مقاله پژوهشی

مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۷، شمارهٔ ۲، بهار ۱۳۹۸، صفحه ۳۵-۴۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۰۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۳

اندازه‌گیری دز جذبی در ژل پلیمر نوع نورموکسیک و بررسی اثر چیدمان نانوذرات طلا

ابوالفضل محمودی* و حسین توکلی‌عنبران

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران.

*سمنان، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۷۵۹۳۳-۴۹۶۱۷

پست‌الکترونیکی: abolfazl.mahmoodi9938@gmail.com

چکیده

پرتودرمانی در برگیرنده همه روش‌هایی است که بتواند اندازه‌ی ویژه‌ای از تابش‌های یونیزان را به بافت‌های بدخیم برساند، با این فرض که حداقل آسیب به بافت‌های سالم رسانده شود و ارائه یک روش ارزشمند و قابل اعتماد در اندازه‌گیری دز جذبی می‌تواند مفید باشد. امروزه امکان اندازه‌گیری توزیع دز جذبی در سه بعد وجود دارد که یکی از روش‌های دزیمتری سه‌بعدی نیز به کارگیری ژل‌های پلیمری حساس به پرتو است. هدف از مطالعه حاضر، محاسبه مقدار افزایش دز جذبی با حضور نانوذرات طلا و بررسی نوع چیدمان نانوذرات طلا (به طور یکنواخت و پوسته‌ای) در ژل پلیمر نوع نورموکسیک می‌باشد. در این پژوهش از هر دو رهیافت تجربی و شبیه‌سازی، از دزیمتر ژل پلیمر نوع نورموکسیک برای اندازه‌گیری مقدار تغییرات دز جذبی پرتوهای گاما با حضور نانوذرات طلا که تحت تابش پرتوهای چشمه ایریدیم-۱۹۲ قرار گرفتند، استفاده شد. مراحل خوانش مقدار دز با کمک دستگاه قرائت‌گر دزیمتر ترمولومینسانس انجام گرفت و سپس با استفاده از روش مونت‌کارلو کد محاسباتی MCNPX شبیه‌سازی انجام شد و نتایج آن با آزمایش تجربی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. با حضور یکنواخت نانوذرات طلا در ژل پلیمر، بیشینه دز جذبی به ازای غلظت ۰/۱ mM تا ۱/۵ mM، ۰/۲۴٪ و در حالت پوسته ای ۲۰٪ به‌دست آمد. نتایج و بررسی‌های هر دو مطالعه که به‌صورت تجربی و شبیه سازی به‌دست آمد، نشان می‌دهد که بهینه غلظت نانوذرات طلا در ژل پلیمر نوع نورموکسیک ۱/۵ mM می‌باشد، که برای انجام مطالعات کلینیکی می‌توان از آن استفاده کرد.

کلیدواژگان: دزیمتری، نانوذرات طلا، ژل پلیمر نورموکسیک، فانتوم، مونت‌کارلو.

۱. مقدمه

پرتودرمانی 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. به‌همین دلیل بررسی صحیح و دقیق دز داده شده ضروری به‌نظر می‌رسد. از آن جا که هدف درمان‌های پرتودرمانی یا براکی‌تراپی و BNCT[1] رساندن حداکثر دز به سلول‌های توموری و کمترین تابشی‌دهی به سلول‌های سالم است، در نتیجه پرتوگیری بافت سالم غالباً یک نگرانی در پرتودرمانی محسوب می‌گردد [۱، ۲ و۳]. این درمان به روش تحویل دز و خطاهای موجود در آن بسیار

[1] Boron Neutron Capture Therapy

حساس است. در دهه‌های گذشته از آب به‌عنوان فانتوم برای بررسی دز استفاده می‌کردند، که خواصی مشابه با بافت نرم بدن انسان دارد. که این روش دارای خطاهایی نیز بوده است. برای کاهش این خطاها، دزیمترهای سه‌بعدی به‌عنوان یک روش نسبی برای بررسی و مونیتورینگ دقیق تحویل دز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند [٤]. دزیمترهای شیمیایی همواره یکی از کاندیدهای مناسب برای اندازه‌گیری دز به صورت سه بعدی بوده‌اند. انواع مختلف دزیمتر سه‌بعدی وجود دارد که به آن‌ها عموماً ژل دزیمتری گفته می‌شود. که در این تحقیق از ژل پلیمر دزیمتر نوع نورموکسیک با علامت اختصاری MAGIC[1] استفاده شده است [٥، ٦]. ویژگی‌هایی از قبیل پایداری، تمامیت فضایی، حساس نبودن به دما، وابستگی به آهنگ دز، مستقل بودن نسبت به انرژی و معادل بودن ژل‌های پلیمری موجب شده تا کاربردهای وسیعی داشته باشند. تاکنون از ژل پلیمری به‌عنوان فانتوم در آزمایشات و تحقیق‌ها به‌عنوان دزیمترهای سه‌بعدی استفاده کرده‌اند [٧]. در این تحقیق دز جذبی فانتوم ژل پلیمر دزیمتری از نوع نورموکسیک به روش تجربی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو در حضور چشمه ایریدیم-۱۹۲ مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین مقدار فاکتور افزایش دز جذبی در ژل پلیمر نوع نورموکسیک و اثرات مربوط به چیدمان نانوذرات طلا در ژل که به‌عنوان عنصری با عدد اتمی بالا محسوب می‌شود، تحت تابش پرتوهای گامای چشمه ایریدیم-۱۹۲ مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مواد و روش کار

۱.۲. شبیه‌سازی مونت‌کارلو

کد MCNPX یکی از نرم‌افزارهایی است که کاربرد فراوانی در زمینه دزیمتری و طراحی درمان دارد، از قابلیت‌های کد، امکان به کارگیری مواد مختلف به‌صورت ترکیب یا آلیاژ می‌باشد. محاسبات انجام شده در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو کد MCNPX صورت گرفت. شبیه‌سازی فانتوم‌های ژل پلیمر به‌صورت استوانه‌ای با ارتفاع ۹ cm و شعاع ۵/۱ cm درحالتی که محلول نانوذرات طلا به صورت یکنواخت با غلظت‌های مختلف ۰/۱ mM، ۰/۵ mM، ۱ mM و ۱/۵ mM در ژل پلیمر قرار دارد، طراحی شد. همچنین فانتوم ژل پلیمر استوانه‌ای دیگری با ارتفاع ۷/۵ cm و شعاع ۲/٤۹٤ cm در حالتی که محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای با ضخامت ۰/۰۱۲۱ cm تا ۰/۱۸۲ cm در اطراف فانتوم قرار دارد، طراحی شد. ضمن اینکه مقدار محلول نانوذرات طلای مورد استفاده در هر دو حالت یکسان و نیز از چشمه ایریدیم -۱۹۲ به صورت چشمه‌ی نقطه‌ای در مرکز فانتوم‌ها استفاده شد. در کد MCNPX تالی F8* (دز جذب برحسب MeV) و تالی F5* (دز جذبی برحسب MeV/cm^2) به ازای تعداد یکسانی از ذرات ترابرد شدند، که این مقدار تالی‌ها بر حسب غلظت‌های مختلف ژل پلیمری با حضور محلول نانوذرات طلا به طور جداگانه محاسبه و نتایج به‌دست آمده با هم مقایسه شدند. لازم به ذکر است که برای محاسبه دز با استفاده از تالی F8* باید مقدار به‌دست آمده را بر جرم سلول تقسیم کرد تا واحد آن برحسب (MeV/gr) به‌دست آید.

۲.۲. ساخت ژل پلیمر حساس به پرتو

روش ساخت ژل مشابه روش ارائه‌شده توسط فانگ[2] و همکارانش در سال ۲۰۰۱ است [۸]. به‌طور خلاصه جهت ساخت ۱۰۰۰ گرم از این نوع ژل ۸۰ گرم (۸ درصد وزنی) ژلاتین (۳۰۰ بلوم، نوع A)، ۹۰ گرم (۹ درصد وزنی) اسید متاآکریلیک، ۰/۳۵۲ گرم (۰/۰۳۵۲ درصد وزنی) اسید آسکوربیک، ۰/۰۲ گرم (۰/۰۰۲ درصد وزنی) سولفات مس

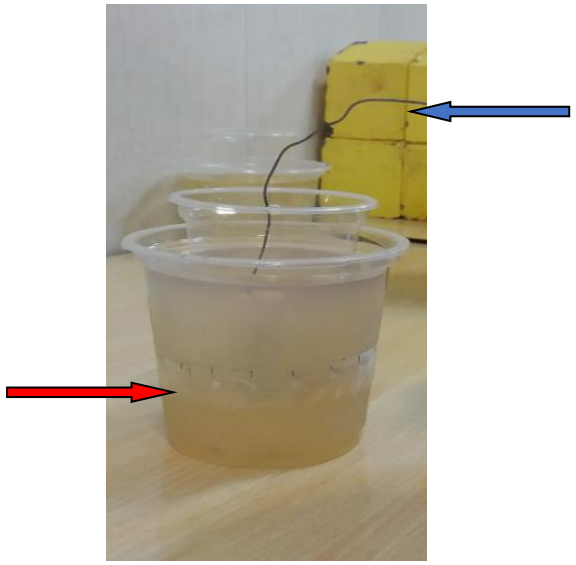
[1] Meta crylic acid and Ascorbic acid in Gelatin Initiated with Copper

[2] Fong

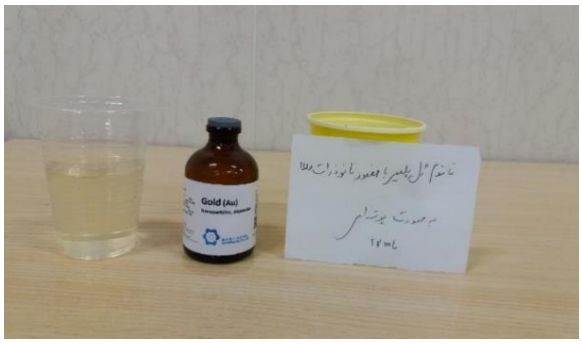
پنتا هیدرات، ۲ گرم (۰/۲ درصد وزنی) هیدروکینون، ۸۲۸ گرم (۸۲/۷۶۲۸ درصد وزنی) آب دوبار تقطیر شده مورد نیاز است که به کمک ترازوی دیجیتالی جدا شدند. ابتدا ژلاتین را با حدود ۶۹۳ سی‌سی آب در داخل بشر ریخته و برای مدت ۲۵ دقیقه اجازه داده شده تا کاملاً ببندد، در این مرحله ژل حالتی بین جامد و مایع داشت. سپس به آن به‌تدریج حرارت داده شد تا به دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد برسد، در این مرحله ترکیب، ظاهری شفاف پیدا می‌کند. در این دما هیدروکنیون که در ۵۰ سی‌سی آب حل شده بود به ترکیب اضافه شد و هیتر خاموش گردید.

پس از این که دمای محلول به ۳۷ درجه سانتی‌گراد رسید، ابتدا اسید آسکوربیک که در ۵۰ سی‌سی آب حل شده بود، اضافه گردید، سپس سولفات مس را که در ۳۵ سی‌سی آب حل شده بود اضافه شد، حدود ۳۰ ثانیه بعد اسید متاآکریلیک اضافه گردید. دما در حین فرآیند ساخت به دقت به کمک دماسنج الکلی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. پس از چند دقیقه هم‌زدن، ژل پلیمر آماده شد. از ژل پلیمر ساخته شده، به مقدار مورد نیاز حجم فانتوم‌ها برداشته شد و محلول نانوذرات طلا با غلظت ۱/۵ mM به آن اضافه شد و به روش مکانیکی هم‌زده شد به‌طوری که ترکیب یکنواخت از ژل پلیمر به‌دست آید. همچنین محلول نانوذرات طلا به‌صورت پوسته‌ای با ضخامت ۰/۱۸۲ cm در اطراف فانتوم قرار گرفت، که در شکل ۱و۲ نشان داده شده است.

نانوذرات طلای مورد استفاده در این تحقیق به صورت محلول و اندازه ذرات کمتر از ۲۵ nm با غلظت ۷۰۰ ppm می‌باشد. که در شرکت نانو فن‌آوران سپهر شرق تولید و تهیه شده است.



شکل (۱): فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به‌طور یکنواخت.



شکل (۲): فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای.

۳,۲ پرتودهی

پرتودهی فانتوم حاوی ژل پلیمر و فانتوم‌های حاوی ژل پلیمر با حضور محلول نانوذرات طلا، ۲٤ ساعت پس از ساخت ژل پلیمر با رعایت نکات حفاظت در برابر پرتو انجام شد. چشمه‌ی مورد استفاده جهت پرتودهی که در مرکز فانتوم‌ها قرار گرفت، ایریدیم-۱۹۲ بود که پرتوهای گاما با انرژی ۱۱۰/۰۹۳۱۹ تا ۱۳۷۸/۳۵ کیلوالکترون‌ولت (keV) گسیل می‌کند [۹].

چشمه ایریدیم به وسیله سیمی متصل بـه آن در مرکـز فـانتوم قرار گرفت که در شکل ۱ با نشانگر آبی رنـگ مشـخص شـده است.

۴،۲. اندازه‌گیری دز جذبی در فانتوم‌ها به‌صورت تجربی

پـس از سـاخت ژل پلیمـر در اطـراف فـانتوم‌هـا قـرص‌هـای TLD(100)[1] در زوایه‌های ۰ تا ۸۰ درجه به فاصـله ۲۰ درجـه از یک‌دیگر قرار گرفت، که در شکل ۱ با نشـانگر قرمـز رنـگ مشخص شده است. ایـن قـرص‌هـا در زمـان پرتـودهی بـرای اندازه‌گیری دز جذبی مورد استفاده قرار گرفت و به این ترتیب و به کمک دستگاه خوانش دزیمتـر ترمولومینسـانس میـزان دز جذبی اندازه‌گیری شد.

۵،۲. فاکتور افزایش دز

مقدار فاکتور افزایش دز جذبی که آن را بـا علامـت اختصـاری DEF[2] نشان می‌دهند، پس از محاسبه دز جـذبی در فـانتوم ژل پلیمر نورموکسیک و محاسـبه دز جـذبی در ایـن فـانتوم‌هـا بـا حضور محلول نانوذرات طلا در غلظت‌های مختلف از رابطه ۱ به‌دست می‌آید:

$$DEF = \frac{Dose(NP\,MAGIC) - Dose(MAGIC)}{Dose(MAGIC)} \times 100 \qquad (۱)$$

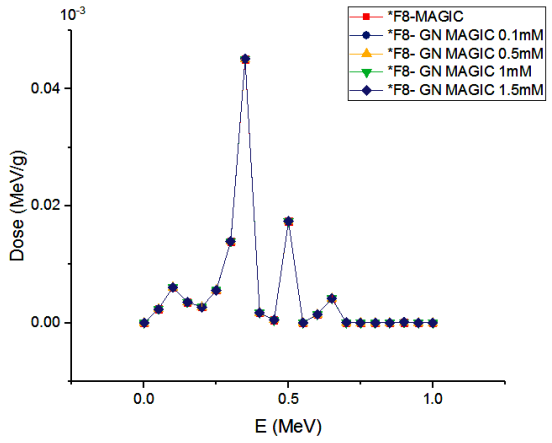
که در این رابطه MAGIC علامت اختصاری فانتوم ژل پلیمـر نورموکسـیک و NP MAGIC علامـت اختصـاری فـانتوم ژل پلیمر نورموکسیک با حضور نانوذرات است.

به کمک رابطه ۱ مقدار افزایش دز جذبی یا همان اخـتلاف نسبی مورد محاسبه و بررسی قرار گرفت.

۳. یافته‌ها

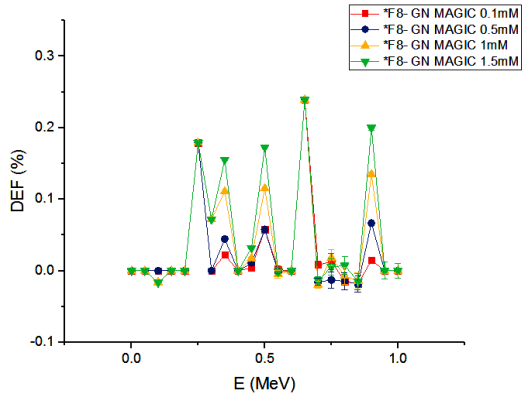
با استفاده از کد شبیه‌سـازی مونـت‌کـارلو مقـدار دز جـذبی در فانتوم ژل پلیمر با حضور محلول نانوذرات طلا با غلظـت‌هـای مختلف به‌طور یکنواخت محاسـبه شـد. در شـکل ۳ مقـدار دز جذبی با استفاده از تالی F8* بـرای ایـن فـانتوم‌هـا محاسـبه و مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین محاسبات شبیه‌سـازی نشـان داد که بیشینه مقدار دز جذبی با حضور محلول نـانوذرات طـلا در ژل پلیمر بر اساس رابطه ۱، ۰/۲٤٪ است، نمـودار اخـتلاف نسبی بین مقادیر دز جذبی برای فانتوم‌ها در شکل ٤ بر حسـب انرژی رسم شده است.

در شکل ۵ دز جذبی بر حسب انرژی چشمه ایریدیم-۱۹۲ برای فانتوم‌های ژل پلیمر با حضور محلول نـانوذرات طـلا بـه صورت پوسته‌ای برای ضخامت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ٦ نمودار اختلاف نسبی برای فـانتوم‌هـای ژل پلیمر با حضور محلول نـانوذرات طـلا بـه صـورت پوسـته‌ای بررسی شده، که بیشینه مقدار دز جذبی در این حالت ۲۰٪ بود.

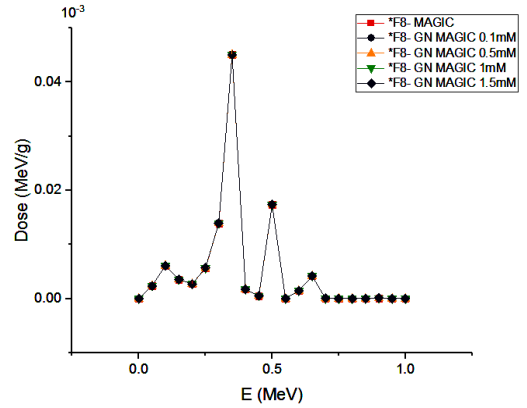


شکل (۳): بررسی مقادیر دز جذبی در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا در فانتوم ژل پلیمر به‌طور یکنواخت در غلظت‌های مختلف.

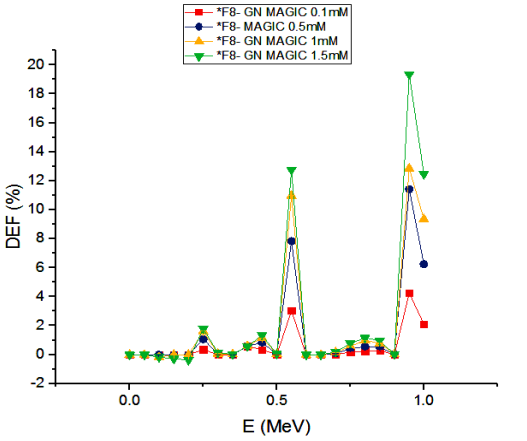
[1] Thermo Luminescent Dosimeter
[2] Dose Enhancement Factor



شکل (۴): نمودار اختلاف نسبی دز در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به‌طور یکنواخت با غلظت‌های مختلف.



شکل (۵): بررسی مقادیر دز جذبی در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای در اطراف فانتوم‌ها.

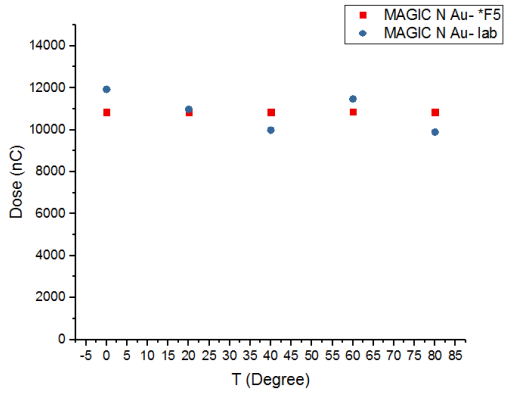


شکل (۶): نمودار اختلاف نسبی دز در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضورمحلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای.

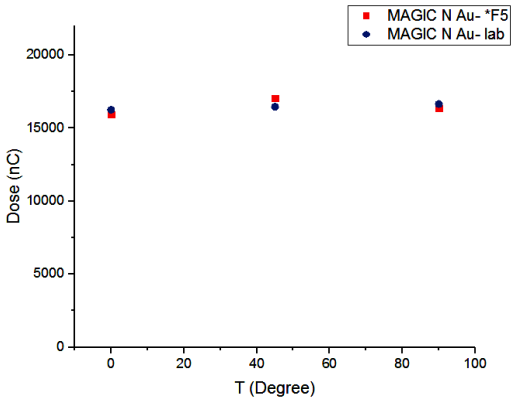
برای مقایسه نتایج دز جذبی شبیه‌سازی و آزمایشگاه برای فانتوم ژل پلیمر با حضور محلول نانوذرات طلا به‌طور یکنواخت، نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی با کمک تالی F5* برای دز جذبی در فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا با نتایج تجربی به‌دست آمده از آزمایشات تجربی به کمک قرص‌های TLD(100)، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که در شکل ۷ نشان داده شده است.

همچنین برای مقایسه نتایج دز جذبی شبیه‌سازی و آزمایشگاه برای فانتوم ژل پلیمر با حضور محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای، نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی با کمک تالی F5* برای دز جذبی در فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا با نتایج تجربی به‌دست آمده از آزمایشات تجربی به کمک قرص‌های TLD(100)، نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که در شکل ۸ نشان داده شده است.

چون برای اندازه‌گیری دز جذبی به‌صورت تجربی در آزمایشگاه از قرص‌های TLD(100) در اطراف فانتوم با مختصات مکانی مشخص استفاده شده بود، برای مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج محاسبات شبیه‌سازی از تالی F5* به این دلیل استفاده شده که این تالی به تالی آشکارساز نقطه‌ای معروف است و برای محاسبه شار عبوری یک ذره در یک نقطه‌ی خاص استفاده می‌شود، و با توجه به تبدیل ضرایب شار به دز مطابق با APPENDIX H DOSE FACTORS در MCNP MANUAL دزجذبی به‌دست آمد.

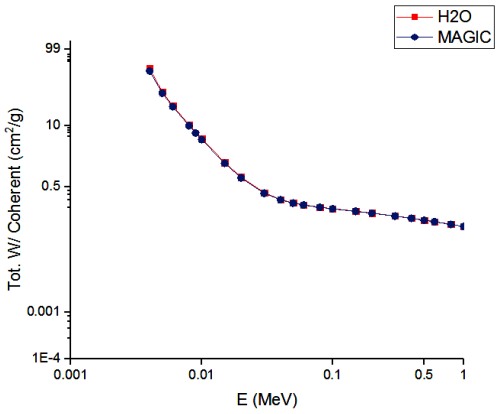


شکل (۷): مقایسه دز جذبی در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به‌طور یکنواخت با غلظت ۱/۵ mM به دو روش شبیه‌سازی و تجربی.



شکل (۸): مقایسه دز جذبی در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به طور پوسته‌ای با ضخامت ۰/۱۸۲ cm به دو روش شبیه‌سازی و تجربی.

همچنین برای فانتوم‌های آب و ژل پلیمر نورموکسیک ضریب تضعیف جرمی نیز مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۹ نشان داده شده و تطابق مناسبی را نشان می‌دهد.



شکل(۹): نمودار ضریب تضعیف جرمی بر حسب انرژی در فانتوم‌های آب و ژل پلیمر نورموکسیک [۱۰].

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج شبیه سازی و مقایسه‌ای که بین ضریب تضعیف جرمی ژل پلیمر نورموکسیک و ضریب تضعیف جرمی آب انجام شد و در شکل ۹ نیز نشان داده شده است، نتیجه می‌شود که از فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک همانند فانتوم آب می‌توان به‌عنوان بافت نرم بدن انسان استفاده کرد. با این ویژگی که فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک یکی از دزیمترهای سه بعدی حساس به پرتو می‌باشد و می‌توان دز جذبی را بهتر در عمق‌های مختلف به صورت لایه به لایه بررسی کرد و نسبت به دیگر فانتوم‌های سه بعدی نیز ارزان‌تر خواهد بود. با توجه به شکل‌های ۳ و ۵ در بازه انرژی بین ۰ MeV تا ۰/۵ MeV دز جذبی بیشترین مقدار را دارد. زیرا با توجه به مشخصات چشمه‌ی ایریدیم-۱۹۲ در این بازه‌ی انرژی، بیشترین شدت و یا احتمالات نسبت به انرژی‌های دیگر واقع در بازه‌ی ۰ تا ۱ MeV وجود دارد. نتایج و بررسی‌های این مطالعه که به صورت شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی به‌دست آمدند، نشان می‌دهند با حضور محلول نانوذرات طلا در فانتوم ژل پلیمر نوع نورموکسیک به‌صورت یکنواخت با بهینه غلظت ۱/۵ mM بیشینه مقدار دز جذبی با افزایش ۰/۲٤٪ و همین طور با حضور محلول نانوذرات طلا در ژل پلیمر نوع نورموکسیک به صورت پوسته‌ای در اطراف فانتوم ژل پلیمر با بهینه غلظت ۱/۵ mM بیشینه مقدار دز جذبی با افزایش ۲۰٪ حاصل شد و بررسی در شکل‌های ۷ و ۸ و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی نشان می‌دهد که تفاوت معناداری بین آن‌ها وجود ندارد و لازم به ذکر هست که بیشینه خطای نسبی محاسبات کد MCNP در این تحقیق از مرتبه 10^{-4} و خطای مطلق داده‌های تجربی دستگاه قرائت‌گر ۰/۰۷ می‌باشد. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد اضافه شدن محلول نانوذرات طلا با عدد اتمی بالا و غلظت به‌دست آمده می‌تواند بیشترین افزایش دز را به همراه داشته باشد زیرا بر اساس قوانین برهم‌کنش فوتون با ماده، احتمال جذب فوتوالکتریک تقریباً با توان سوم عدد اتمی ماده هدف، رابطه مستقیم و با توان سوم انرژی فوتون تابشی نسبت عکس دارد. از این رو، استفاده از محلول نانوذرات طلا با عدد اتمی بالا به همراه پرتوهای فوتونی کم‌انرژی به‌منظور افزایش دز جذبی را به همراه دارد. هرچند نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که حضور نانوذرات طلا با عدد اتمی بالا در فانتوم ژل پلیمر موجب افزایش دز جذبی می‌شود. با این حال مطالعات

متعددی لازم است تا این ایده به عنوان یکی از روش‌های رادیوتراپی هدفمند به‌طور بالینی مورد استفاده قرار گیرد. چنانچه بتوان در کاربردهای کلینیکی با استفاده از برچسب‌کردن نانوذرات با عدد اتمی بالا با گیرنده‌های مناسب ضمن رساندن غلظت مناسبی از آن‌ها به داخل تومور، وجود نانوذرات را فقط به حجم تومور منحصر کرد، حداکثر دز می‌تواند به تومور داده شود، در حالی که بافت‌های نرمال پیرامونی حداقل مقدار ممکن دز را دریافت می‌کنند.

۵. مراجع

[1] H. Tavakoli-Anbaran, A. Mahmoodi. Increased Absorption Dose with the Presence of Gold Nano Particles in a Normoxic Polymer Gel Method Monte Carlo: Iranian Journal Physics. 15 (2018) 86–86.

[2] H. Tavakoli-Anbaran, OL. Ahmadi. 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: ssu- journals. 24 (2016) 618–629.

[3] F. Rahmani, S. Seife, H. Tavakoli-Anbaran, F. ghasemi. Design of photon converter and photoneutron target for High power electron accelerator based BNCT: Applied Radiation and isotopes. 106 (2015) 45–48

[٤] محمودی، ابوالفضل. توکلی عنبران، حسین. مقدار دز جذبی در فانتوم‌های آب و ژل پلیمر نوع نورموکسیک: به روش مونت‌کارلو. کنفرانس فیزیک ایران، ۵ تا ۸ شهریور، قزوین، (۱۳۹۷).

[5] M. Alqathami, A. Blencowe Qiao, J. Adamovics, M. Geso. Optimizing the sensitivity and radiological properties of the PRESAGEs dosimeter using metal compounds. Rad Phys and Chem; 81 (2012) 1688–1695.

[٦] بنائی‌رضائیه، نوشین. مروری بر انواع دزیمترهای سه بعدی. مجله علوم پزشکی رازی، سال ۲۲، شماره ۱۳۸، آذر(۱۳۹٤) صفحه ۱ تا ۷.

[7] C. Baldock, Y. De Deene, S. Doran, G. Ibbott, A. Jirasek, M. Lepage, KB. McAuley, M. Oldham, LJ. Schreiner. polymer gel dosimetry. Phys Med Boil. 55 (2010) R1–R63.

[8] P.M. Fong, D.Z. Kiel, M.D. Does, J.C. Core. polymer gels for magnetic resonance imaging of radiation does distributions at normal room atmosphere. Phys med boil. 46 (2001) 3105–3113.

[9] WWW Table of Radioactive Isotopes. NuclearData. nuclear. lu. Se /toi/ radSearh. asp .

[10]https://physics.nist.gov/physRefData/Xcom/html/xcom1.html