



Measurement of the Dose Buildup Factor of Cesium Source Gamma Rays in Polymer Gel Containing Silver Nanoparticles in Different Concentrations

Ammar Vahedian Movahed^{*} and Hossein Tavakoli-Anbaran¹

Faculty of Physics and Nuclear Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood 36199-95161, Semnan, Iran

^{*} Corresponding author, Email: Ammar.vahedian@gmail.com

(Received: 16 September 2024; Revised: 22 February 2025; Accepted: 28 May 2025; Available online: 30 July 2025)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: Nowadays, the use of ionizing radiation for the treatment of cancerous tumors is becoming increasingly sophisticated and evolving. In this study, the effect of silver nanoparticles on the dose buildup factor in PAGAS polymer gel—as a medium for holding silver nanoparticles—was investigated to evaluate their impact on radiotherapy and to develop suitable shielding materials that are lightweight, non-toxic, and flexible.

Materials and Methods: The gamma ray source is a cesium source. Silver nanoparticles are in solution at a concentration of 1000 ppm. The dose buildup factor is measured by a NaI(TL) detector.

Results: To investigate the effect of silver nanoparticles on the dose buildup factor, silver nanoparticles from a concentration of 0 to 8 mM were used in two samples of polymer gel, one at a height of 1 cm and the other at a height of 3 cm. From a concentration of 0 to 2 mM of silver nanoparticles, the dose buildup factor has an increasing trend, reaching a maximum value of 1.092 and 1.119 in samples with a height of 1 and 3 cm, respectively, and from a concentration of 2 to 8 mM of silver nanoparticles, the dose buildup factor has a decreasing trend, reaching a minimum value of 1.010 and 1.091 in samples with a height of 1 and 3 cm, respectively.

Conclusion: The presence of silver nanoparticles in the polymer gel increases the interaction of the rays, which in cancerous tissue leads to further destruction of the cancerous tissue and in the shield causes further attenuation of the rays.

Keywords: Buildup factor, Radiotherapy, Gamma ray, Cesium source, Protection, Polymer gel, Silver nanoparticles.

How to Cite: 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. <https://doi.org/10.47176/jame.44.4.1082>

Copyright © 2025 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.



اندازه‌گیری ضریب انباشت دز پرتوهای گامای چشمه سزیم در ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره در غلظت‌های مختلف

عمار واحدیان موحد*^{ID} و حسین توکلی عنبران^{ID}

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، کد پستی: ۳۶۱۹۹-۹۵۱۶۱، سمنان، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: ammar.vahedian@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۳/۶/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۴، پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۷، انتشار: ۱۴۰۴/۵/۸)

چکیده

مقدمه و اهداف: امروزه استفاده از پرتوهای یونیزان جهت درمان تومورهای سرطانی به‌طور مداوم در حال پیچیده‌تر شدن و دگرگون شدن هستند. در این تحقیق، اثر نانوذرات نقره در کمیت ضریب انباشت دز در ژل پلیمر PAGAS، به‌عنوان یک ماده نگهدارنده نانوذرات نقره، به‌منظور بررسی تاثیر نانوذرات نقره در پرتودرمانی و ساخت حفاظ مناسب (سبک، غیرسمی و انعطاف‌پذیر)، مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها: منبع تولید پرتو گاما چشمه سزیم است. نانوذرات نقره به صورت محلول و با غلظت 1000 ppm است. ضریب انباشت دز توسط آشکارساز NaI(TL) اندازه‌گیری می‌شود.

یافته‌ها: برای بررسی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز، از نانوذرات نقره از غلظت صفر تا هشت میلی‌مولار در دو نمونه از ژل پلیمر که یکی در ارتفاع یک سانتی‌متر و دیگری در ارتفاع سه سانتی‌متر قرار دارد، استفاده شده است. از غلظت صفر تا دو میلی‌مولار نانوذرات نقره، ضریب انباشت دز روند افزایشی دارد؛ به‌طوری که در نمونه‌هایی با ارتفاع یک و سه سانتی‌متر، به ترتیب به بیشینه مقدار ۱/۰۹۲ و ۱/۱۱۹ می‌رسد و از غلظت دو تا هشت میلی‌مولار نانوذرات نقره، ضریب انباشت دز روند کاهشی دارد؛ به‌طوری که در نمونه‌هایی با ارتفاع یک و سه سانتی‌متر، به ترتیب به کمینه مقدار ۱/۰۱۰ و ۱/۰۹۱ می‌رسیم.

نتیجه‌گیری: حضور نانوذرات نقره در ژل پلیمر، باعث افزایش برهمکنش پرتوها می‌شود که این افزایش برهمکنش پرتوها، در بافت سرطانی منجر به تخریب بیشتر بافت سرطانی شده و در حفاظ باعث تضعیف بیشتر پرتوها می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: ضریب انباشت، پرتودرمانی، پرتو گاما، چشمه سزیم، حفاظ، ژل پلیمر، نانوذرات نقره.



۱- مقدمه

پروتودرمانی^۱، استفاده از پرتوهای یونیزان، از قبیل پرتو ایکس، گاما، الکترون و غیره، جهت درمان تومورها است. در پرتودرمانی روش‌های طراحی درمان به‌طور مداوم در حال پیچیده‌تر شدن و دگرگون شدن هستند. بدین‌منظور بررسی دز داده‌شده، با دقت و صحت بیشتر ضروری به‌نظر می‌رسد. ژل پلیمر، تنها دزیمتر سه-بعدی واقعی است که می‌تواند به‌طور هم‌زمان به‌عنوان فانتومی که توانایی اندازه‌گیری توزیع دز جذبی در سه بعد را دارد، مورد استفاده قرار گیرد (۶-۱). از آنجاکه ژل‌های دزیمتری عمدتاً از آب تشکیل شده‌اند، مشابه بافت بدن انسان هستند (۱۰-۷). در درمان سرطان به صورت هدفمند، از موادی دارویی که بتواند در سلول-های سرطانی بهتر نفوذ کنند برای تشخیص و درمان استفاده می‌کنند. هدف اصلی از به کارگیری نانوذرات در تومورهای خاص در پرتودرمانی، بهبود نتیجه پرتودرمانی با افزایش سمیت برای تومورها و کاهش آن برای سلول‌های سالم، می‌باشد (۱۱). در دستگاه‌های پرتودهی پزشکی که تنها بخشی از بدن فرد باید پرتودهی شود، استفاده از حفاظ‌های سربی و قالب‌های بتنی که مستحکم و غیرقابل انعطاف هستند، مشکلاتی ایجاد خواهند کرد. در نتیجه سعی می‌شود تا جاذب‌های غیرسربی انعطاف‌پذیر، به‌منظور حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز پزشکی ساخته شود. در این‌بین، کامپوزیت‌ها یکی از مناسب‌ترین و پرکاربردترین مواد برای ساخت حفاظ تابش‌های هسته‌ای گاما با خواص مکانیکی موردنظر هستند. یک ماده کامپوزیت، ترکیبی فیزیکی در مقیاس ماکروسکوپی است که از دو یا چند ماده مختلف به‌دست آمده است. در ساده‌ترین حالت، یک کامپوزیت شامل یک پایه پلیمری و یک یا چند جزء به‌عنوان پرکننده است. در حفاظ‌های کامپوزیتی، استفاده از ذرات ریزتر و در حالت ایده‌آل نانومتری، به‌عنوان پرکننده، می‌تواند موجب افزایش استحکام مکانیکی، افزایش ضریب تضعیف، افزایش مقاومت در فرآیند پرتوگیری، افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش وزن و حجم گردد (۱۲). دزیمتهای ژل پلیمری، از مکانیسم پلیمریزاسیون مونومرها در اثر تابش استفاده می‌کنند. مقدار پلیمر تولیدشده توسط تابش،

متناسب با دز جذب‌شده است. برای حفظ اطلاعات مکانی دز جذب‌شده، ساختارهای پلیمری با استفاده از یک ماتریس ژل در جای خود ثابت می‌شوند. تغییرات به‌وجودآمده در ژل پلیمر، با استفاده از روش‌های مختلف تصویربرداری مانند تصویربرداری تشدید مغناطیسی^۲، توموگرافی نوری^۳، طیف‌سنجی رامان^۴، سونوگرافی^۵، توموگرافی رایانه‌ای با اشعه ایکس^۶، اندازه‌گیری می‌شوند (۱۵ و ۱۴). روش‌های معرفی‌شده را می‌توان در مطالعات متعدد مشاهده نمود (۲۱-۱۵). به‌عنوان مثال، آدلین و همکاران (۲۲)، اثر نانوذرات طلا را در ژل پلیمر nPAG و VIPET و محمودی و همکاران (۲۳)، اثر نانوذرات طلا را در ژل پلیمر MAGIC، موردبررسی قرار داده‌اند. از نانوذرات طلا می‌توان در پرتودرمانی برای درمان سرطان و در ساخت حفاظ مناسب استفاده کرد. با توجه به این‌که نانوذرات نقره یک ماده غیرسمی است و همچنین عدد اتمی بالایی دارد و نسبت به نانوذرات طلا ارزان‌تر است، اگر در پرتودرمانی به جای نانوذرات طلا از نانوذرات نقره استفاده شود، موجب کاهش هزینه‌های پرتودرمانی می‌شود. با توجه به این‌که قبل از پرتودرمانی برای بهبود دقت و کیفیت پرتو درمانی لازم است که با یک نمونه معادل بافت بدن انسان میزان ضریب انباشت دز مورد ارزیابی قرار گیرد، لذا می‌توان از ژل پلیمر به عنوان یک گزینه مناسب در این زمینه استفاده کرد. از طرفی روش اندازه‌گیری ضریب انباشت دز در این تحقیق نسبت به روش‌هایی همانند MRI یا قرص‌های دزسنج گرمایی^۷ آسان‌تر و ارزان‌تر است. روش اندازه‌گیری ضریب انباشت دز در این مقاله، یک گزینه مناسب برای بهبود دقت و کیفیت در پرتودرمانی است. ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره، یک نانوکامپوزیت است که ژل پلیمر نقش ماتریس و نانوذرات نقره نقش تقویت‌کننده را دارد.

برهمکنش فوتون‌ها با محیط جاذب، طیف انرژی آن‌ها را به دو جزء اصلی تقسیم می‌کند: برخورد نشده و برخورد شده. مولفه برخورد نشده، متشکل از فوتون‌هایی است که هیچ برهمکنشی با محیط جاذب را تجربه نکرده‌اند. جزء برخورد شده، به فوتون-هایی اطلاق می‌شود که یک یا چند بار پراکنده شده‌اند و همچنین

که در آن A_i و n_i ، به ترتیب وزن اتمی و تعداد واحدهای عنصر i ترکیب شیمیایی ماده جاذب است (۳۷-۲۵). ضریب انباشت، سهم پرتوهای پراکنده را در نظر می‌گیرد. ضریب انباشت همیشه برابر یا بزرگتر از یک است؛ در حالت ایده‌آل ضریب انباشت دارای کم‌ترین مقدار و برابر با یک است و هر عاملی که بتواند اثر پراکندگی‌ها در هندسه را کاهش دهد سبب می‌شود ضریب انباشت به سمت یک میل کند (۳۹ و ۳۸). ضریب انباشت عبارت است از کمیت موردنظر ناشی از شار کل به کمیت موردنظر ناشی از شار ناپراکنده.

$$B = \frac{I_U + I_S}{I_U} = 1 + \frac{I_S}{I_U} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، B ضریب انباشت، I_U شدت پرتو ناپراکنده، I_S شدت پرتو پراکنده است (۴۰).

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- ساخت ژل پلیمر

مواد تشکیل‌دهنده ژل پلیمر $PAGAS^4$ ، مشابه کار دی دین و همکاران (۴۱) است و روش ساخت آن مشابه ونینگ و همکاران (۴۲)، در نظر گرفته شده است. همه مواد روی میز و زیر هود مخلوط شده‌اند. برای گرمایش و همزدن از دستگاه هات‌پلیت استفاده شده است. غلظت محلول نانوذرات نقره مورد استفاده در این آزمایش ۱۰۰۰ ppm، ابعاد نانوذرات نقره ۵-۸ nm و شکل آن کروی است. در ابتدا ژلاتین را به آب مقطر اضافه می‌کنیم و به مدت ۱۰ دقیقه اجازه می‌دهیم ژلاتین در آب خیس شود. سپس مخلوط را تا دمای $48^\circ C$ گرم می‌کنیم زیرا افزایش دما باعث می‌شود ژلاتین در آب مقطر ذوب شود. پس از آن مخلوط را آنقدر هم می‌زنیم تا ژلاتین در آب مقطر حل شود. پس از آنکه ژلاتین در آب مقطر حل شد، بیس را به مخلوط اضافه می‌کنیم و مخلوط حاصل را آنقدر هم می‌زنیم تا بیس در آن حل شود. پس از آنکه بیس در مخلوط حل شد، آکریل آمید را به مخلوط اضافه می‌کنیم و مخلوط حاصل را آنقدر هم می‌زنیم تا آکریل آمید در آن حل شود. پس از آنکه آکریل آمید در مخلوط حل شد، اسید اسکوربیک را به مخلوط اضافه می‌کنیم و مخلوط حاصل

فوتون‌های ثانویه مانند اشعه ایکس ناشی از تابش ترمزی^۵ یا پرتوهای گاما ناشی از نابودی زوج الکترون-پوزیترون (۲۴). طبق قانون بیر-لامبرت برای پرتوهای موازی ایکس و گامای تک-انرژی و ماده جاذب با ضخامت نازک، پرتوهای ایکس و گاما پس از عبور از ماده جاذب مطابق رابطه (۱) تضعیف می‌شوند.

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

در رابطه (۱)، فرض می‌شود که هیچ پرتو پراکنده‌ای نمی‌تواند به آشکارساز برسد؛ به عبارت دیگر در حالت ایده‌آل با برقراری سه شرط قانون بیر-لامبرت، پرتوها یا بدون اندرکنش از ماده جاذب عبور می‌کنند و به آشکارساز می‌رسند یا یک بار با ماده جاذب برهمکنش می‌کنند و به آشکارساز نمی‌رسند. با افزایش ضخامت ماده، احتمال اندرکنش پرتوها در ماده بیشتر می‌گردد و در نتیجه تعداد پرتوهایی که بدون اندرکنش از ماده عبور می‌کنند کاهش می‌یابد به تبع آن تعداد پرتوهای که دست‌خوش پراکندگی‌های چندگانه شده‌اند و به آشکارساز رسیده‌اند، افزایش می‌یابد که انرژی این پرتوهای پراکنده‌شده نسبت به پرتوهای بدون اندرکنش کمتر است. در چنین شرایطی برای تصحیح قانون بیر-لامبرت یک پارامتر اصلاحی موردنیاز است. قانون اصلاح‌شده بیر-لامبرت در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$I = I_0 Be^{-\mu x} \quad (2)$$

که در آن I شدت پرتوهای فرودی که پس از برخورد با نمونه به آشکارساز می‌رسند، I_0 شدت پرتوهای فرودی (بدون نمونه) که به آشکارساز می‌رسند، B ضریب انباشت، μ ضریب تضعیف خطی که واحد آن cm^{-1} است و x ضخامت ماده جاذب برحسب cm است. اگر ماده جاذب یک ترکیب یا مخلوط همگن باشد، ضریب میرایی جرمی ماده جاذب از رابطه (۳) به‌دست می‌آید.

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i W_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (3)$$

که در آن W_i و $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$ به ترتیب کسر وزنی و ضریب میرایی جرمی عنصر تشکیل‌دهنده i ترکیب شیمیایی ماده جاذب است. W_i از رابطه (۴) به‌دست می‌آید.

$$W_i = \frac{n_i A_i}{\sum_i n_i A_i} \quad (4)$$

جدول ۱- مواد تشکیل‌دهنده ژل پلیمر PAGAS

مواد تشکیل‌دهنده ژل پلیمر	درصد مواد تشکیل‌دهنده ژل پلیمر
آب مقطر	٪ ۸۳
ژلاتین	٪ ۱۳
بیس	٪ ۲
آکریل آمید	٪ ۲
اسید اسکوربیک	۵ mM



شکل ۱- ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره از غلظت یک تا هشت میلی‌مولار به ترتیب از چپ به راست تصویر.

را آنقدر هم می‌زنیم تا اسید اسکوربیک در آن حل شود. بدین- ترتیب، ژل پلیمر PAGAS ساخته می‌شود. در جدول (۱)، مواد تشکیل‌دهنده ژل پلیمر PAGAS، ارائه شده است. در این پژوهش، اقدام به ساخت ۱۸ نمونه برای انجام آزمایش‌های تجربی نمودیم؛ به‌طوری که هشت نمونه با ارتفاع یک سانتی‌متر شامل ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره از غلظت یک تا هشت میلی‌مولار، یک نمونه با ارتفاع یک سانتی‌متر شامل ژل پلیمر بدون نانوذرات نقره و هشت نمونه دیگر با ارتفاع سه سانتی‌متر شامل ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره از غلظت یک تا هشت میلی‌مولار، یک نمونه با ارتفاع سه سانتی‌متر شامل ژل پلیمر بدون نانوذرات نقره تهیه شد. شکل (۱)، مربوط به ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره در ارتفاع سه سانتی‌متر از غلظت یک تا هشت میلی‌مولار، به ترتیب از چپ به راست تصویر است.

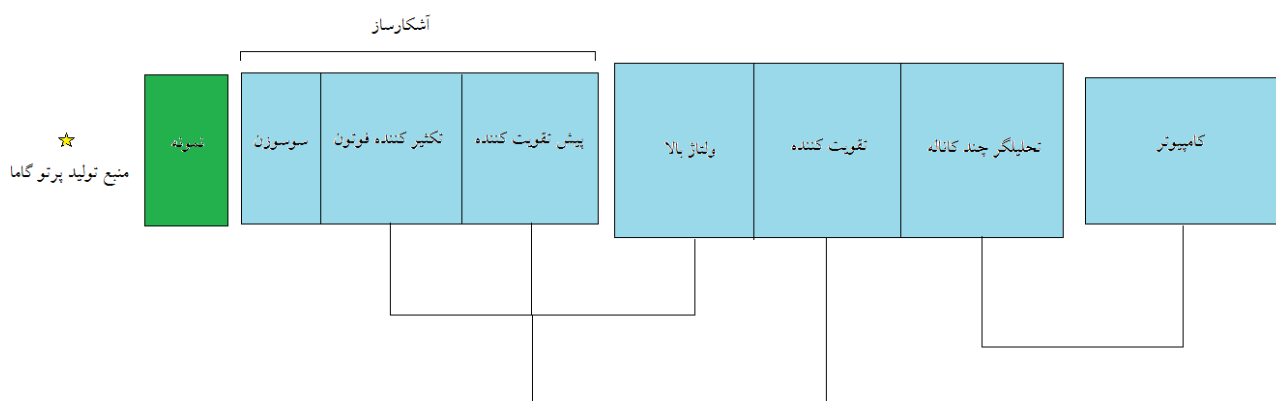
۲-۲- روش انجام آزمایش

سوسوزن‌ها^۱، موادی هستند که وقتی تابش‌یوننده از آن‌ها

می‌گذرد تولید جرقه یا نور می‌کنند. مقدار نوری که در سوسوزن تولید می‌شود، بسیار اندک است. پیش‌ازاین‌که بتوان آن را به- صورت یک تپ ثبت کرد، باید آن را تقویت نمود. تقویت یا تکثیر نور سوسوزن، با وسیله‌ای به نام تکثیرکننده فوتون صورت می‌گیرد. تکثیرکننده فوتون، از یک لوله شیشه‌ای تهی از هوا، یک فوتوکاتد در ورودی و چندین داینود در درون، ساخته شده است. آند، که در انتهای یک رشته داینود قرار دارد، نقش جمع‌کننده الکترون‌ها را دارد (۴۰). الکترون‌های جمع‌شده در آند، باعث تولید یک جریان الکتریکی می‌شود. بزرگی این جریان یا تپ (پالس) الکتریکی، متناسب با انرژی تابش فرودی به سوسوزن می‌باشد. تحلیلگر چندکاناله، تپ‌ها را آنالیز کرده و آن‌ها را برحسب ارتفاع جدا می‌کند. این اطلاعات در جایی مخصوص از حافظه سیستم به نام کانال، ذخیره می‌شود و محتویات حافظه مرتباً روی صفحه نمایش کامپیوتر به‌صورت نقطه‌هایی در می‌آید. هر نقطه روشن، مشخص‌کننده یک کانال است که از چپ به راست شماره‌گذاری شده است. شماره هر کانال، متناسب با



شکل ۲- چیدمان آزمایش.



شکل ۳- نحوه ارتباط وسایل آزمایشگاه با یکدیگر.

کانالها از چپ به راست شماره گذاری شده‌اند و شماره هر کانال متناسب با ارتفاع تپ مربوطه است؛ بنابراین با تقویت تپ، تصویر طیف حاصل از آزمایش به سمت راست جابه‌جا می‌شود. چیدمان آزمایش مطابق شکل (۲) می‌باشد. در شکل (۳)، نحوه ارتباط وسایل آزمایشگاه با یکدیگر مشخص شده است. همچنین در شکل (۴)، محل قرارگیری چشمه سزیم، نمونه و آشکارساز مشخص شده است. آشکارساز مورد استفاده در این تحقیق، از نوع NaI(TL) است. مدت انجام آزمایش برای تمام نمونه‌ها ۱۰ دقیقه است. در ابتدا کامپیوتر و تحلیگر چندکاناله را روشن می‌کنیم و سپس ۳۰ دقیق صبر می‌کنیم تا تحلیگر چندکاناله گرم شود. سپس نمونه‌ها را مطابق شکل (۴)، روی نگهدارنده نمونه قرار می‌دهیم و طیف مربوط به هر نمونه را به دست می‌آوریم.

ارتفاع تپ مربوطه خواهد بود. ارتفاع هر نقطه روی محور قائم، نمایانگر شمارش ذخیره شده در آن کانال است. پارامتر مهم دیگر تکثیرکننده فوتون، اندازه جریان در تاریکی آن است. جریان در تاریکی، عمدتاً زائیده الکترون‌هایی است که پس از جذب انرژی گرمایی توسط کاتد گسیل می‌شوند. این فرآیند به گسیل گرمایونی معروف است. به همین علت است که ابتدا دستگاه تحلیگر چندکاناله را روشن می‌کنیم و پس از حدود ۳۰ دقیقه که دستگاه گرم شد، آزمایش‌های مربوطه را انجام می‌دهیم. کاربرد تبعیضگر، متمایز ساختن تپ‌های حاصل از ذرات مختلف در یک آشکارساز است. به عنوان مثال، جداسازی تپ‌های حاصل از گاما و نوترون در یک آشکارساز است. کاربرد تقویت کننده، تقویت یا افزایش ارتفاع تپ است. همان‌طور که پیشتر صحبت کردیم،



شکل ۴- چشمه سزیم که در داخل مکعب قرار داده شده است، ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره در غلظت یک میلی مولار و در ارتفاع یک سانتی متر و آشکارساز NaI(TL).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- داده‌های مربوط به اندازه‌گیری آزمایش

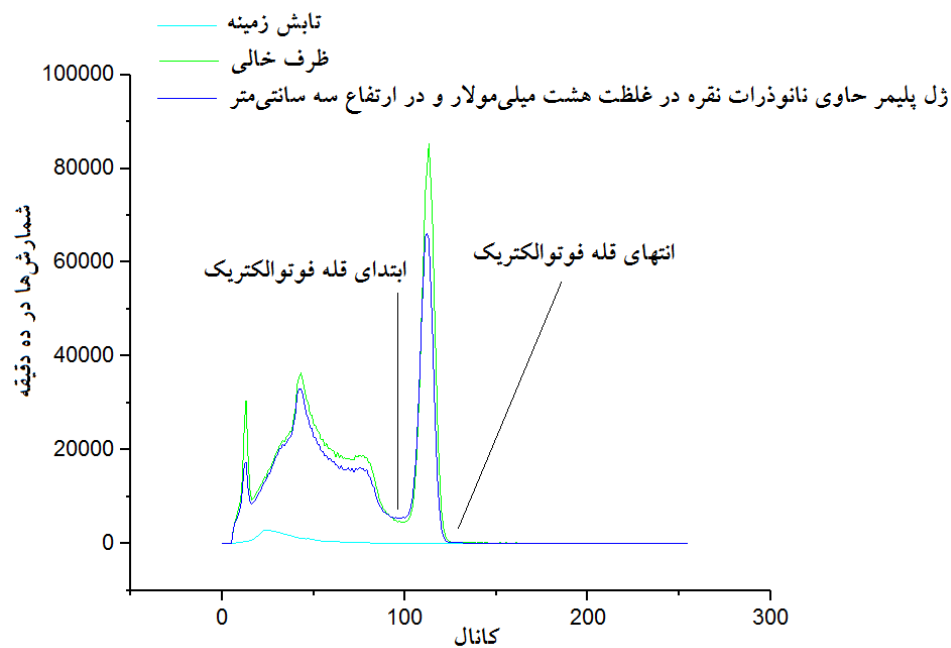
در این تحقیق از چشمه نقطه‌ای ^{137}Cs ، به‌عنوان منبع تولید پرتو گاما و از ژل پلیمر، به‌عنوان یک ماده نگهدارنده نانوذرات نقره، به‌منظور بررسی تأثیر نانوذرات نقره در ضریب انباشت دز استفاده شده است. از مقایسه دو طیف آشکارساز مربوط به حالتی که نمونه بین چشمه و آشکارساز قرار ندارد و حالتی که نمونه بین چشمه و آشکارساز قرار دارد، می‌توان پرتوهایی که بدون اندرکنش از نمونه عبور کرده‌اند و به آشکارساز رسیده‌اند و پرتوهایی که پس از برخورد با نمونه دچار اندرکنش شده‌اند و سپس به آشکارساز رسیده‌اند را به‌دست آورد و از این دو کمیت ضریب انباشت دز را به‌دست آورد. در شکل (۵)، طیف تابش زمینه (منظور از تابش زمینه، هر تابشی به غیر از تابش چشمه سزیم است)، طیف ظرف خالی (منظور از طیف ظرف خالی، طیف آزمایش در حالت بدون نمونه است) و طیف نمونه ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره در غلظت هشت میلی‌مولار از نانوذرات نقره، نشان داده شده است. در رسم شکل (۵)، تحلیلگر چندکاناله را روی کانال ۲۵۶ تنظیم می‌کنیم؛ یعنی شروع کانال صفر و پایان کانال ۲۵۵ است. پس از اتمام آزمایش فراوانی مربوط به کانال صفر تا کانال ۲۵۵، در کامپیوتر ذخیره می‌شود که برای رسم شکل طیف مربوط به هر آزمایش از نرم‌افزار OriginPro استفاده می‌کنیم که محور افقی مربوط به کانال صفر

تا کانال ۲۵۵ و محور عمودی مربوط به فراوانی مربوط به هر کانال است. ضریب انباشت دز، از رابطه (۶) به‌دست می‌آید و خطای مربوط به ضریب انباشت دز از قرار دادن رابطه (۶) در رابطه انتشار خطا، یعنی رابطه (۷)، به‌دست می‌آید (۴۰).

$$B_D = 1 + \frac{\alpha}{\mu_\alpha(E_0)E_0} \frac{\sum_{i=0}^n (\dot{N}_{Ci} - \frac{\dot{N}_p}{N_p} N_{Ci}) \mu_\alpha(E_i) E_i}{\frac{\dot{N}_p}{N_p} N_T} \quad (6)$$

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^M \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2} \sigma_i^2 \quad (7)$$

در رابطه (۶)، α ، E_0 ، $\mu_\alpha(E_0)$ ، مقادیر ثابت هستند. $\dot{N}_p$ ، مساحت قله فوتوالکتریک یا مجموع فراوانی کانال‌های مربوط به بازه ابتدای قله فوتوالکتریک تا انتهای قله فوتوالکتریک در نمودار فراوانی برحسب شماره کانال است. $\dot{N}_p$ مربوط به حالتی است که نمونه بین چشمه و آشکارساز قرار دارد. N_p ، مساحت قله فوتوالکتریک یا مجموع فراوانی کانال‌های مربوط به بازه ابتدای قله فوتوالکتریک تا انتهای قله فوتوالکتریک در نمودار فراوانی برحسب شماره کانال است. N_p مربوط به حالتی است که نمونه بین چشمه و آشکارساز قرار ندارد. $\dot{N}_{Ci}$ ، فراوانی مربوط به کانال i در محدوده کانال صفر تا کانال ابتدای قله فوتوالکتریک درحالتی که نمونه بین چشمه و آشکارساز قرار دارد. N_{Ci} ، فراوانی مربوط به کانال i در محدوده کانال صفر تا کانال ابتدای قله فوتوالکتریک درحالتی که نمونه بین چشمه و آشکارساز قرار ندارد.



شکل ۵- طیف مربوط به تابش زمینه، ظرف خالی و ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره با غلظت هشت میلی مولار و در ارتفاع سه سانتی متر.

نقره از غلظت یک تا هشت میلی مولار، در ارتفاع یک و سه سانتی متر است. شکل (۷)، مربوط به اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز به درصد از غلظت یک تا هشت میلی-مولار، در ارتفاع یک و سه سانتی متر است. جدول (۴)، مربوط به ضریب تضعیف جرمی اثر فوتوالکتریک و پراکندگی کامپتون عنصر نقره برحسب سانتی متر مربع بر گرم، مربوط به انرژی پرتو گاما از ۰/۰۱ تا ۲ مگاالکترون ولت است. اطلاعات مربوط به این جدول از سایت XCOM آورده شده است. شکل (۸)، مربوط به نمودار داده‌های جدول (۴) است.

۳-۲- بحث در مورد داده‌های آزمایش

در پراکندگی کامپتون، پرتو در هر اندرکنش با ماده مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهد ولی در اثر فوتوالکتریک پرتو در اثر اندرکنش با ماده، انرژی خود را به طور کامل از دست می‌دهد (۴۰). باتوجه به نمودار شکل (۸) که مربوط به ضریب تضعیف جرمی پراکندگی کامپتون و اثر فوتوالکتریک عنصر نقره در انرژی ۰/۰۱ تا ۲ مگاالکترون ولت است، در انرژی‌های کمتر از MeV ۰/۲ اثر فوتوالکتریک غالب است. در شکل (۶) که مربوط به

N_T ، مساحت کل یا مجموع فراوانی کل نمودار فراوانی برحسب شماره کانال درحالی که نمونه بین چشمه و آشکارساز قرار ندارد. $\mu_a(E_i)$ ، ضریب جذب در انرژی E_i است. اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز به درصد، از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$P(\%) = \frac{A-B}{B} \times 100 \quad (8)$$

که در رابطه (۸)، $P(\%)$ ، اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز به درصد، A ، ضریب انباشت دز ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره در غلظت n میلی مولار و B ضریب انباشت دز ژل پلیمر بدون نانوذرات نقره است.

جدول (۲)، مربوط به ضریب انباشت دز ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره و اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز به درصد، در غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره در نمونه با ارتفاع یک سانتی متر است. جدول (۳)، مربوط به ضریب انباشت دز ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره و اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز به درصد، در غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره در نمونه با ارتفاع سه سانتی متر است. شکل (۶)، مربوط به ضریب انباشت دز ژل پلیمر حاوی نانوذرات

جدول ۲- ضریب انباشت دز ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره و اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز به درصد در غلظت- های مختلف نانوذرات نقره در نمونه با ارتفاع یک سانتی‌متر (خطای نسبی ضریب انباشت دز کمتر از ۰/۰۱ است)

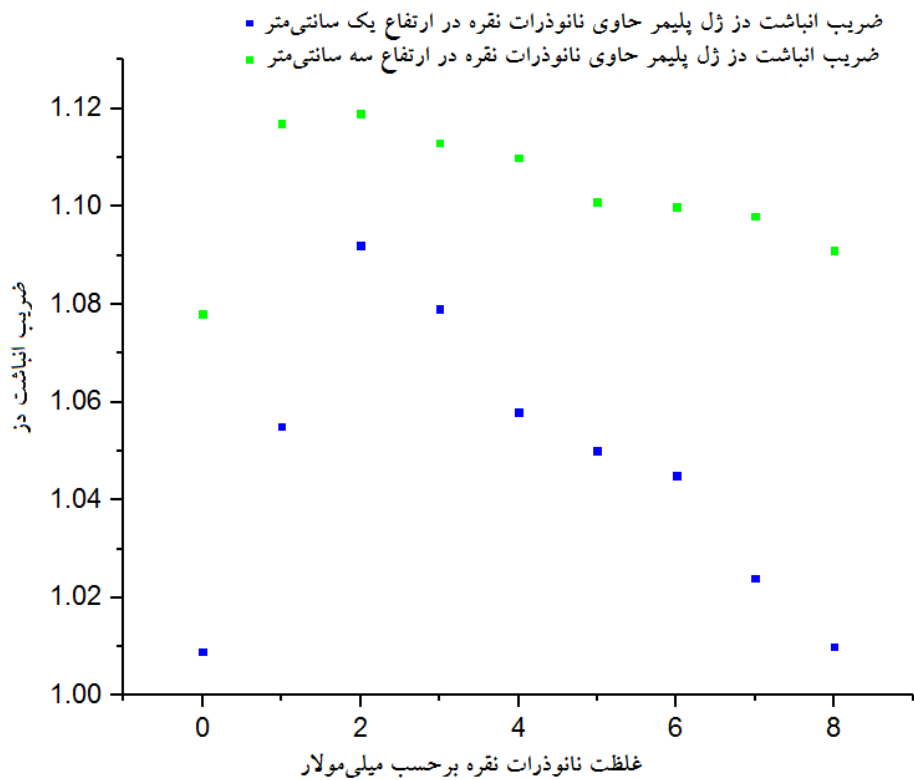
غلظت نانو ذرات نقره برحسب میلی مولار	ضریب انباشت دز ژل پلیمر حاوی نانو ذرات نقره	اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز(%)
۰	۱/۰۰۹	۰
۱	۱/۰۵۵	۴/۵۶
۲	۱/۰۹۲	۸/۲۳
۳	۱/۰۷۹	۶/۹۴
۴	۱/۰۵۸	۴/۸۶
۵	۱/۰۵۰	۴/۰۶
۶	۱/۰۴۵	۳/۵۷
۷	۱/۰۲۴	۱/۴۹
۸	۱/۰۱۰	۰/۱۰

جدول ۳- ضریب انباشت دز ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره و اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز به درصد در غلظت- های مختلف نانوذرات نقره در نمونه با ارتفاع سه سانتی‌متر (خطای نسبی ضریب انباشت دز کمتر از ۰/۰۱ است)

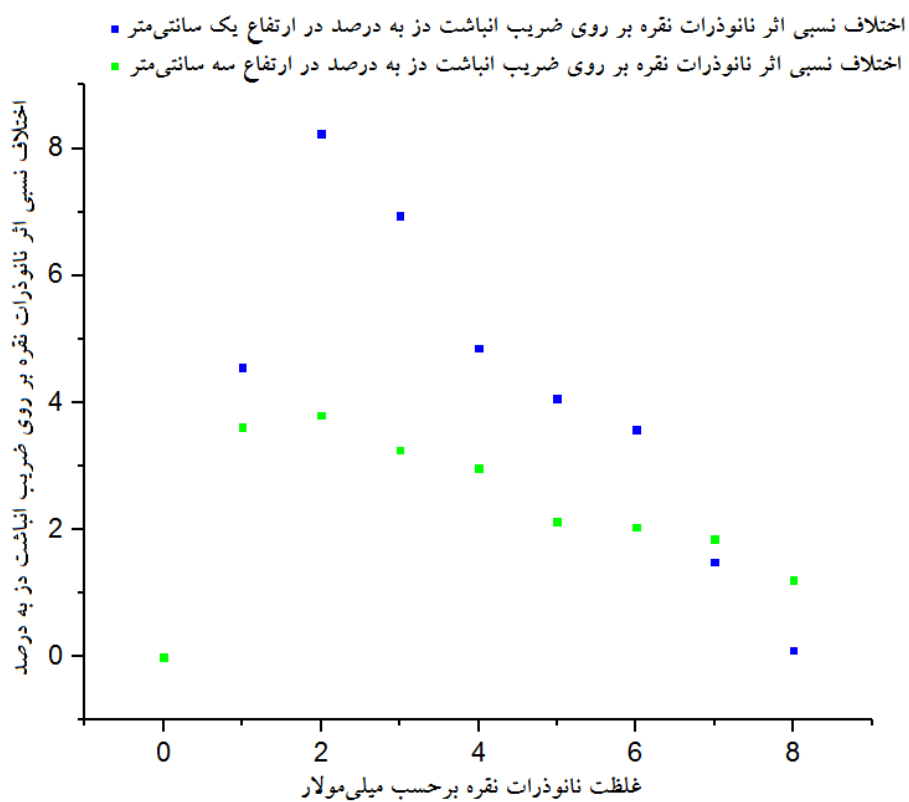
غلظت نانو ذرات نقره برحسب میلی مولار	ضریب انباشت دز ژل پلیمر حاوی نانو ذرات نقره	اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز(%)
۰	۱/۰۷۸	۰
۱	۱/۱۱۷	۳/۶۲
۲	۱/۱۱۹	۳/۸۰
۳	۱/۱۱۳	۳/۲۵
۴	۱/۱۱۰	۲/۹۷
۵	۱/۱۰۱	۲/۱۳
۶	۱/۱۰۰	۲/۰۴
۷	۱/۰۹۸	۱/۸۶
۸	۱/۰۹۱	۱/۲۱

حضور نانوذرات نقره در ژل پلیمر باعث افزایش برهمکنش پرتوها پس از برخورد در ژل پلیمر می‌شود و این یک مزیت است. افزایش برهمکنش پرتوها در بافت سرطانی، یعنی پرتوها انرژی بیشتری در بافت سرطانی به‌جا می‌گذارند و این به معنای تخریب بیشتر بافت سرطانی است. هنگامی که پرتوهای چشمه

ضریب انباشت دز ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره برحسب غلظت نانوذرات نقره است. غلظت صفر میلی‌مولار از نانوذرات نقره، به معنای ژل پلیمر فاقد نانوذرات نقره است. از مقایسه ضریب انباشت دز مربوط به ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره در غلظت- های مختلف با ژل پلیمر فاقد نانوذرات نقره، مشاهده می‌کنیم که



شکل ۶- ضریب انباشت دز ژل پلیمر حاوی نانوذرات نقره از غلظت یک تا هشت میلی‌مولار در ارتفاع یک و سه سانتی‌متر.



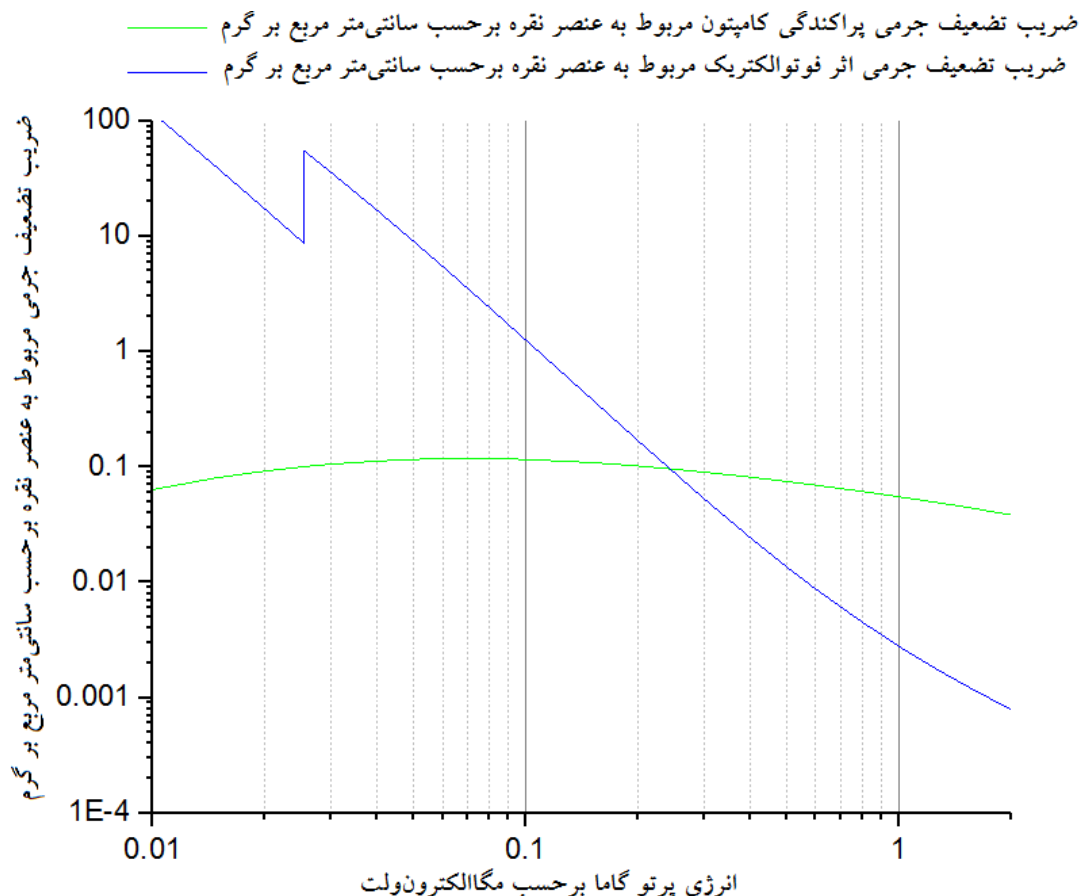
شکل ۷- اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز به درصد از غلظت یک تا هشت میلی‌مولار در ارتفاع یک و سه سانتی‌متر.

جدول ۴- ضریب تضعیف جرمی اثر فوتوالکتریک و پراکندگی کامپتون عنصر نقره برحسب سانتی متر مربع بر گرم مربوط به انرژی پرتو گاما از ۰/۰۱ تا ۲ مگا الکترون ولت (۴۳)

انرژی پرتو گاما برحسب (MeV)	ضریب تضعیف جرمی پراکندگی کامپتون مربوط به عنصر نقره برحسب (cm ² /g)	ضریب تضعیف جرمی اثر فوتوالکتریک مربوط به عنصر نقره برحسب (cm ² /g)
۰/۰۱۰	۰/۰۶۳۹	۱۱۶/۶۰۰۰
۰/۰۱۵	۰/۰۸۱۰	۳۸/۲۲۰۰
۰/۰۲۰	۰/۰۹۲۲	۱۷/۱۰۰۰
۰/۰۲۶	۰/۱۰۰۷	۸/۵۹۸۰
۰/۰۲۶	۰/۱۰۰۷	۵۴/۴۷۰۰
۰/۰۳۰	۰/۱۰۵۶	۳۵/۹۲۰۰
۰/۰۴۰	۰/۱۱۲۶	۱۶/۶۵۰۰
۰/۰۵۰	۰/۱۱۶۲	۹/۰۲۷۰
۰/۰۶۰	۰/۱۱۷۹	۵/۴۲۵۰
۰/۰۸۰	۰/۱۱۸۰	۲/۳۹۶۰
۰/۱۰۰	۰/۱۱۶۰	۱/۲۶۱۰
۰/۱۵۰	۰/۱۰۸۹	۰/۳۸۸۹
۰/۲۰۰	۰/۱۰۱۹	۰/۱۶۸۹
۰/۳۰۰	۰/۰۹۰۴	۰/۰۵۳۴
۰/۴۰۰	۰/۰۸۱۷	۰/۰۲۴۴
۰/۵۰۰	۰/۰۷۵۰	۰/۰۱۳۷
۰/۶۰۰	۰/۰۶۹۶	۰/۰۰۸۷
۰/۸۰۰	۰/۰۶۱۴	۰/۰۰۴۵
۱/۰۰۰	۰/۰۵۵۲۴	۰/۰۰۲۸
۱/۰۲۲	۰/۰۵۴۷	۰/۰۰۲۷
۱/۲۵۰	۰/۰۴۹۵	۰/۰۰۱۸
۱/۵۰۰	۰/۰۴۵۰	۰/۰۰۱۳
۲/۰۰۰	۰/۰۳۸۴	۰/۰۰۰۸

سزیم به بافت سرطانی برخورد می کنند، دچار اندرکنش کامپتون یا فوتوالکتریک می شوند. همان طور که داده های تجربی نشان می دهد، حضور نانوذرات نقره از غلظت صفر تا دو میلی مولار، باعث افزایش پراکندگی ها و در نتیجه پرتوهای پراکنده بیشتری به آشکارساز می رسند؛ بنابراین از غلظت صفر تا دو میلی مولار، ضریب انباشت روند افزایش از خود نشان می دهد. با افزایش

غلظت نانوذرات نقره از سه تا هشت میلی مولار، تعداد پراکندگی ها بیشتر خواهد شد و چون پرتو در هر پراکندگی مقداری از انرژی خود را از دست می دهد، در این حالت با افزایش غلظت نانوذرات نقره سهم پرتوهایی که در اثر پراکندگی های متوالی انرژی خود را به طور کامل از دست می دهند، یا پرتوهای که در اثر پراکندگی های متوالی انرژی آن ها به کمتر از ۰/۲ MeV کاهش



شکل ۸- ضریب تضعیف جرمی پراکندگی کامپتون و اثر فوتوالکتریک عنصر نقره برحسب سانتی‌متر مربع بر گرم مربوط به انرژی پرتو گاما از ۰/۰۱ تا ۲ مگاالکترون‌ولت. محور عمودی و افقی برحسب لگاریتم در مبنای ۱۰ است (۴۳).

نمونه از یک به سه سانتی‌متر، احتمال اندرکنش پرتوها افزایش می‌یابد و لذا کسر پرتوهای پراکنده شده که از نمونه خارج شده- اند و به آشکارساز می‌رسند، افزایش می‌یابد و این پدیده منجر به افزایش ضریب انباشت دز در هر غلظت، برای نمونه در ارتفاع سه سانتی‌متر نسبت به نمونه در ارتفاع یک سانتی‌متر می‌شود. در این تحقیق، برای مشاهده بهتر اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز، اختلاف نسبی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز به درصد محاسبه شده است که نتایج این محاسبات در شکل (۷) مشاهده می‌شود. با توجه به این‌که هدف از فرآیند پرتودرمانی، تخریب سلول‌های سرطانی توسط تابش پرتو به بافت سرطانی است و از طرفی مقداری از این تابش پرتو به بافت- های سالم اطراف بافت سرطانی برخورد می‌کند و این عمل باعث

می‌یابد و سپس در اثر فوتوالکتریک انرژی خود را به‌طور کامل از دست می‌دهند، افزایش می‌یابد؛ بنابراین پرتوهای کمتری به آشکارساز می‌رسند و به این خاطر است که در غلظت سه تا هشت میلی‌مولار، ضریب انباشت روند کاهشی از خود نشان می‌دهد. این نکته را باید در نظر گرفت که کاهش ضریب انباشت دز از غلظت سه تا هشت میلی‌مولار، به معنی کاهش اندرکنش پرتوها در ژل پلیمر نیست بلکه برعکس با افزایش غلظت نانوذرات نقره، تعداد اندرکنش‌ها آنقدر زیاد می‌شود که احتمال جذب کامل پرتو با افزایش غلظت نانوذرات نقره افزایش می‌یابد و این به معنای این است که افزایش غلظت نانوذرات نقره باعث می‌شود پرتوها انرژی بیشتری در ژل پلیمر به‌جا بگذارند. علت اختلاف دو نمودار در شکل (۶)، این است که با افزایش ضخامت

نقره، ضریب انباشت دز روند افزایشی دارد؛ به‌طوری که در نمونه‌هایی با ارتفاع یک و سه سانتی‌متر، به ترتیب به بیشینه مقدار $1/092$ و $1/119$ می‌رسد و از غلظت دو تا هشت میلی‌مولار نانوذرات نقره، ضریب انباشت دز روند کاهشی دارد؛ به‌طوری که در نمونه‌هایی با ارتفاع یک و سه سانتی‌متر، به ترتیب به کمینه مقدار $1/010$ و $1/091$ می‌رسیم. این نتایج نشان می‌دهد که حضور نانوذرات نقره در ژل پلیمری، باعث افزایش اندرکنش پرتوها در ژل پلیمر می‌شود. افزایش اندرکنش پرتوها در بافت سرطانی، باعث تخریب بیشتر بافت سرطانی می‌شود و همچنین افزایش اندرکنش پرتوها در حفاظ، باعث تضعیف بیشتر پرتوها در حفاظ می‌شود؛ بنابراین از نانوذرات نقره می‌توان به‌عنوان یک گزینه مناسب در پرتودرمانی برای درمان سرطان و در ساخت حفاظ مناسب (سبک، غیرسمی و انعطاف‌پذیر) استفاده کرد. با توجه به نتایج حاصل و در نظر گرفتن این‌که روش اندازه‌گیری ضریب انباشت دز در این مقاله نسبت به سایر روش‌های مرسوم مانند MRI یا قرص‌های TLD، آسان‌تر و ارزان‌تر است، می‌توان نتیجه گرفت که روش اندازه‌گیری ضریب انباشت دز در این مقاله یک گزینه مناسب برای بهبود دقت و کیفیت در پرتودرمانی است.

تشکر و سپاسگزاری

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

تضاد منافع

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

سهم نویسندگان

عمار واحدیان موحد: طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، اعتبارسنجی نتایج، نوشتن مقاله.
حسین توکلی عنبران: طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، تحلیل و تفسیر داده‌ها، اعتبارسنجی نتایج، راهنمایی پروژه.

تخریب بافت‌های سالم اطراف بافت سرطانی می‌شود، بنابراین پرتودرمانی را نمی‌توانیم به هر میزانی که می‌خواهیم ادامه دهیم. برای این‌که با تابش کمتر پرتو، بیشترین تخریب را در سلول‌های سرطانی و همچنین کمترین آسیب را در بافت‌های سالم اطراف بافت سرطانی ایجاد کنیم، نانوذرات نقره را به بافت‌های سرطانی تزریق می‌کنیم؛ زیرا همان‌طور که پیشتر گفتیم حضور نانوذرات نقره باعث افزایش برهمکنش پرتوها در بافت سرطانی می‌شود و از طرفی افزایش برهمکنش پرتوها در بافت سرطانی، باعث تخریب بیشتر بافت سرطانی می‌شود. از طرفی در ساخت یک حفاظ سبک، باید از ماده‌ای با عدد اتمی کم استفاده کرد که با تزریق نانوذرات نقره در این ماده، برهمکنش پرتوها در آن افزایش می‌یابد که این باعث تضعیف بیشتر پرتوها می‌گردد. هرچه ابعاد یک ماده کوچک‌تر باشد، نسبت سطح به حجم آن ماده بیشتر می‌شود و هرچه نسبت سطح به حجم یک ماده بیشتر باشد، سطح بیشتری از آن ماده در معرض پرتوها قرار می‌گیرد و در نتیجه احتمال برهمکنش پرتو با آن ماده بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، نسبت سطح به حجم یک گرم از ذرات نقره با ابعاد در محدوده نانومتر، بیشتر از یک گرم ذرات نقره با ابعاد محدوده میکرومتر است. پس احتمال برهمکنش پرتوها با یک گرم نانوذرات نقره در بافت بیشتر از یک گرم میکرو ذرات نقره در بافت است. پس به این علت است که در پرتودرمانی و ساخت حفاظ، از مواد با ابعاد نانومتر استفاده می‌کنیم. با توجه به عدد اتمی بالای نقره و غیرسمی بودن آن و همچنین مزیت مواد با ابعاد نانومتر که پیشتر در مورد آن صحبت کردیم، در پرتودرمانی و ساخت حفاظ، نانوذرات نقره یک گزینه مناسب است. همچنین در پرتودرمانی، نفوذ ذرات با ابعاد نانو در بافت بهتر صورت می‌گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بررسی اثر نانوذرات نقره بر ضریب انباشت دز، از نانوذرات نقره از غلظت صفر تا هشت میلی‌مولار در دو نمونه از ژل پلیمر که یکی در ارتفاع یک سانتی‌متر و دیگری در ارتفاع سه سانتی‌متر قرار دارد، استفاده شده است. از غلظت صفر تا دو میلی‌مولار نانوذرات

واژه‌نامه

1. radiotherapy
2. magnetic resonance imaging (MRI)
3. optical computed tomography (OCT)
4. Raman spectroscopy
5. ultrasound
6. X-ray computed tomography (CT)
7. thermo luminescent dosimeter (TLD)
8. Bremsstrahlung radiation
9. polyacrylamide gel with ascorbic acid (PAGAS)
10. scintillation

مراجع

1. Hasani H, Nedayi H, Zahmatkesh M, Vardi M, Bagheri S, Mirzaei S. Dosimetric Evaluation of Linac Photon Small Fields using MAGIC Polymer Gels. Iran J Med Phys. 2011;8(3):31-39 (In Persian). <https://doi.org/10.22038/ijmp.2011.7227>
2. Magugliani G, Marranconi M, Liosi GM, Locatelli F, Gambirasio A, Trombetta L, et al. Pilot scale validation campaign of gel dosimetry for pre-treatment quality assurance in stereotactic radiotherapy. Physica Medica. 2023;114:103158. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.103158>
3. Guadarrama-Huerta PJ, Arzaga-Barajas E, Rodríguez-Laguna A, Jim'enez-Acosta JA, Poitevin-Chac'on MA, Massillon-Jl G. Patient-specific quality assurance in SBRT treatments using 3D polymer gel dosimetry. Radiat Meas. 2024;175:107166. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2024.107166>
4. Javaheri N, Yarahmadi M, Refaei A, Aghamohammadi A. Improvement of sensitivity of X-ray CT reading method for polymer gel in radiation therapy. Rep Pract Oncol Radiother. 2020;25:100-103. <https://doi.org/10.1016/j.rpor.2019.12.017>
5. Rabaeh KA, Hammoudeh IME, Eyadeh MM. Novel polymer gel dosimeters based on N-Vinylcaprolactam for medical dosimetry. J Radioanal Nucl Chem. 2022; 331:3147-3153. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08361-7>
6. Eyadeh MM, Samadi SA, Rabaeh KA, Oglat AA, Diamond KR. Effect of lithium chloride inorganic salt on the performance of N-(Hydroxymethyl)acrylamide polymer-gel dosimeter in radiation therapy. J Radioanal Nucl Chem. 2021;330: 1255-1261. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-08036-9>
7. Kawamura H, Sakae T, Terunuma T, Ishida M, Shibata Y, Matsumura A. Evaluation of three-dimensional polymer gel dosimetry using X-ray CT and R2 MRI. Appl Radiat Isot. 2013;77:94-102. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.02.011>
8. Kozicki M, Jaszczak-Kuligowska M, Maras P. Measurement of ionising radiation dose absorbed by bones by using a bone-imitating polymer gel dosimeter. Meas. 2025;240:115633. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115633>
9. Zhanga T, Almajidi YQ, Awad SA, Rahi Alhachamid F, Abdulfadhil Gateae M, Kadhum WR. Dosimetric properties of PASSAG polymer gel dosimeter in electron beam radiotherapy using magnetic resonance imaging. J Xray Sci Technol. 2023;31:825-836. <https://doi.org/10.3233/XST-230073>
10. Eyadeh MM, Alshomali L, Rabaeh KA, Oglat AA, Diamond KR. Improvement on the performance N-(3-methoxypropyl)acrylamide polymer-gel dosimeter by the addition of inorganic salt for application in radiotherapy dosimetry. J Radioanal Nucl Chem. 2022;331:1343-1351. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08197-1>
11. Khosravi H, Bouraghi H. Evaluation of gold nanoparticles radio sensitization effect in radiation therapy of cancer: review article. Tehran Univ Med J (TUMJ). 2019;76(12):772-777 (In Persian).
12. Dezhangah M, Ghojavand M, Poursalehi R, Qolipour payvandi R. Study gamma radiation protection properties of silicon rubber-bismuth oxide nanocomposites: Synthesis, characterization and simulation. J Radiat Saf Meas. 2016;4(4):37-46 (In Persian). <https://doi.org/10.22052/4.4.37>
13. Ornová D, Šemnická J, Spěváček V, Konček O. Polymer gel dosimetry using computed tomography. Nucl Instrum Methods Phys Res A or NIM A. 2011;652:806-809. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.09.089>
14. Mather LM. Application of ultrasound to polymer gel dosimeters used in radiotherapy [thesis]. Brisbane (Australia): Queensland University of Technology; 2003.
15. 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. J Magn Reson Imaging 1993;11:253-258. [https://doi.org/10.1016/0730-725X\(93\)90030-H](https://doi.org/10.1016/0730-725X(93)90030-H)
16. Sellakumar P, Jebaseelan J, Samuel E. Study on energy dependence of PAGAT polymer gel dosimeter evaluated using X-Ray CT. Radiat Meas. 2010;45:92-97. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.11.003>
17. Yuan-Jen C, Jing-Quan L, Bor-Tsung H, Chun-Hsu Y, Chin-Hsing C. Dose evaluation of an NIPAM polymer gel dosimeter using gamma index. Radiat Phys Chem. 2014;104:180-187. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.11.031>
18. Oldham M, Siewerdsen JH, Shetty A, Jaffray DA. High resolution gel-dosimetry by optical-Ct and MR scanning. Med Phys. 2001;28(7):1436-1445. <https://doi.org/10.1118/1.1380430>

19. Chacón D, Vedelago J, Strumia MC, Valente M, Mattea F. Raman spectroscopy as a tool to evaluate oxygen effects on the response of polymer gel dosimetry. *Appl Radiat Isot.* 2019;150:43-52. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.05.006>
20. Baldock C, Rintoul L, Keevil SF, Pope JM, George GA. Fourier transform Raman spectroscopy of polyacrylamide gels (PAGs) for radiation dosimetry. *Med Phys.* 1998;43:3617-3627. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/43/12/017>
21. Natanasabapathi G, Warmingtong L, Watanabe Y. Evaluation of two calibration methods for MRI-based polymer gel dosimetry. *Appl Radiat Isot.* 2021;174:109754. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109754>
22. Adliene D, Gabrielis Urbonavicius B, Laurikaitiene J, Puiso J. New application of polymer gels in medical radiation dosimetry: plasmonic sensors. *Radiat Phys Chem.* 2020;168:108609. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108609>
23. Mahmoodi A, Tavakoli-Anbaran H. Measurement of absorbed dose in normoxic polymer gel and study of gold nanoparticles configuration effects. *J Radiat Saf Meas.* 2019;7(2):35-42 (In Persian). <https://doi.org/10.22052/7.2.35>
24. Jarrah I, Radaideh MI, Kozlowski T, Uddin R. Determination and validation of photon energy absorption buildup factor in human tissues using monte carlo simulation. *Radiat Phys Chem.* 2019;160:15-25. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.03.008>
25. Singh S, Kumar A, Singh C, Singh Thind K, Mudahar GS. Effect of finite sample dimensions and total scatter acceptance angle on the gamma ray buildup factor. *Ann Nucl Energy* 2008;35:2414-2416. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2008.08.008>
26. Ekinci N, Kavaz E, Özdemir Y. A study of The energy absorption and exposure buildup factors of some anti-inflammatory drugs. *Appl Radiat Isot.* 2014;90:265-273. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.05.003>
27. Kavaz E, Ahmadishadbad N, ÖZDEMİR Y. Photon buildup factors of some chemotherapy drugs. *Biomed Pharmacother.* 2015;69:34-41. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2014.10.031>
28. Kilicoglu O, Tekin HO. Bioactive glasses with TiO₂ additive: Behavior characterization against nuclear radiation and determination of buildup factors. *Ceram Int.* 2020;46:10779-10787. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.088>
29. Sayyed MI, Elhouichet H. Variation of energy absorption and exposure buildup factors with incident photon energy and penetration depth for boro-tellurite (B₂O₃-TeO₂) glasses. *Radiat Phys Chem.* 2017;130:335-342. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.09.019>
30. Obaid SS, Sayyed MI, Gaikwad DK, Pawar PP. Attenuation coefficients and exposure buildup factor of some rocks for gamma ray shielding applications. *Radiat Phys Chem.* 2018;148:86-94. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.02.026>
31. Mahmoud KA, El-Agwany FI, Rammah YS, Tashlykov OL. Gamma ray shielding capacity and build up factors of CdO doped lithium borate glasses: theoretical and simulation study. *J Non-Cryst Solids.* 2020;541:120110. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2020.120110>
32. Alda'ajeh MM, Sharaf JM, Saleh HH, Hamideen MS. Determination of buildup factors for some human tissues using both MCNP5 and Phy-X/PSD. *Nucl Eng Technol.* 2023;55:4426-4430. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.08.025>
33. Sabry N, Zahran HY, Yousef EIS, Algarni H, Umar A, Albargi HB, et al. Gamma-ray attenuation, fast neutron removal cross-section and build up factor of Cu₂MnGe[S,Se,Te]₄ semiconductor compounds: Novel approach. *Radiat Phys Chem.* 2021;179:109248. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109248>
34. Kulwinder Singh M. Measurement of exposure buildup factors: The influence of scattered photons on gamma-ray attenuation coefficients. *Nucl Instrum Methods Phys Res A or NIM A* 2018;877:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.08.047>
35. Pathak V. To study buildup factor in concrete. *Neuroquantology* 2022;20:4217-4226. <https://doi.org/10.48047/NQ.2022.20.7.NQ33513>
36. Knoll GF. Radiation detection and measurement. 4th ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2010.
37. Kaur S, Karol V, Kumar P, Kaur G, Sharma P, Saroa A, et al. Energy build-up factors estimation for BaZr_{0.10}Ti_{0.90}O₃, Ba_{0.90}La_{0.10}TiO₃ and Ba_{0.90}La_{0.10}Zr_{0.10}Ti_{0.90}O₃ ceramics in shielding applications. *Nucl Eng Technol.* 2024;56:1822-1829. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.12.039>
38. Singh PS, Singh PT, Kaur P. Variation of energy absorption buildup factors with incident photon energy and penetration depth for some commonly used solvents. *Ann Nucl Energy* 2008;35:1093-1097. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.10.007>
39. Alavian H, Tavakoli-Anbaran. Study on effect of detector type in estimating buildup factor of gamma-rays by monte carlo simulation based on variance reduction. *J Radiat Saf Meas.* 2018;6(4):65-79 (In Persian). <https://doi.org/10.22052/6.4.65>
40. Tsoulfanidis N, Landsberger S. Measurement and detection of radiation. 3rd ed. Boca Raton (FL): Taylor & Francis; 2010.
41. De Deene Y, Hurley C, Venning A, Vergote K, Mather M, Healy BJ, et al. A basic study of some normoxic polymer gel dosimeters. *Phys Med Biol.* 2002; 47: 3441–3463. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/47/19/301>
42. Venning AJ, Brindha S, Hill B, Baldock C. Preliminary study of a normoxic PAG gel dosimeter with tetrakis (hydroxymethyl) phosphonium chloride as an anti-oxidant. *J Phys: Conf Ser.* 2004;3:155–158.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/3/1/016>

43. XCOM: Photon Cross Sections Database [Internet]. Gaithersburg (MD): National Institute of Standards and

Technology (NIST); [cited 2025 May 31]. Available from: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.