

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: 49617-75933

پست الکترونیکی: 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-192 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 0/1 mM تا 0/24 mM و در حالت پوسته‌ای 20٪ به‌دست آمد. نتایج و بررسی‌های هر دو مطالعه که به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی به‌دست آمد، نشان می‌دهد که بهینه غلظت نانوذرات طلا در ژل پلیمر نوع نورموکسیک 1/5 mM می‌باشد، که برای انجام مطالعات کلینیکی می‌توان از آن استفاده کرد.

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

1. مقدمه

که هدف درمان‌های پرتودرمانی یا براکی‌تراپی و BNCT¹ 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 [1، 2 و 3]. این درمان به روش تحویل دز و خطاهای موجود در آن بسیار

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

¹ Boron Neutron Capture Therapy

محاسبات انجام شده در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو کد MCNPX صورت گرفت. شبیه‌سازی فانتم‌های ژل پلیمر به صورت استوانه‌ای با ارتفاع 9 cm و شعاع 5/1 cm درحالی که محلول نانوذرات طلا به صورت پکنواخت با غلظت‌های مختلف 0/1 mM، 0/5 mM، 1 mM و 1/5 mM در ژل پلیمر قرار دارد، طراحی شد. همچنین فانتم ژل پلیمر استوانه‌ای دیگری با ارتفاع 7/5 cm و شعاع 2/494 cm درحالی که محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای با ضخامت 0/0121 cm تا 0/182 cm در اطراف فانتم قرار دارد، طراحی شد. ضمن اینکه مقدار محلول نانوذرات طلای مورد استفاده در هر دو حالت یکسان و نیز از چشمه ایریدیم-192 به صورت چشمه‌ی نقطه‌ای در مرکز فانتم‌ها استفاده شد. در کد MCNPX تالی F8* (دز جذب برحسب MeV) و تالی F5* (دز جذبی برحسب MeV/cm²) به ازای تعداد یکسانی از ذرات برابر شدند، که این مقدار تالی‌ها بر حسب غلظت‌های مختلف ژل پلیمری با حضور محلول نانوذرات طلا به طور جداگانه محاسبه و نتایج به دست آمده با هم مقایسه شدند. لازم به ذکر است که برای محاسبه دز با استفاده از تالی F8* باید مقدار به دست آمده را بر جرم سلول تقسیم کرد تا واحد آن برحسب (MeV/gr) به دست آید.

2.2. ساخت ژل پلیمر حساس به پرتو

روش ساخت ژل مشابه روش ارائه شده توسط فانگ² و همکارانش در سال 2001 است [8]. به طور خلاصه جهت ساخت 1000 گرم از این نوع ژل 80 گرم (8 درصد وزنی) ژلاتین (300 بلوم، نوع A)، 90 گرم (9 درصد وزنی) اسید متاآکریلیک، 0/352 گرم (0/0352 درصد وزنی) اسید آسکوربیک، 0/02 گرم (0/002 درصد وزنی) سولفات مس

حساس است. در دهه‌های گذشته از آب به عنوان فانتم 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 سه بعدی به عنوان یک روش نسبی برای بررسی و مونیتورینگ دقیق تحویل دز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند [4]. دزیمترهای شیمیایی همواره یکی از کاندیدهای مناسب برای اندازه‌گیری دز به صورت سه بعدی بوده‌اند. انواع مختلف دزیمتر سه بعدی وجود دارد که به آن‌ها عموماً ژل دزیمتری گفته می‌شود. که در این تحقیق از ژل پلیمر دزیمتر نوع نورموکسیک با علامت اختصاری¹ MAGIC استفاده شده است [5، 6]. 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 به عنوان فانتم در آزمایشات و تحقیق‌ها به عنوان دزیمترهای سه بعدی استفاده کرده‌اند [7]. در این تحقیق دز جذبی فانتم ژل پلیمر دزیمتری از نوع نورموکسیک به روش تجربی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو در حضور چشمه ایریدیم-192 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 به عنوان عنصری با عدد اتمی بالا محسوب می‌شود، تحت تابش پرتوهای گامای چشمه ایریدیم-192 مورد بررسی قرار گرفت.

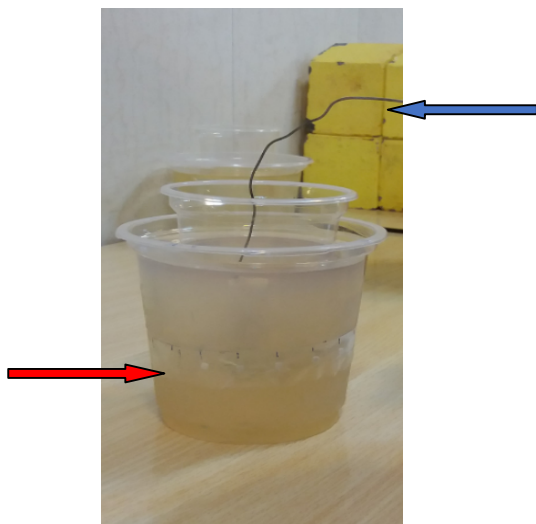
2. مواد و روش کار

1.1. شبیه‌سازی مونت‌کارلو

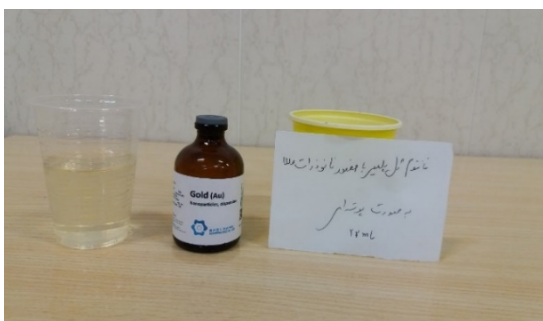
کد MCNPX یکی از نرم‌افزارهایی است که کاربرد فراوانی در زمینه دزیمتری و طراحی درمان دارد، از قابلیت‌های کد، امکان به کارگیری مواد مختلف به صورت ترکیب یا آلیاژ می‌باشد.

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

² Fong



شکل (1): فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به طور یکنواخت.



شکل (2): فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای.

3.2 پرتودهی

پرتودهی فانتوم حاوی ژل پلیمر و فانتوم‌های حاوی ژل پلیمر با حضور محلول نانوذرات طلا، 24 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-192 بود که پرتوهای گاما با انرژی 110/09319 تا 1378/35 کیلو الکترون‌ولت (keV) گسیل می‌کند [9].

پنتا هیدرات، 2 گرم (0/2 درصد وزنی) هیدروکینون، 828 گرم (82/7628 درصد وزنی) آب دوبار تقطیر شده مورد نیاز است که به کمک ترازوی دیجیتالی جدا شدند. ابتدا ژلاتین را با حدود 693 سی‌سی آب در داخل بشر ریخته و برای مدت 25 دقیقه اجازه داده تا کاملاً ببندد، در این مرحله ژل حالتی بین جامد و مایع داشت. سپس به آن به تدریج حرارت داده شد تا به دمای 50 درجه سانتی‌گراد برسد، در این مرحله ترکیب، ظاهری شفاف پیدا می‌کند. در این دما هیدروکینون که در 50 سی‌سی آب حل شده بود به ترکیب اضافه شد و هیتز خاموش گردید.

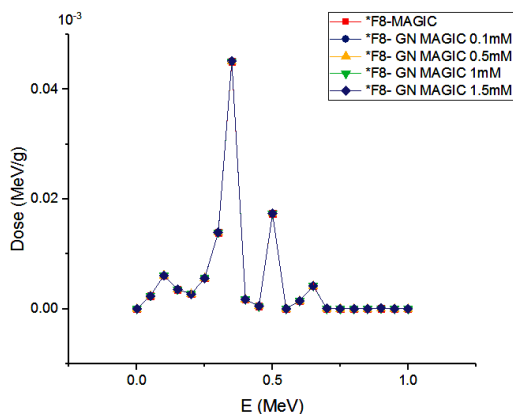
پس از این که دمای محلول به 37 درجه سانتی‌گراد رسید، ابتدا اسید آسکوربیک که در 50 سی‌سی آب حل شده بود، اضافه گردید، سپس سولفات مس را که در 35 سی‌سی آب حل شده بود اضافه شد، حدود 30 ثانیه بعد اسید متاآکریلیک اضافه گردید. دما در حین فرآیند ساخت به دقت به کمک دماسنج الکلی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. پس از 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 1/5 mM به آن اضافه شد و به روش مکانیکی هم‌زده شد به طوری که ترکیب یکنواخت از ژل پلیمر به دست آید. همچنین محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای با ضخامت 0/182 cm در اطراف فانتوم قرار گرفت، که در شکل 1 و 2 نشان داده شده است.

نانوذرات طلای مورد استفاده در این تحقیق به صورت محلول و اندازه ذرات کمتر از 25 nm با غلظت 700 ppm می‌باشد. که در شرکت نانو فن‌آوران سپهر شرق تولید و تهیه شده است.

3. یافته‌ها

با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقدار دز جذبی در فانتوم ژل پلیمر با حضور محلول نانوذرات طلا با غلظت‌های مختلف به‌طور یکنواخت محاسبه شد. در شکل 3 مقدار دز جذبی با استفاده از تالی *F8 برای این فانتوم‌ها محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین محاسبات شبیه‌سازی نشان داد که بیشینه مقدار دز جذبی با حضور محلول نانوذرات طلا در ژل پلیمر بر اساس رابطه 1، 0/24% است، نمودار اختلاف نسبی بین مقادیر دز جذبی برای فانتوم‌ها در شکل 4 بر حسب انرژی رسم شده است.

در شکل 5 دز جذبی بر حسب انرژی چشمه ایریدیم-192 برای فانتوم‌های ژل پلیمر با حضور محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای برای ضخامت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل 6 نمودار اختلاف نسبی برای فانتوم‌های ژل پلیمر با حضور محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای بررسی شده، که بیشینه مقدار دز جذبی در این حالت 20% بود.



شکل (3): بررسی مقادیر دز جذبی در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا در فانتوم ژل پلیمر به‌طور یکنواخت در غلظت‌های مختلف.

چشمه ایریدیم به وسیله سیمی متصل به آن در مرکز فانتوم قرار گرفت که در شکل 1 با نشانگر آبی رنگ مشخص شده است.

4.2. اندازه‌گیری دز جذبی در فانتوم‌ها به‌صورت تجربی

پس از ساخت ژل پلیمر در اطراف فانتوم‌ها قرص‌های ^{100}TLD در زوایه‌های 0 تا 80 درجه به فاصله 20 درجه از یکدیگر قرار گرفت، که در شکل 1 با نشانگر قرمز رنگ مشخص شده است. این قرص‌ها در زمان پرتودهی برای اندازه‌گیری دز جذبی مورد استفاده قرار گرفت و به این ترتیب و به کمک دستگاه خوانش دزیمتر ترمولومینسانس میزان دز جذبی اندازه‌گیری شد.

5.2. فاکتور افزایش دز

مقدار فاکتور افزایش دز جذبی که آن را با علامت اختصاری DEF^2 نشان می‌دهند، پس از محاسبه دز جذبی در فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک و محاسبه دز جذبی در این فانتوم‌ها با حضور محلول نانوذرات طلا در غلظت‌های مختلف از رابطه 1 به‌دست می‌آید:

$$DEF = \frac{Dose(NP\ MAGIC) - Dose(MAGIC)}{Dose(MAGIC)} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه MAGIC علامت اختصاری فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک و NP MAGIC علامت اختصاری فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک با حضور نانوذرات است.

به کمک رابطه 1 مقدار افزایش دز جذبی یا همان اختلاف نسبی مورد محاسبه و بررسی قرار گرفت.

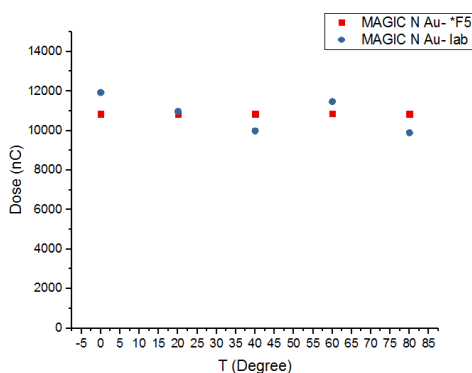
¹ Thermo Luminescent Dosimeter

² Dose Enhancement Factor

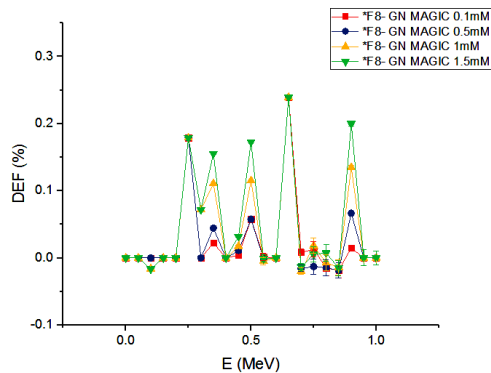
محلول نانوذرات طلا با نتایج تجربی به‌دست آمده از آزمایشات تجربی به کمک قرص‌های TLD(100)، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که در شکل 7 نشان داده شده است.

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 8 نشان داده شده است.

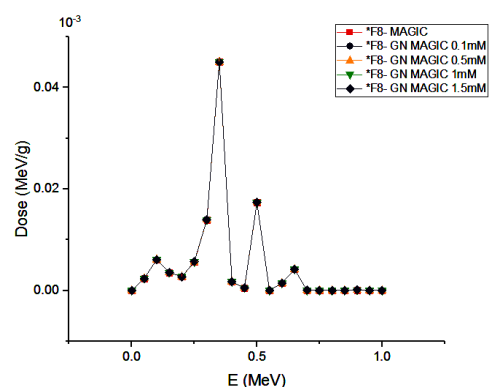
چون برای اندازه‌گیری دز جذبی به‌صورت تجربی در آزمایشگاه از قرص‌های TLD(100) در اطراف فانتوم با مختصات مکانی مشخص استفاده شده بود، برای مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج محاسبات شبیه‌سازی از تالی F5* به این دلیل استفاده شده که این تالی به تالی آشکارساز نقطه‌ای معروف است و برای محاسبه شار عبوری یک ذره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



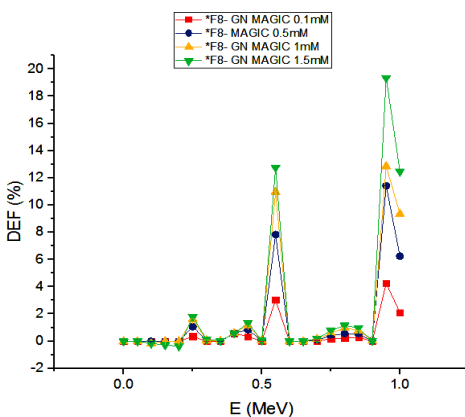
شکل (7): مقایسه دز جذبی در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به‌طور یکنواخت با غلظت 1/5 mM به دو روش شبیه‌سازی و تجربی.



شکل (4): نمودار اختلاف نسبی دز در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به‌طور یکنواخت با غلظت‌های مختلف.



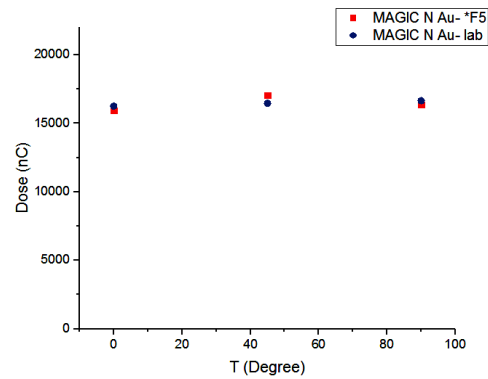
شکل (5): بررسی مقادیر دز جذبی در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای در اطراف فانتوم‌ها.



شکل (6): نمودار اختلاف نسبی دز در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به صورت پوسته‌ای.

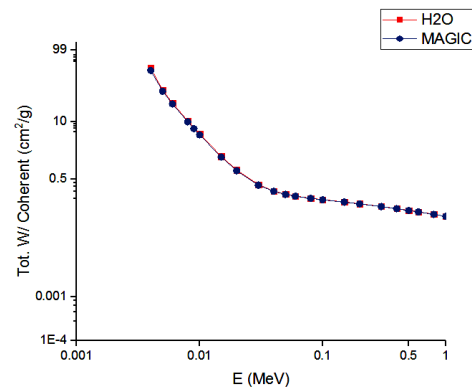
برای مقایسه نتایج دز جذبی شبیه‌سازی و آزمایشگاه برای فانتوم ژل پلیمر با حضور محلول نانوذرات طلا به‌طور یکنواخت، نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی با کمک تالی F5* برای دز جذبی در فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک با حضور

عمق‌های مختلف به صورت لایه به لایه بررسی کرد و نسبت به دیگر فانتوم‌های سه بعدی نیز ارزان‌تر خواهد بود. با توجه به شکل‌های 3 و 5 در بازه انرژی بین 0 MeV تا 0/5 MeV دز جذبی بیشترین مقدار را دارد. زیرا با توجه به مشخصات چشمه‌ی ایریدیم-192 در این بازه‌ی انرژی، بیشترین شدت و یا احتمالات نسبت به انرژی‌های دیگر واقع در بازه‌ی 0 تا 1 MeV وجود دارد. نتایج و بررسی‌های این مطالعه که به صورت شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی به دست آمدند، نشان می‌دهند با حضور محلول نانوذرات طلا در فانتوم ژل پلیمر نوع نورموکسیک به صورت یکنواخت با بهینه غلظت 1/5 mM بیشینه مقدار دز جذبی با افزایش 0/24% و همین‌طور با حضور محلول نانوذرات طلا در ژل پلیمر نوع نورموکسیک به صورت پوسته‌ای در اطراف فانتوم ژل پلیمر با بهینه غلظت 1/5 mM بیشینه مقدار دز جذبی با افزایش 20% حاصل شد و بررسی در شکل‌های 7 و 8 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 0/07 می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد اضافه شدن محلول نانوذرات طلا با عدد اتمی بالا و غلظت به دست 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 به منظور 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



شکل (8): مقایسه دز جذبی در فانتوم‌های ژل پلیمر نورموکسیک با حضور محلول نانوذرات طلا به طور پوسته‌ای با ضخامت 0/182 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 9 نشان داده شده و تطابق مناسبی را نشان می‌دهد.



شکل (9): نمودار ضریب تضعیف جرمی بر حسب انرژی در فانتوم‌های آب و ژل پلیمر نورموکسیک [10].

4. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج شبیه‌سازی و مقایسه‌ای که بین ضریب تضعیف جرمی ژل پلیمر نورموکسیک و ضریب تضعیف جرمی آب انجام شد و در شکل 9 نیز نشان داده شده است، نتیجه می‌شود که از فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک همانند فانتوم آب می‌توان به عنوان بافت نرم بدن انسان استفاده کرد. با این ویژگی که فانتوم ژل پلیمر نورموکسیک یکی از دزیمترهای سه بعدی حساس به پرتو می‌باشد و می‌تواند دز جذبی را بهتر در

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.

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

5. 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
- [4] محمودی، ابوالفضل. توکلی عنبران، حسین. مقدار دز جذبی در فانتوم‌های آب و ژل پلیمر نوع نورموکسیک: به روش مونت‌کارلو. کنفرانس فیزیک ایران، 5 تا 8 شهریور، قزوین، (1397).
- [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.
- [6] بنائی رضائیه، نوشین. مروری بر انواع دزیمترهای سه بعدی. مجله علوم پزشکی رازی، سال 22، شماره 138، آذر (1394) صفحه 1 تا 7.
- [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>