ضریب عبور به‌طور پیوسته کاهش یافته و در مقابل، ضریب جذب نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این روند به‌خصوص برای چشمه آمرسیوم-۲۴۱ که

$$D \left(\frac{\text{MeV}}{\text{g}} \right) = \frac{E_a \left(\frac{\text{MeV}}{\text{cm}^3} \right)}{\rho \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)} \quad (16)$$

دز جذبی به کمک رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود که در آن E_a انرژی جذب شده و ρ چگالی نمونه است. همچنین برای مقایسه داده‌های تجربی و تئوری، لازم است پارامترهای به‌دست‌آمده از داده‌های تجربی با داده‌های XCOM مقایسه شود، داده‌های تئوری از پایگاه داده‌های XCOM استخراج شد. ابتدا در سایت فرمول شیمیایی هر ماده (جدول ۳) همراه با درصد وزنی آن‌ها را یادداشت نموده و برای انرژی پرتوهای گامای چشمه‌های آمرسیوم-۲۴۱ (۵۹ keV) و سزیم-۱۳۷ (۶۶۲ keV) ضرایب تضعیف استخراج شد و پس‌از آن ضرایب عبور، جذب، تضعیف خطی، جذب انرژی، دز جذبی به کمک روابط (۱) تا (۱۶) به‌دست می‌آید (۲۵).

جدول ۶- مقادیر تئوری ضرایب عبور و ضریب جذب در حضور چشمه‌های آمرسیوم-۲۴۱ و سزیم-۱۳۷

نمونه	چشمه آمرسیوم-۲۴۱		چشمه سزیم-۱۳۷	
	ضریب عبور	ضریب جذب	ضریب عبور	ضریب جذب
N0	۰/۷۴۵	۰/۲۵۵	۰/۸۸۴	۰/۱۱۵
N1	۰/۷۴۳	۰/۲۵۷	۰/۸۸۶	۰/۱۱۳
N2	۰/۷۳۱	۰/۲۶۹	۰/۸۸۴	۰/۱۱۶
N3	۰/۷۳۸	۰/۲۶۲	۰/۸۹	۰/۱۰۹
N4	۰/۷۲۷	۰/۲۷۳	۰/۸۸۸	۰/۱۱۲
N5	۰/۷۱۶	۰/۲۸۴	۰/۸۸۵	۰/۱۱۴
N6	۰/۷۰۹	۰/۲۹۱	۰/۸۸۴	۰/۰۸۵
N7	۰/۷۰۴	۰/۲۹۶	۰/۸۸۶	۰/۱۱۴
N8	۰/۶۹۸	۰/۳۰۲	۰/۸۸۵	۰/۱۱۴
N9	۰/۶۹۵	۰/۳۰۵	۰/۸۸۶	۰/۱۱۴
N10	۰/۶۸۸	۰/۳۱۲	۰/۸۸۴	۰/۱۱۶
N11	۰/۶۸۴	۰/۳۱۶	۰/۸۸۵	۰/۱۱۴
N12	۰/۶۷۰	۰/۳۳۰	۰/۸۸۲	۰/۱۱۸
N13	۰/۶۷۱	۰/۳۲۹	۰/۸۸۴	۰/۱۱۶

انرژی فوتون‌های آن پایین‌تر است، شدت بیش‌تری دارد. در نمونه ژل خالص (N0) که فاقد نانوذرات نقره است، بیش‌ترین مقدار عبور و کم‌ترین جذب مشاهده می‌شود. با افزودن تدریجی نانوذرات از N1 تا N13، تغییرات ضریب عبور و جذب رفتار یکنواختی را نشان می‌دهد و رابطه معکوس مشخصی میان این دو پارامتر قابل مشاهده است. کاهش عبور و افزایش جذب در همه نمونه‌ها برای چشمه آمرسیوم-۲۴۱ بیش‌تر از سزیم-۱۳۷ است که این موضوع بر اثر وابستگی عدد اتمی برای رخداد برهم‌کنش فوتوالکتریک است. مقادیر بسیار پایین خطای مطلق، گویای دقت و قابلیت اطمینان بالای اندازه‌گیری‌ها است.

مطابق جدول (۶)، برای داده‌های تئوری نیز با افزایش درصد وزنی نانوذرات نقره در ژل، ضریب عبور فوتون‌ها در هر دو چشمه کاهش یافته و به‌صورت هم‌زمان ضریب جذب افزایش پیدا می‌کند. مقایسه داده‌های تجربی با مقادیر تئوری استخراج‌شده از XCOM نشان می‌دهد که هر دو مجموعه داده از یک روند کلی تبعیت می‌کنند، با این تفاوت که برای چشمه آمرسیوم-۲۴۱،

تغییرات در داده‌های تجربی با شیب بیش‌تری نسبت به داده‌های XCOM رخ می‌دهد؛ اما در حضور چشمه سزیم-۱۳۷ که پراکندگی کامپتون غالب است تفاوت میان داده‌های تجربی و تئوری اندک است. به‌طورکلی، هر دو مجموعه داده‌ها نشان می‌دهند که نانوذرات نقره بیش‌ترین اثر را در فوتون‌های کم انرژی دارد، اما اثر تجربی کمی قوی‌تر از پیش‌بینی مدل تئوری است؛ زیرا در شرایط تجربی نمونه، پخش نانوذرات، چگالی ژل، ناهمگنی‌ها، عوامل مربوط به خطاهای تجربی (اعم از هندسی، نویزهای الکتریکی) و همچنین در نظر نگرفتن اندازه ذرات نقره در پایگاه داده‌های XCOM باعث می‌شود داده‌های تجربی بیش‌تر از مقادیر ایده‌آل XCOM نشان دهند.

۳-۲- اندازه‌گیری و محاسبه ضرایب تضعیف خطی و جرمی ضرایب تضعیف خطی و جرمی نمونه‌های ژل MAGIC-f حاوی غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره به‌صورت تجربی و تئوری محاسبه شد و نتایج آن‌ها در جدول‌های (۷) و (۸) ارائه

جدول ۷- مقادیر تجربی ضرایب تضعیف خطی (cm^{-1}) و جرمی (cm^2/g) به همراه درصد خطا در حضور چشمه‌های آمرسیوم-۲۴۱ و سزیم-۱۳۷

نمونه	چشمه آمرسیوم-۲۴۱		چشمه سزیم-۱۳۷	
	ضریب تضعیف خطی با خطای مطلق $\pm 0.004\%$	ضریب تضعیف جرمی با خطای مطلق $\pm 0.005\%$	ضریب تضعیف خطی با خطای مطلق $\pm 0.01\%$	ضریب تضعیف جرمی با خطای مطلق $\pm 0.01\%$
N0	0/165	0/167	0/171	0/174
N1	0/159	0/164	0/195	0/201
N2	0/238	0/24	0/244	0/246
N3	0/153	0/164	0/164	0/176
N4	0/245	0/256	0/214	0/224
N5	0/227	0/232	0/189	0/193
N6	0/236	0/238	0/202	0/204
N7	0/236	0/242	0/200	0/205
N8	0/269	0/274	0/288	0/294
N9	0/286	0/293	0/198	0/203
N10	0/297	0/300	0/219	0/221
N11	0/314	0/321	0/226	0/231
N12	0/262	0/247	0/226	0/223
N13	0/282	0/285	0/214	0/216

جدول ۸- مقادیر تئوری ضرایب تضعیف خطی (cm^{-1}) و جرمی (cm^2/g) در حضور چشمه‌های آمرسیوم-۲۴۱ و سزیم-۱۳۷

نمونه	چشمه آمرسیوم-۲۴۱		چشمه سزیم-۱۳۷	
	ضریب تضعیف خطی	ضریب تضعیف جرمی	ضریب تضعیف خطی	ضریب تضعیف جرمی
N0	0/202	0/205	0/839	0/8512
N1	0/204	0/210	0/825	0/8511
N2	0/215	0/216	0/846	0/8510
N3	0/208	0/222	0/796	0/8509
N4	0/218	0/228	0/815	0/8508
N5	0/229	0/234	0/834	0/8507
N6	0/236	0/238	0/844	0/8507
N7	0/240	0/246	0/832	0/8506
N8	0/247	0/251	0/834	0/8505
N9	0/249	0/256	0/830	0/8504
N10	0/257	0/259	0/843	0/8504
N11	0/260	0/266	0/833	0/8503
N12	0/275	0/271	0/862	0/8502
N13	0/274	0/276	0/843	0/8501

پراکندگی را بدانیم؛ لذا به کمک جدول (۹) می‌توان پی برد برای محاسبه ضریب جذب خطی انرژی از کدام رابطه استفاده نمود.

با توجه به داده‌های جدول (۹)، اگرچه با افزایش غلظت نانوذرات نقره احتمال رخداد پدیده فوتوالکتریک بیش‌تر می‌شود، ولی برهم‌کنش پراکندگی کامپتون بر فوتوالکتریک غالب است لذا برای محاسبه ضریب جذب خطی انرژی از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود.

جدول‌های (۱۰) و (۱۱)، نشان می‌دهند که افزودن نانوذرات نقره نه‌تنها بر میزان تضعیف، بلکه بر انرژی به‌جا گذاشته‌شده در ژل و در نتیجه دز جذبی، اثر مستقیم دارد. در چشمه آمرسیوم-۲۴۱، افزایش غلظت نانوذرات موجب افزایش انرژی جذب‌شده در واحد جرم ژل می‌شود؛ به‌گونه‌ای که نمونه‌های با غلظت بالاتر، انرژی بیش‌تری نسبت به نمونه خالص نشان می‌دهند. این رفتار بیانگر آن است که حضور نانوذرات نقره نقش موثری در جذب فوتون‌های کم‌انرژی دارند. در این انرژی، علاوه بر اندرکنش کامپتون فوتون‌ها تمایل به برهم‌کنش از طریق اثر فوتوالکتریک را هم دارند. احتمال این اثر با عدد اتمی (Z) ماده با توان چهار وابسته است. برای چشمه سزیم-۱۳۷ نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود، هرچند به دلیل انرژی بالاتر فوتون‌ها برهم‌کنش غالب پراکندگی کامپتون است. این اثر بیش‌تر به چگالی الکترونی ماده وابسته است و حساسیت کم‌تری به عدد اتمی خالص دارد. در نتیجه، انتظار داریم تغییرات مقادیر جذب خطی انرژی بین نمونه‌های مختلف، کم‌تر از حالت آمرسیوم باشد.

نتایج تئوری این الگو را تأیید می‌کنند و افزایش پیوسته ضریب خطی جذب انرژی با افزایش نانوذرات را پیش‌بینی می‌کنند. اختلاف میان داده‌های تجربی و تئوری می‌تواند ناشی از ریزساختار واقعی ژل، توزیع غیریکنواخت و کلوخه‌ای شدن نانوذرات نقره و اثرات هندسی آزمایش باشد. وقتی غلظت نانوذرات نقره افزایش یابد، نیروهای بین‌ذره‌ای (مثل نیروهای واندروالسی) باعث می‌شوند که ذرات به هم نزدیک شوند و

شده است. داده‌های تجربی و تئوری ضریب تضعیف خطی و جرمی نمونه‌های ژل با نانوذرات نقره نشان می‌دهد که اثر حضور نانوذرات بر جذب پرتوهای گاما کاملاً وابسته به انرژی فوتون‌ها است. برای چشمه آمرسیوم-۲۴۱، ضریب تضعیف خطی و جرمی نمونه‌ها در هر دو مجموعه داده، به‌طورکلی با افزایش غلظت نانوذرات روند افزایشی دارد. داده‌های تجربی در مقایسه با مقادیر تئوری پراکندگی جزئی دارند. در مقابل، برای چشمه سزیم-۱۳۷ با انرژی بالای ۶۶۲ keV، ضریب تضعیف خطی نمونه‌ها تنها تغییرات اندکی دارد که عمدتاً ناشی از تفاوت‌های چگالی نمونه‌ها است و ضریب تضعیف جرمی تقریباً ثابت باقی می‌ماند که نشان می‌دهد اثر نانوذرات (اثر عدد اتمی) بر فوتون‌های پرانرژی کم‌تر است و پراکندگی داده‌های تجربی نسبت به تئوری بیش‌تر است. در این انرژی، از بین برهم‌کنش‌های فوتون با ماده، پراکندگی کامپتون غالب است؛ لذا مقدار ضریب تضعیف جرمی کل در این انرژی عمدتاً از ضریب تضعیف پراکندگی کامپتون تعیین می‌شود که این پارامتر به‌صورت تابعی از انرژی فوتون است به عدد اتمی وابستگی شدیدی ندارد و تقریباً مستقل از ماهیت ماده است که به این معنا است که ضریب تضعیف پراکندگی کامپتون به تعداد الکترون‌های موجود در ماده وابسته است. مقایسه این دو چشمه بیانگر این است که هرچه انرژی فوتون پایین‌تر باشد، تأثیر نانوذرات نقره بر افزایش ضریب تضعیف بارزتر است؛ زیرا سطح مقطع فوتوالکتریک به‌صورت $aNZ^4/E^3[1-e(Z)]$ تغییر می‌کند که در آن E انرژی فوتون و $3 < n, m < 5$ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وابستگی شدیدی به عدد اتمی به‌صورت مستقیم و به انرژی به‌صورت عکس دارد؛ بنابراین در انرژی‌های پایین فوتون، برهم‌کنش فوتوالکتریک غالب است و سهم برهم‌کنش‌های دیگر کم است و مقدار عمده ضریب تضعیف کل را ضریب تضعیف فوتوالکتریک تشکیل می‌دهد.

۳-۳- اندازه‌گیری و محاسبه ضرایب جذب انرژی، انرژی به‌جا گذاشته و دز جذبی

با توجه به روابط (۱۲) تا (۱۴)، لازم است احتمالات رخداد هر

جدول ۹- مقادیر ضرایب تضعیف خطی (cm^{-1}) هر پدیده و احتمال رخداد هر یک برای نمونه‌ها در حضور پرتوهای گامای چشمه آمرسیوم-۲۴۱ با انرژی ۵۹ keV و چشمه سزیم-۱۳۷ با انرژی ۶۶۲ keV

در حضور پرتوهای گامای چشمه آمرسیوم-۲۴۱ با انرژی ۵۹ keV					
نمونه	ضریب تضعیف خطی کامپتون	ضریب تضعیف خطی فوتوالکتریک	ضریب تضعیف خطی کل	احتمال رخداد پراکندگی کامپتون	احتمال رخداد فوتوالکتریک
N0	۰/۱۷۶۲	۰/۰۱۴۸	۰/۱۹۱	۰/۹۲۲	۰/۰۷۸
N1	۰/۱۷۶۱	۰/۰۲۰۲	۰/۱۹۶	۰/۸۹۷	۰/۱۰۳
N2	۰/۱۷۶۰	۰/۰۲۶۰	۰/۲۰۲	۰/۸۷۱	۰/۱۲۹
N3	۰/۱۷۶۰	۰/۰۳۱۹	۰/۲۰۸	۰/۸۴۷	۰/۱۵۳
N4	۰/۱۷۵۹	۰/۰۳۷۵	۰/۲۱۳	۰/۸۲۴	۰/۱۷۶
N5	۰/۱۷۵۹	۰/۰۴۳۲	۰/۲۱۹	۰/۸۰۳	۰/۱۹۷
N6	۰/۱۷۵۸	۰/۰۴۷۱	۰/۲۲۳	۰/۷۸۹	۰/۲۱۱
N7	۰/۱۷۵۸	۰/۰۵۴۶	۰/۲۳۰	۰/۷۶۳	۰/۲۳۷
N8	۰/۱۷۵۷	۰/۰۶۰۰	۰/۲۳۶	۰/۷۴۵	۰/۲۵۵
N9	۰/۱۷۵۷	۰/۰۶۴۲	۰/۲۴۰	۰/۷۳۲	۰/۲۶۸
N10	۰/۱۷۵۶	۰/۰۶۷۵	۰/۲۴۳	۰/۷۲۲	۰/۲۷۸
N11	۰/۱۷۵۶	۰/۰۷۳۸	۰/۲۴۹	۰/۷۰۴	۰/۲۹۶
N12	۰/۱۷۵۵	۰/۰۷۸۹	۰/۲۵۴	۰/۶۹۰	۰/۳۱۰
N13	۰/۱۷۵۴	۰/۰۸۴۱	۰/۲۵۹	۰/۶۷۶	۰/۳۲۴

در حضور پرتوهای گامای چشمه سزیم-۱۳۷ با انرژی ۶۶۲ keV					
نمونه	ضریب تضعیف خطی کامپتون	ضریب تضعیف خطی فوتوالکتریک	ضریب تضعیف خطی کل	احتمال رخداد پراکندگی کامپتون	احتمال رخداد فوتوالکتریک
N0	۰/۰۸۴۹۹	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۸۵	۰/۹۹۹۹۰	۰/۰۰۰۱۰
N1	۰/۰۸۴۹۷	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۸۴۹۹	۰/۹۹۹۸۲	۰/۰۰۰۱۸
N2	۰/۰۸۴۹۵	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۸۴۹۷	۰/۹۹۹۷۴	۰/۰۰۰۲۶
N3	۰/۰۸۴۹۳	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۸۴۹۶	۰/۹۹۹۶۶	۰/۰۰۰۳۴
N4	۰/۰۸۴۹۱	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۸۴۹۵	۰/۹۹۹۵۸	۰/۰۰۰۴۲
N5	۰/۰۸۴۸۹	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۸۴۹۳	۰/۹۹۹۴۹	۰/۰۰۰۵۱
N6	۰/۰۸۴۸۸	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۸۴۹۳	۰/۹۹۹۴۴	۰/۰۰۰۵۶
N7	۰/۰۸۴۸۶	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۸۴۹۲	۰/۹۹۹۳۳	۰/۰۰۰۶۷
N8	۰/۰۸۴۸۴	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۸۴۹۰	۰/۹۹۹۲۵	۰/۰۰۰۷۵
N9	۰/۰۸۴۸۳	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۸۴۹۰	۰/۹۹۹۱۹	۰/۰۰۰۸۱
N10	۰/۰۸۴۸۲	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۸۴۸۹	۰/۹۹۹۱۵	۰/۰۰۰۸۵
N11	۰/۰۸۴۸۰	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۸۴۸۸	۰/۹۹۹۰۶	۰/۰۰۰۹۴
N12	۰/۰۸۴۷۸	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۸۴۸۷	۰/۹۹۸۹۸	۰/۰۰۱۰۲
N13	۰/۰۸۴۷۶	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۸۴۸۵	۰/۹۹۸۹۱	۰/۰۰۱۰۹

جدول ۱۰- مقادیر تجربی ضریب جذب خطی انرژی ($\mu_a(\text{cm}^{-1})$)، انرژی به جا گذاشته شده در ماده ($E_a(\text{MeV}/\text{cm}^3)$) و دز جذبی ($D(\text{MeV}/\text{g})$) در حضور چشمه‌های آمرسیوم-۲۴۱ و سزیم-۱۳۷ برای شار فوتونی واحد

نمونه	چشمه آمرسیوم-۲۴۱			چشمه سزیم-۱۳۷		
	($\mu_a \times 10^{-2}$)	($E_a \times 10^{-2}$)	($D \times 10^{-2}$)	($\mu_a \times 10^{-2}$)	($E_a \times 10^{-2}$)	($D \times 10^{-2}$)
N0	۱/۵۲۴	۰/۰۹۰	۰/۰۹۱	۶/۵۳۴	۴/۳۲۵	۴/۳۸۷
N1	۱/۴۷۲	۰/۰۸۷	۰/۰۹۰	۷/۴۴۲	۴/۹۲۶	۵/۰۸۲
N2	۲/۲۰۰	۰/۱۳۰	۰/۱۳۱	۹/۳۱۸	۶/۱۶۸	۶/۲۰۵
N3	۱/۴۱۶	۰/۰۸۴	۰/۰۸۹	۶/۲۶۵	۴/۱۴۷	۴/۴۳۱
N4	۲/۲۶۵	۰/۱۳۴	۰/۱۳۹	۸/۱۷۶	۵/۴۱۳	۵/۶۴۹
N5	۲/۱۰۰	۰/۱۲۴	۰/۱۲۶	۷/۲۲۸	۴/۷۸۵	۴/۸۸۱
N6	۲/۱۸۴	۰/۱۲۹	۰/۱۳۰	۷/۷۹۸	۵/۰۹۶	۵/۱۳۸
N7	۲/۱۸۴	۰/۱۲۹	۰/۱۳۲	۷/۶۵۹	۵/۰۷۰	۵/۱۸۴
N8	۲/۴۸۵	۰/۱۴۷	۰/۱۴۹	۱۰/۹۸۸	۷/۲۷۴	۷/۴۱۶
N9	۲/۶۴۲	۰/۱۵۶	۰/۱۶۰	۷/۵۷۰	۵/۰۱۲	۵/۱۳۴
N10	۲/۷۴۵	۰/۱۶۲	۰/۱۶۳	۸/۳۷۲	۵/۵۴۲	۵/۵۸۹
N11	۲/۹۰۱	۰/۱۷۱	۰/۱۷۵	۸/۶۳۱	۵/۷۱۳	۵/۸۳۴
N12	۲/۴۲۸	۰/۱۴۳	۰/۱۴۱	۸/۶۳۱	۵/۷۱۳	۵/۶۳۶
N13	۲/۶۰۸	۰/۱۵۴	۰/۱۵۵	۸/۱۸۳	۵/۱۴۷	۵/۴۶۱

جدول ۱۱- مقادیر تئوری ضریب جذب خطی انرژی ($\mu_a(\text{cm}^{-1})$)، انرژی به جا گذاشته شده در ماده ($E_a(\text{MeV}/\text{cm}^3)$) و دز جذبی ($D(\text{MeV}/\text{g})$) در حضور چشمه‌های آمرسیوم-۲۴۱ و سزیم-۱۳۷ برای شار فوتونی واحد

نمونه	چشمه آمرسیوم-۲۴۱			چشمه سزیم-۱۳۷		
	($\mu_a \times 10^{-2}$)	($E_a \times 10^{-2}$)	($D \times 10^{-2}$)	($\mu_a \times 10^{-2}$)	($E_a \times 10^{-2}$)	($D \times 10^{-2}$)
N0	۱/۸۶۶	۰/۱۱۰	۰/۱۱۲	۳/۲۰۱	۲/۱۱۹	۲/۱۴۹
N1	۱/۹۴۴	۰/۱۱۵	۰/۱۱۸	۳/۲۴۶	۲/۱۴۹	۲/۲۱۷
N2	۱/۹۸۷	۰/۱۱۷	۰/۱۱۸	۳/۲۲۶	۲/۱۳۶	۲/۱۴۸
N3	۱/۹۲۳	۰/۱۱۳	۰/۱۲۱	۳/۰۳۷	۲/۰۱۱	۲/۱۴۸
N4	۲/۰۲۰	۰/۱۱۹	۰/۱۲۴	۳/۱۰۹	۲/۰۵۸	۲/۱۴۸
N5	۲/۱۲۰	۰/۱۲۵	۰/۱۲۸	۳/۱۸۰	۲/۱۰۵	۲/۱۴۷
N6	۲/۱۸۰	۰/۱۲۹	۰/۱۳۰	۳/۲۱۸	۲/۱۳۰	۲/۱۴۷
N7	۲/۲۲۰	۰/۱۳۱	۰/۱۳۴	۳/۱۷۳	۲/۱۰۰	۲/۱۴۷
N8	۲/۲۷۸	۰/۱۳۴	۰/۱۳۷	۳/۱۸۱	۲/۱۰۶	۲/۱۴۷
N9	۲/۳۰۵	۰/۱۳۶	۰/۱۳۹	۳/۱۶۶	۲/۰۹۶	۲/۱۴۷
N10	۲/۳۷۳	۰/۱۴۰	۰/۱۴۱	۳/۲۱۶	۰/۱۲۹	۰/۱۴۷
N11	۲/۴۰۲	۰/۱۴۲	۰/۱۴۵	۳/۱۷۶	۲/۱۰۲	۲/۱۴۶
N12	۲/۵۳۵	۰/۱۴۹	۰/۱۴۸	۳/۲۰۱	۲/۱۷۶	۲/۱۴۶
N13	۲/۵۲۹	۰/۱۴۹	۰/۱۵۰	۳/۲۴۶	۲/۱۲۹	۲/۱۴۶

شدید فوتوالکترونیک به عدد اتمی بالا ($Z = 47$ برای نقره) کاملاً سازگار است.

در مقابل، رفتار ژل در برابر پرتوهای پرنانرژی سزیم- 137 کاملاً متفاوت بود. داده‌های تجربی نشان داد که افزایش غلظت نانوذرات نقره در این انرژی، موجب تغییر قابل توجهی در پارامترهای مورد بررسی نمی‌شود و ضرایب تضعیف جرمی در محدوده $0/142 \text{ cm}^2/\text{g}$ تا $0/151 \text{ cm}^2/\text{g}$ باقی می‌مانند، به طوری که اختلافات حداکثر در حدود 6% بوده و در محدوده خطای سیستم اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. این موضوع به خوبی بازتاب‌دهنده ماهیت برهم‌کنش کامپتون (به عنوان سازوکار غالب در انرژی‌های متوسط) است که وابستگی بسیار کمتری به عدد اتمی (Z) دارد. تنها نمونه N8 (با کسر وزنی $0/08$ درصد)، اندکی افزایش نشان داد که به نظر می‌رسد به یکنواختی توزیع نانوذرات و عوامل میکروسکوپی موضعی مرتبط باشد. همان‌طور که در این تحقیق مشاهده شد، حضور نانوذرات نقره در ژل پلیمر سبب افزایش برهم‌کنش پرتو با ماده شد. این افزایش در پرتودرمانی به این معنا است که تزریق نانوذرات نقره به بافت سرطانی سبب تخریب بیشتر بافت سرطانی می‌شود لذا نانوذرات نقره یک گزینه مناسب در پرتودرمانی است. شایان ذکر است با اشاره به اهمیت نتیجه حاصل شده آزمودن این ژل‌های بهینه‌شده در شرایط شبیه‌سازی شده بالینی یا فانتوم‌های بافتی می‌تواند مسیر استفاده عملی آن‌ها را در پرتودرمانی و حفاظت پرتویی هموار سازد.

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از موسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

تجمع کنند و به عبارتی کلوخه‌ای شوند. این تجمع‌ها برهم‌کنش پرتو با مواد را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهند؛ زیرا وقتی نانوذرات نقره مجزا هستند و کلوخه نشدند، هرکدام به طور مستقل با پرتو برهم‌کنش می‌کنند؛ اما وقتی تجمع می‌کنند و کلوخه‌ای می‌شوند، سطح مقطع مؤثر تغییر می‌کند و احتمال رخداد برهم‌کنش‌ها تغییر می‌کنند.

لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده برای هر پارامتر، ترکیبی از اثرات ناشی از نانوذرات نقره و ژل پلیمر است و صرفاً به اثر نانوذرات نقره محدود نمی‌شود.

۴- نتیجه گیری

این پژوهش به طور جامع به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات نقره در ژل پلیمری MAGIC-f با حضور پرتوهای گامای آمرسیوم- 241 و سزیم- 137 روی دز جذبی پرداخت. تحلیل داده‌های تجربی و محاسبات تئوری مبتنی بر پایگاه داده‌های XCOM نشان داد که حضور نانوذرات نقره می‌تواند میزان جذب انرژی و دز جذبی ژل را به صورت وابسته به انرژی پرتو و غلظت نانوذرات افزایش دهد. این هم‌خوانی میان نتایج تجربی و تئوری، اعتبار یافته‌ها و سازگاری فیزیکی رفتار نمونه‌ها با سازوکارهای شناخته شده برهم‌کنش پرتوهای گاما با ماده را تأیید می‌کند.

برای چشمه کم‌انرژی آمرسیوم- 241 ، نتایج تجربی نشان داد این افزایش تا رسیدن به یک غلظت بهینه ادامه دارد. نمونه N11 با کسر وزنی حدود $0/104\%$ نانوذرات نقره، نقطه اوج عملکرد بود و بیش‌ترین میزان ضریب تضعیف جرمی را با مقدار $0/321 \text{ cm}^2/\text{g}$ ثبت کرد که نسبت به نمونه پایه N0 با مقدار $0/167 \text{ cm}^2/\text{g}$ افزایشی حدود 92% دارد. همچنین، ضریب خطی جذب انرژی و دز جذبی این نمونه، به ترتیب به $10^{-2} \times 2/901$ و $10^{-2} \times 0/175$ رسید که هر دو نسبت به ژل خالص، افزایشی قابل توجه در حدود $1/9$ برابر نشان دادند. کاهش نسبی پاسخ در نمونه‌های N12 و N13 احتمالاً ناشی از پدیده‌هایی مانند کلوخه شدن، تجمع ناهمگن و یا کاهش پایداری نانوذرات در شبکه پلیمری است. این روند در انرژی‌های پایین با وابستگی

سهم نویسندگان

ایده‌پردازی مطالعه، نظارت بر اندازه‌گیری داده‌های تجربی، تحلیل و تفسیر داده‌های تجربی، اعتبارسنجی نتایج، راهنمایی پروژه، بازنگری و ویرایش.

مژده نباتی: ساختن نمونه‌های تجربی، اندازه‌گیری داده‌های تجربی، نگارش پیش‌نویس مقاله، طراحی شکل‌ها و جدول‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها. حسین توکلی عنبران: طراحی و

واژه‌نامه

1. received dose as low as reasonably achievable (ALARA)
2. sodium iodide doped with thallium (NaI(Tl))
3. Hypoxic
4. magnetic resonance imaging (MRI)
5. methacrylic and ascorbic acid in gelatin initiated by copper added formaldehyde (MAGIC-f)
6. methacrylic and ascorbic acid in gelatin initiated by copper (MAGIC)
7. dose enhancement factor (DEF)
8. silver nanoparticles (AgNPs)
9. carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur (CHNS) analysis
10. energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
11. scanning electron microscope (SEM)
12. multichannel analyzer (MCA)
13. noise
14. position
15. area
16. full width at half maximum (FWHM)

مراجع

1. Tavakoli-Anbaran H, Mahmoodi A. Increased absorption dose with the presence of gold nanoparticles in a normoxic polymer gel: method Monte Carlo. Iran J Med Phys. 2018;15 (Special Issue-12th Iranian Congress of Medical Physics):86-86 (In Persian). <https://doi.org/10.22038/ijmp.2018.12364>
2. Tavakoli-Anbaran H, Ahmadi O. Study of dose distribution 103Pd source brachytherapy in treatment of cancer adjacent to fat and muscle tissues by the Monte Carlo method using MCNP4C code. J Shahid Sadoughi Univ Med Sci. 2016;24(8):618-29. <http://jssu.ssu.ac.ir/article-1-3702-en.html>
3. Rahmani F, Seifi S, Tavakoli-Anbaran H, Ghasemi F. Design of photon converter and photoneutron target for high-power electron accelerator based BNCT. Appl Radiat Isot. 2015;106:45-48. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.08.008>
4. Fouldiak J. Industrial applications of radioisotopes. 1st ed. Rahmani F, Khalafi H, translators. Tehran: Nuclear Science and Technology Research Institute; 2011 (In Persian).
5. Soulfanidis N. Measurement and detection of radiation. 1st ed. Koohi R, Hadizadeh Yazdi M, translators. Mashhad: Ketabestan Publishing; 1992 (In Persian).
6. Knoll GF. Radiation detection and measurement. 4th ed. Kamali Asl A, Baghani H, translators. Tehran: Shahid Beheshti University; 2013 (In Persian).
7. Leo WR. Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach. 2nd rev ed. Berlin: Springer; 1994. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-57920-2>
8. Mahmoodi A, Tavakoli-Anbaran H. Absorbed dose in water and normoxic polymer gel phantoms using Monte Carlo method. In: Proceedings of the Iranian Physics Conference; 2017 Aug 27-30; Qazvin, Iran. Tehran: Iranian Physics Society; 2017 (In Persian).
9. Fricke H, Morse S. The chemical action of roentgen rays on dilute ferrosulphate solutions as a measure of dose. Am J Roentgenol Radium Ther. 1927;18:430-432.
10. Maryanski MJ, Gore JC, Kennan RP, Schulz RJ. NMR relaxation enhancement in gels polymerized and cross-linked by ionizing radiation: A new approach to 3D dosimetry by MRI. Magn Reson Imaging 1993;11(2):253-258. [https://doi.org/10.1016/0730-725X\(93\)90030-H](https://doi.org/10.1016/0730-725X(93)90030-H)
11. Fong PM, Keil DC, Does MD, Gore JC. Polymer gels for magnetic resonance imaging of radiation dose distributions at normal room atmosphere. Phys Med Biol. 2001;46(12):3105-3113. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/46/12/303>
12. Adamovic J, Maryanski MJ. A new approach to radiochromic three-dimensional dosimetry-polyurethane. J Phys Conf Ser. 2004;3(1):172. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3/1/020>
13. Banaee N, Nedaei H, Shirazi A, Zirak A, Sajadi S. A review of different types of 3D dosimeters. Razi J Med Sci. 2015;22(138):52-58 (In Persian). <http://rjms.iums.ac.ir/article-1-4086-fa.html>

14. Fernandes JP, Pastorello BF, de Araujo DB, Baffa O. Formaldehyde increases MAGIC gel dosimeter melting point and sensitivity. *Phys Med Biol.* 2008;53(4):N53-58. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/4/N04>
15. Baldock C, De Deene Y, Doran S, Ibbott G, Jirásek A, Lepage M, et al. Polymer gel dosimetry. *Phys Med Biol.* 2010;55(5):R1-R63. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/55/5/R01>
16. Marques T, Schwarcke M, Garrido C, Zucolotto V, Baffa O, Nicolucci P. Three-dimensional dosimetry with MAGIC-f gel: Validation against Monte Carlo simulations. *Med Phys.* 2010;37(9):4890-4899. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/250/1/012084>
17. Quevedo AL, Borges LF, Nicolucci P. Avaliação da resposta do gel polimérico MAGIC-f modificado utilizando uma fonte clínica de braquiterapia e simulação Monte Carlo. *Rev Bras Fis Med.* 2016;10(3):2-6. <https://doi.org/10.29384/rbfm.2016.v10.n3.p2-6>
18. Khosravi H, Hashemi B, Rahmani F, Ebrahimi A, Ebadi A. Investigation of the gold nanoparticles effects on the prostate dose distribution in brachytherapy: gel dosimetry and Monte Carlo method. *J Contemp Brachytherapy* 2016;8(5):422-428. <https://doi.org/10.5114/jcb.2016.63453>
19. Ghoreishi SF, Beik J, Shiri I, Keshavarzi KK, Mahdavi SRM. Effect of gold nanoparticles on dose enhancement of 6 MV X-ray in MAGIC-f polymer gel dosimeter. *J Biomed Phys Eng.* 2017;7(1):1-8 <https://doi.org/10.22038/ijmp.2018.12603>
20. Khosravi H, Ghazikhanlousani K, Rahimi A. Use of gold nanoparticles in MAGIC-f gels to 18 MeV photon enhancement. *Nanomed J.* 2019;6(1):67-73. <https://doi.org/10.22038/nmj.2019.06.009>
21. Vahedian Movahed A, Tavakoli-Anbaran H. Measurement of the dose buildup factor of cesium source gamma rays in polymer gel containing silver nanoparticles in different concentrations. *J Adv Mater Eng.* 2025;44(4):93-108 (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jame.44.4.1082>
22. Alexander JW. History of the medical use of silver. *Surg Infect.* 2009;10(3):289-92. <https://doi.org/10.1089/sur.2008.9941>
23. Zauer EA. Modern automatic CHNS/O/X analyzers of organic compounds. *Anal Kontrol.* 2018;22(1):6-19. <https://doi.org/10.15826/analitika.2018.22.1.001>
24. Dhakal R, Yosofvand M, Moussa H. Development and application of MAGIC-f gel in cancer research and medical imaging. *Appl Sci.* 2021;11(17):7783 <https://doi.org/10.3390/app11177783>
25. National Institute of Standards and Technology (NIST). XCOM: photon cross sections database [Internet]. Gaithersburg (MD): NIST; [cited 2025 Jan 12]. Available from: <https://www.nist.gov/pml/XCOM-photon-cross-sections-database>