

## مطالعه‌ی آهنگ دز جذبی کل پرتوهای گسیل شده از چشمه‌ی براکی تراپی $^{252}\text{Cf}$ به روش مونت کارلو

ام‌لیلا احمدی\* و حسین توکلی‌عبران

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

\*سمنان، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۳۶۱۹۹-۹۵۱۶۱

پست الکترونیکی: Leila\_Ahmadi0123@yahoo.com

### چکیده

چشمه‌ی براکی تراپی  $^{252}\text{Cf}$  یک چشمه‌ی شکافت خودبه‌خودی می‌باشد که از آن به عنوان یک چشمه‌ی گسیلنده‌ی نوترون استفاده می‌شود. علاوه بر نوترون‌های گسیل شده از این چشمه، پرتوهای گاما با متوسط انرژی ۱ MeV گسیل می‌شوند. در این مطالعه با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX، ابتدا میزان دز جذبی نوترون‌ها، گامای اولیه و گاماها‌ی ثانویه که در نتیجه‌ی گیراندازی نوترون حرارتی با هیدروژن آب تولید می‌شوند در فواصل مختلف از چشمه در فانتوم آب محاسبه شد. سپس میزان دز معادل کل، نوترون و گاما در فواصل مختلف از چشمه به دست آمد. نتایج نشان می‌دهند که، پرتوهای گامای حاصل از این چشمه می‌توانند انرژی قابل توجهی در فواصل نزدیک به چشمه به جا بگذارند که باید سهم این پرتوها در مقادیر دز جذبی کل در استفاده از این چشمه و یا چشمه‌هایی که تنها به‌عنوان گسیلنده‌ی نوترون شناخته شده‌اند در نظر گرفته شود. آهنگ‌های دز نوترون و گامای کل با افزایش فاصله از چشمه کاهش پیدا کرده و در فواصل نزدیک به چشمه بیشترین میزان انرژی خود را به جا می‌گذارند. دز معادل ناشی از نوترون‌ها در فواصل نزدیک (کمتر از ۲ cm) با اختلاف، نسبت به پرتوهای گاما بیشترین میزان تأثیر، در دز معادل کل دارد به طوری که مقادیر آن در فواصل ۰/۵ cm تا ۲ cm از چشمه از  $4/30 \text{ cSv/h.}\mu\text{g}$  به مقدار  $2/950 \text{ cSv/h.}\mu\text{g}$  می‌رسد، در حالی که میزان دز معادل گاماها در فواصل ۰/۵ cm تا ۲ cm از چشمه  $4/30 \text{ cSv/h.}\mu\text{g}$  تا  $0/272 \text{ cSv/h.}\mu\text{g}$  است.

کلیدواژه‌گان:  $^{252}\text{Cf}$ ، دز معادل، دز نوترون، گامای اولیه، گامای ثانویه.

### ۱. مقدمه

چشمه‌های کالیفرنیم علی‌رغم قیمت بالای آن‌ها از اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ جایگزین چشمه‌های نوترون دیگر از قبیل  $^{24}\text{Sb-Be}$ ،  $^{241}\text{Am-Be}$ ،  $^{210}\text{Po-Be}$  و  $^{242}\text{Cm-Be}$  قرار گرفتند [۱]. از جمله مزیت‌های این چشمه‌ها می‌توان به اکتیویته ویژه بالای آن (اجازه تولید چشمه‌های نوترون در اندازه‌های کوچک را فراهم می‌سازد)، طیف نوترون نرم (در مقایسه با دیگر چشمه‌های گسیلنده‌ی نوترون) و اکتیویته‌ی گامای پایین آن اشاره نمود [۲]. چشمه‌ی  $^{252}\text{Cf}$  با نیمه عمر ۲/۶۴۶ سال، ۹۶/۶٪ مد واپاشی آن ذرات آلفا است. اما به دلیل برد کوتاه آن‌ها و توقف در کپسول یا حفاظ دور چشمه در درمان قابل استفاده نمی‌باشند. مقدار کوچک اما با اهمیت، ۳/۱٪ واپاشی آن منجر به شکافت خودبه‌خودی می‌شود. در هر شکافت به

چشمه‌های کالیفرنیم علی‌رغم قیمت بالای آن‌ها از اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ جایگزین چشمه‌های نوترون دیگر از قبیل  $^{24}\text{Sb-Be}$ ،  $^{241}\text{Am-Be}$ ،  $^{210}\text{Po-Be}$  و  $^{242}\text{Cm-Be}$  قرار گرفتند [۱]. از جمله مزیت‌های این چشمه‌ها می‌توان به اکتیویته ویژه بالای آن (اجازه تولید چشمه‌های نوترون در اندازه‌های کوچک را فراهم می‌سازد)، طیف نوترون نرم (در مقایسه با دیگر چشمه‌های گسیلنده‌ی نوترون) و اکتیویته‌ی گامای پایین آن اشاره نمود [۲]. چشمه‌ی  $^{252}\text{Cf}$  با نیمه عمر ۲/۶۴۶ سال، ۹۶/۶٪ مد واپاشی آن ذرات آلفا است. اما به دلیل برد کوتاه آن‌ها و توقف در کپسول یا حفاظ دور چشمه در درمان قابل استفاده نمی‌باشند. مقدار کوچک اما با اهمیت، ۳/۱٪ واپاشی آن منجر به شکافت خودبه‌خودی می‌شود. در هر شکافت به

طور میانگین  $3/768$  نوترون منتشر می‌شود. هر ۱ گرم  $^{252}\text{Cf}$ ،  $10^{12} \times 2/314$  نوترون در هر ثانیه گسیل می‌کند. انرژی نوترون‌های حاصل از شکافت با بیشترین احتمال،  $0/7 \text{ MeV}$  و میانگین انرژی نوترون‌ها  $2/1 \text{ MeV}$  است. علاوه بر نوترون‌های ساطع شده، ۱ گرم  $^{252}\text{Cf}$ ،  $10^{13} \times 1/3$  گاما در هر ثانیه با انرژی متوسط  $1 \text{ MeV}$  گسیل می‌کند [۳، ۴].

درمان با استفاده از نوترون‌ها با انتقال انرژی خطی بالا آن را به یکی از تابش‌های مورد مطلوب نسبت به گاماها اختصاص داده است. از جمله مزایای آن می‌توان به ذرات کوتاه برد، مزایای بیولوژیکی برای کنترل موضعی تومور براساس غلبه در عود مجدد تومور و اثر زیست‌شناختی نسبی بالاتر نسبت به تومورهای در حال رشد نام برد. در حالیکه در درمان تومورهای بدخیم به دلیل کمبود اکسیژن در تومور یا به اصطلاح هیپوکسی، استفاده از پرتوهای گاما و الکترون سبب مقاومت بافت در برابر این پرتوها می‌شود. حالت‌های واپاشی پروتون نیز نیاز به هسته‌های نسبتاً غنی از پروتون دارد که به طور کلی در واکنش‌های هسته‌ای انرژی بالا تشکیل می‌شوند که طولانی‌ترین نیمه عمر آن‌ها به  $250 \mu\text{s}$  می‌رسد. با این وجود، پروتون نیز نمی‌تواند مزایای رادیوبیولوژیکی همانند نوترون داشته باشد [۵، ۶].

نتایج درمان هزاران بیمار در مراکز مختلف جهان با استفاده از چشمه‌ی براکی‌تراپی  $^{252}\text{Cf}$  نشان می‌دهد که، ترکیب تابش نوترون و فوتون به خصوص برای تومورهای بزرگ و همچنین برای تومورهایی که به طور معمول در برابر تابش مقاومت نشان می‌دادند مثل تومورهای ملانوما و تومورهای پیشرفته‌ی دهانه‌ی گردن رحم می‌تواند موثر واقع شود [۷]. با توجه به کاربردهای عملی که چشمه‌ی گسیلنده نوترون  $^{252}\text{Cf}$  بخصوص در حوزه درمان براکی‌تراپی دارد شناخت پرتوهای گسیلی و اندازه‌گیری میزان انرژی آن‌ها دارای اهمیت است. در درمان سرطان اندام‌های مختلف بدن از طریق پرتو درمانی

مانند سرطان دهانه‌ی گردن رحم با روش براکی‌تراپی، دریافت کمترین میزان دز رسیده به بافت‌های مختلفی که در مجاورت با اندام آسیب دیده قرار دارند لازم و ضروری می‌باشد [۸، ۹]. از این رو در تحقیق قبلی نشان داده‌ایم که، محاسبات دزیمتری در فانتوم آب به جای بافت نرم دارای اختلاف نسبی حدوداً ۴ درصدی است که با انجام این تصحیحات می‌توان نتایج مربوط به فانتوم آب را به جای بافت نرم در طراحی برنامه‌ی درمان به کار بست [۱۰]. هدف از انجام این تحقیق، مطالعه‌ی دزیمتری پرتوهای نوترون، گامای اولیه و گامای ثانویه‌ی چشمه‌ی براکی‌تراپی  $^{252}\text{Cf}$  در فانتوم آب اطراف چشمه با استفاده از کد مونت‌کارلوی MCNPX می‌باشد [۱۱]. در این شبیه‌سازی‌ها از تابع ماکسول برای تعریف طیف انرژی نوترون‌ها استفاده شده است. از طرفی در حالت کلی اثر بیولوژیکی در درمان با  $^{252}\text{Cf}$  با اکثریت قاطع به نوترون نسبت داده می‌شود. زیرا نوترون‌ها به طور میانگین ۶ برابر بیشتر از گاماها در کشتن سلول‌های بدخیم تاثیر دارند [۱۲]. بنابراین در نهایت آهنگ دز معادل کل در فواصل مختلف از چشمه، برای نشان دادن بیشترین تاثیر توسط نوترون‌ها در دز کلی محاسبه شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

برای انجام شبیه‌سازی‌ها چشمه‌ی  $^{252}\text{Cf}$  که به صورت یک چشمه‌ی استوانه‌ای با طول فعال  $0/5 \text{ mm}$  می‌باشد، در مرکز یک فانتوم آب به چگالی  $0/998 \text{ gr/cm}^3$  و شعاع  $20 \text{ cm}$  قرار داده شده است [۱۳]. به دلیل گرادیان بالای تغییرات دز در نزدیکی چشمه، برای دزیمتری دقیق‌تر ضخامت پوسته‌های استوانه‌ای خیلی کوچک انتخاب می‌شوند. از این رو آهنگ دز جذبی در پوسته‌های استوانه‌ای به ابعاد  $0/2 \text{ mm} \times 0/2 \text{ mm}$  در فواصل  $0/5$ ،  $0/75$ ،  $1$ ،  $1/5$ ،  $2$ ،  $2/5$ ،  $3$ ،  $3/5$ ،  $4$ ،  $4/5$ ،  $5$ ،  $5/5$ ،  $6$ ،  $7$ ،  $8$ ،  $9$  و  $10 \text{ cm}$  از چشمه محاسبه شده است [۱۴]. طیف

منجر به گسیل گاماهاى MeV ۲/۲ می‌شوند حاصل می‌شوند. دز جذبی این گاماها نیز با استفاده از تالی \*f8 کد MCNPX بدست می‌آید. در نهایت برای محاسبه‌ی آهنگ دز معادل کل، رابطه‌ی زیر مورد استفاده قرار گرفت [۱۲]:

$$\dot{D}_{Total} = \dot{D}_n \times RBE_n + \dot{D}_\gamma \times RBE_\gamma = 6\dot{D}_n + \dot{D}_\gamma \quad (2)$$

### ۳. نتایج و بحث

آهنگ دز جذبی نوترون‌های گسیل شده از چشمه کالیفرنیم با خطای کمتر از ۵ درصد همراه با نتایج کار دیگران در شکل ۱ مشاهده می‌گردد. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با نتایج تجربی colvett [۱۸] و همکارانش و نتایج کار شبیه‌سازی توسط Wang and Kelm [۱۳] و Al-Saihati and Naqvi [۱۲] در محیط آب با یکدیگر تطابق خوبی دارند. محاسبات مربوط به آهنگ دز نوترون نشان می‌دهد که، دز جذبی در فواصل نزدیک به چشمه (فواصل زیر ۲ cm) دارای شیب تندتری می‌باشد. به عبارتی نوترون‌ها در این فواصل، بیشترین میزان انرژی را در محیط به جا می‌گذارند (تعداد نوترون‌های اندرکنش‌کننده با ماده در فواصل نزدیک بیشتر است. همچنین مسیر آزاد میانگین برای انرژی متوسط نوترون‌ها در آب تقریباً ۲ cm است). با افزایش فاصله از چشمه، تعداد نوترون‌های اندرکنش‌کننده با ماده کم شده، در نتیجه باعث کم شدن تعداد انتقال‌های انرژی به ماده شده و در نهایت دز جذبی کاهش پیدا می‌کند به طوری که میزان تغییرات به یک روند یکنواختی می‌رسد. محاسبات مربوط به آهنگ دز گاماهاى اولیه، ثانویه و کل (مجموع دز گامای اولیه و ثانویه) در جدول ۱ آورده شده است.

انرژی نوترون‌ها به صورت طیف ماکسولی و از رابطه‌ی زیر تبعیت می‌کند [۱۵].

$$N(E) = Ce^{-E/1.42} E^{0.5} \quad (1)$$

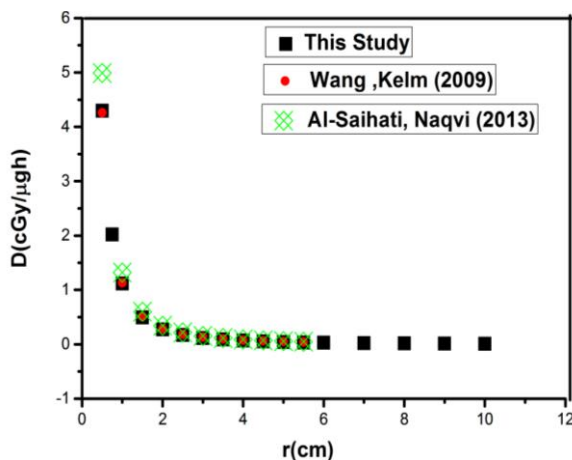
برای محاسبات دز جذبی نوترون، از تالی F6 یا همان تالی گرمایی کد MCNPX که واحد آن بر حسب MeV/gr می‌باشد استفاده شده است. با توجه به اینکه تعداد نوترون‌های گسیل شده از هر ۱ گرم  $^{252}\text{Cf}$ ،  $10^{12} \times 2/314$  نوترون در ثانیه می‌باشد آهنگ دز جذبی بر حسب cGy/h.µg به دست آمد [۳، ۱۱]. گاماهاى اولیه پرتوهای گامایی هستند که همراه با نوترون و طی واپاشی محصولات شکافت گسیل می‌شوند. جهت محاسبه‌ی درست دز ناشی از پرتوهای گامای اولیه در اطراف چشمه، نیاز به طیف درستی از پرتوهای گاما است.

از طرفی فوتون‌ها با انرژی‌های کمتر از ۲۰ keV انرژی‌شان را تا فاصله‌ی ۱ cm از چشمه به جا می‌گذارند که نادیده گرفتن سهم این فوتون‌ها در طی حرکت در آب موجب تخمین کمتری از میزان دز جذبی بخصوص در فواصل نزدیک به چشمه می‌شود. بنابراین باید طیفی را لحاظ کنیم که منجر به نتیجه‌ی درستی در محاسبات شبیه‌سازی شود. از این رو در محاسبات از طیف تصحیح شده‌ای که در برگیرنده‌ی رنج پایین انرژی گاماها است و توسط Dr. Ian C. Gauld at ORNL به دست آمده است استفاده شد [۱۷]. دز جذبی این گاماها با استفاده از تالی \*f8 کد MCNPX با تقسیم بر جرم سلول بر حسب واحد MeV/gr به دست آمد سپس با استفاده از تعداد گاماهاى گسیلی در هر ثانیه آهنگ دز جذبی بر حسب cGy/h.µg محاسبه شد. گاماهاى ثانویه از طریق اندرکنش نوترون‌های حرارتی در آب طی واکنش  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  که

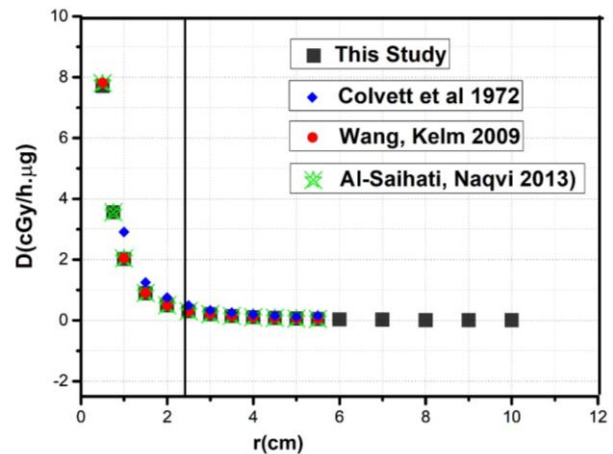
جدول (۱): آهنگ دز گاماهاى اولیه، ثانویه و کل بر حسب cGy/h.µg.

فواصل (cm)	آهنگ دز گاماى اولیه	آهنگ دز گاما ثانویه	آهنگ دز گامای کل
۰/۵۰	$۴/۲۷ \times ۱۰^{-۱} \pm ۴/۵۳ \times ۱۰^{-۲}$	$۲/۳۶ \times ۱۰^{-۲} \pm ۹/۰۷ \times ۱۰^{-۴}$	$۴/۳۰ \times ۱۰^{-۱} \pm ۴/۵۳ \times ۱۰^{-۲}$
۰/۷۵	$۲/۰۱ \times ۱۰^{-۱} \pm ۲/۵۳ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۱۰ \times ۱۰^{-۲} \pm ۵/۲۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۰۲ \times ۱۰^{-۱} \pm ۲/۵۳ \times ۱۰^{-۲}$
۱/۰۰	$۱/۱۱ \times ۱۰^{-۱} \pm ۱/۶۰ \times ۱۰^{-۲}$	$۶/۶۶ \times ۱۰^{-۳} \pm ۳/۷۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۱۲ \times ۱۰^{-۱} \pm ۱/۶۰ \times ۱۰^{-۲}$
۱/۵۰	$۴/۹۱ \times ۱۰^{-۱} \pm ۸/۵۰ \times ۱۰^{-۳}$	$۳/۲۷ \times ۱۰^{-۳} \pm ۱/۴۰ \times ۱۰^{-۴}$	$۴/۹۵ \times ۱۰^{-۱} \pm ۸/۵۰ \times ۱۰^{-۳}$
۲/۰۰	$۲/۷۰ \times ۱۰^{-۱} \pm ۵/۷۵ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/۰۶ \times ۱۰^{-۳} \pm ۶/۹۷ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۷۲ \times ۱۰^{-۱} \pm ۵/۷۵ \times ۱۰^{-۳}$
۲/۵۰	$۱/۷۱ \times ۱۰^{-۱} \pm ۴/۰۲ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۴۸ \times ۱۰^{-۳} \pm ۵/۴۹ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۷۲ \times ۱۰^{-۱} \pm ۴/۰۲ \times ۱۰^{-۳}$
۳/۰۰	$۱/۱۵ \times ۱۰^{-۱} \pm ۲/۹۷ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۰۷ \times ۱۰^{-۳} \pm ۳/۸۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۱۶ \times ۱۰^{-۱} \pm ۲/۹۷ \times ۱۰^{-۳}$
۳/۵۰	$۸/۷۹ \times ۱۰^{-۲} \pm ۲/۴۴ \times ۱۰^{-۳}$	$۹/۰۰ \times ۱۰^{-۴} \pm ۳/۲۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۸/۸۸ \times ۱۰^{-۲} \pm ۲/۴۴ \times ۱۰^{-۳}$
۴/۰۰	$۶/۹۳ \times ۱۰^{-۲} \pm ۲/۰۴ \times ۱۰^{-۳}$	$۷/۱۹ \times ۱۰^{-۴} \pm ۲/۷۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۷/۰۰ \times ۱۰^{-۲} \pm ۲/۰۴ \times ۱۰^{-۳}$
۴/۵۰	$۵/۱۱ \times ۱۰^{-۲} \pm ۱/۶۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۶/۸۱ \times ۱۰^{-۴} \pm ۳/۷۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۵/۱۸ \times ۱۰^{-۲} \pm ۱/۶۱ \times ۱۰^{-۳}$
۵/۰۰	$۴/۰۲ \times ۱۰^{-۲} \pm ۱/۳۹ \times ۱۰^{-۳}$	$۵/۷۳ \times ۱۰^{-۴} \pm ۱/۹۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۰۸ \times ۱۰^{-۲} \pm ۱/۳۹ \times ۱۰^{-۳}$
۵/۵۰	$۳/۳۶ \times ۱۰^{-۲} \pm ۱/۱۶ \times ۱۰^{-۳}$	$۴/۵۲ \times ۱۰^{-۴} \pm ۱/۶۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۴۰ \times ۱۰^{-۲} \pm ۱/۱۶ \times ۱۰^{-۳}$
۶/۰۰	$۲/۸۵ \times ۱۰^{-۲} \pm ۱/۰۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۴/۵۵ \times ۱۰^{-۴} \pm ۱/۵۰ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۹۰ \times ۱۰^{-۲} \pm ۱/۰۱ \times ۱۰^{-۳}$
۷/۰۰	$۲/۱۱ \times ۱۰^{-۲} \pm ۸/۴۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۳۷ \times ۱۰^{-۴} \pm ۱/۱۷ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۱۴ \times ۱۰^{-۲} \pm ۸/۴۶ \times ۱۰^{-۴}$
۸/۰۰	$۱/۵۴ \times ۱۰^{-۲} \pm ۷/۲۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۶۵ \times ۱۰^{-۴} \pm ۱/۰۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۵۶ \times ۱۰^{-۲} \pm ۷/۲۶ \times ۱۰^{-۴}$
۹/۰۰	$۱/۲۲ \times ۱۰^{-۲} \pm ۵/۲۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۴۱ \times ۱۰^{-۴} \pm ۸/۶۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۴ \times ۱۰^{-۲} \pm ۵/۲۶ \times ۱۰^{-۴}$
۱۰/۰	$۹/۴۸ \times ۱۰^{-۳} \pm ۴/۶۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۸۶ \times ۱۰^{-۴} \pm ۷/۰۰ \times ۱۰^{-۶}$	$۹/۶۶ \times ۱۰^{-۳} \pm ۴/۶۸ \times ۱۰^{-۴}$

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود مقایسه‌ی بین آهنگ مربوط به دز گامای کل همراه با نتایج کار شبیه‌سازی شده توسط Wang and Kelm [۱۳] و Al-Saihati and Naqvi در محیط آب با یکدیگر تطابق خوبی دارند.



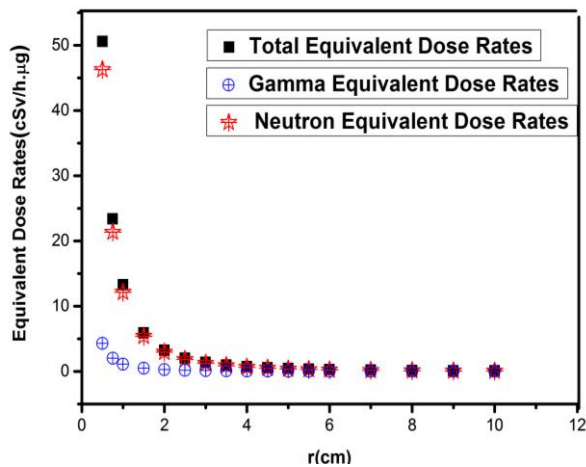
شکل (۲): آهنگ دز جذبی گامای کل محاسبه شده در این مطالعه در آب همراه با نتایج کار دیگران در آب [۱۳، ۱۲].



شکل (۱): آهنگ دز جذبی نوترون محاسبه شده در این مطالعه در آب همراه با نتایج کار دیگران در آب [۱۳، ۱۲، ۱۸].

خطای حاصل از محاسبات کد در تمامی فواصل کمتر از ۵ درصد می‌باشد. با توجه به جدول ۱، با کم شدن تعداد گاماهاى ثانویه که از گیراندازی نوترون حرارتی حاصل می‌شوند میزان دز گامای ثانویه با افزایش فاصله از چشمه کاهش پیدا می‌کند.

دارد که نشان‌دهنده‌ی اهمیت پرتوهای نوترون نسبت به گاماها در این فواصل است.



شکل (۳): مقایسه‌ی آهنگ دز معادل گاما و نوترون با آهنگ دز معادل کل.

با افزایش فاصله از چشمه آهنگ دز گامای کل کاهش پیدا می‌کند. و در فواصل نزدیک به چشمه با شیب تندتری بیشترین میزان انرژی خود را به جا می‌گذارد.

محاسبات مربوط به آهنگ دز معادل کل، طبق رابطه‌ی ۲ از مجموع آهنگ‌های دز معادل نوترون و گاما به دست آمد. نتایج این محاسبات در جدول ۲ مشاهده می‌گردد. جهت نشان دادن تأثیر هر کدام از پرتوها در میزان دز کلی در شکل ۳، مقایسه‌ی بین مقادیر آهنگ دز معادل گاما و نوترون با آهنگ دز معادل کل نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳، دز ناشی از نوترون‌ها در فواصل نزدیک به چشمه (کمتر از ۲ cm) با اختلاف نسبت به پرتوهای گاما بیشترین میزان تأثیر، در دز کلی

جدول (۲): آهنگ دز معادل بر حسب cSv/h.µg.

فواصل (cm)	آهنگ دز معادل گامای کل	آهنگ دز معادل نوترون‌ها	آهنگ دز معادل کل
۰/۵۰	$4/30 \times 10^{-1} \pm 4/53 \times 10^{-2}$	$4/63 \times 10^{-1} \pm 3/05 \times 10^{-1}$	$5/06 \times 10^{-1} \pm 3/09 \times 10^{-1}$
۰/۷۵	$2/02 \times 10^{-1} \pm 2/53 \times 10^{-2}$	$2/14 \times 10^{-1} \pm 1/67 \times 10^{-1}$	$2/34 \times 10^{-1} \pm 1/69 \times 10^{-1}$
۱/۰۰	$1/12 \times 10^{-1} \pm 1/60 \times 10^{-2}$	$1/21 \times 10^{-1} \pm 1/09 \times 10^{-1}$	$1/32 \times 10^{-1} \pm 1/10 \times 10^{-1}$
۱/۵۰	$4/95 \times 10^{-1} \pm 8/50 \times 10^{-2}$	$5/37 \times 10^{-1} \pm 5/80 \times 10^{-2}$	$5/87 \times 10^{-1} \pm 5/87 \times 10^{-2}$
۲/۰۰	$2/72 \times 10^{-1} \pm 5/75 \times 10^{-2}$	$2/95 \times 10^{-1} \pm 3/72 \times 10^{-2}$	$3/23 \times 10^{-1} \pm 3/77 \times 10^{-2}$
۲/۵۰	$1/72 \times 10^{-1} \pm 4/02 \times 10^{-2}$	$1/84 \times 10^{-1} \pm 2/65 \times 10^{-2}$	$2/01 \times 10^{-1} \pm 2/68 \times 10^{-2}$
۳/۰۰	$1/16 \times 10^{-1} \pm 2/97 \times 10^{-2}$	$1/24 \times 10^{-1} \pm 2/01 \times 10^{-2}$	$1/35 \times 10^{-1} \pm 2/03 \times 10^{-2}$
۳/۵۰	$8/88 \times 10^{-2} \pm 2/44 \times 10^{-2}$	$8/75 \times 10^{-2} \pm 1/58 \times 10^{-2}$	$9/64 \times 10^{-2} \pm 1/59 \times 10^{-2}$
۴/۰۰	$7/00 \times 10^{-2} \pm 2/04 \times 10^{-2}$	$6/36 \times 10^{-2} \pm 1/26 \times 10^{-2}$	$7/06 \times 10^{-2} \pm 1/28 \times 10^{-2}$
۴/۵۰	$5/18 \times 10^{-2} \pm 1/61 \times 10^{-2}$	$4/84 \times 10^{-2} \pm 9/29 \times 10^{-3}$	$5/36 \times 10^{-2} \pm 9/43 \times 10^{-3}$
۵/۰۰	$4/08 \times 10^{-2} \pm 1/39 \times 10^{-2}$	$3/71 \times 10^{-2} \pm 7/79 \times 10^{-3}$	$4/12 \times 10^{-2} \pm 7/91 \times 10^{-3}$
۵/۵۰	$3/40 \times 10^{-2} \pm 1/16 \times 10^{-2}$	$2/92 \times 10^{-2} \pm 7/18 \times 10^{-3}$	$3/26 \times 10^{-2} \pm 7/27 \times 10^{-3}$
۶/۰۰	$2/90 \times 10^{-2} \pm 1/01 \times 10^{-2}$	$2/33 \times 10^{-2} \pm 6/15 \times 10^{-3}$	$2/62 \times 10^{-2} \pm 6/24 \times 10^{-3}$
۷/۰۰	$2/14 \times 10^{-2} \pm 8/46 \times 10^{-3}$	$1/52 \times 10^{-2} \pm 3/93 \times 10^{-3}$	$1/74 \times 10^{-2} \pm 4/02 \times 10^{-3}$
۸/۰۰	$1/56 \times 10^{-2} \pm 7/26 \times 10^{-3}$	$1/05 \times 10^{-2} \pm 3/08 \times 10^{-3}$	$1/20 \times 10^{-2} \pm 3/16 \times 10^{-3}$
۹/۰۰	$1/24 \times 10^{-2} \pm 5/26 \times 10^{-3}$	$7/31 \times 10^{-3} \pm 2/41 \times 10^{-3}$	$8/55 \times 10^{-3} \pm 2/47 \times 10^{-3}$
۱۰/۰	$9/66 \times 10^{-3} \pm 4/68 \times 10^{-3}$	$5/29 \times 10^{-3} \pm 1/97 \times 10^{-3}$	$6/25 \times 10^{-3} \pm 2/02 \times 10^{-3}$

#### ۴. نتیجه‌گیری

گامای ثانویه می‌باشد. به دلیل نزدیک بودن عناصر تشکیل دهنده‌ی بافت نرم با آب محاسبات دزیمتری در فانتوم آب

دز جذبی حاصل از پرتوهای گسیلی از چشمه‌ی کالیفرنیوم شامل: دز ناشی از نوترون‌ها، دز حاصل از گاماها و دز

ویژگی نوترون‌ها نسبت به گاماها در درمان تومورهای بدخیم حائز اهمیت است اما باید توجه داشت که پرتوهای گامای حاصل می‌توانند انرژی قابل ملاحظه‌ای در فواصل نزدیک به چشمه (کمتر از ۲ cm) به جا بگذارند که باید در استفاده از این چشمه و یا چشمه‌هایی که تنها به عنوان گسیلنده‌ی نوترون شناخته شده‌اند در نظر گرفته شود و میزان دز ناشی از آن را در دز کل سهم نمود.

انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که، آهنگ‌های دز نوترون و گامای کل با افزایش فاصله از چشمه کاهش پیدا کرده و در فواصل نزدیک به چشمه بیشترین میزان انرژی را به جا می‌گذارند. محاسبات مربوط به آهنگ دز معادل کل و مقایسه آن با آهنگ دز معادل گاما و نوترون نشان می‌دهند که، در استفاده از این چشمه در کاربردهای کلینیکی به دلیل اثر زیست‌شناختی متوسط ۶ برابر نوترون نسبت به پرتوهای گاما، نوترون‌ها بیشترین میزان تأثیر در دز کل دارند هر چند این

## ۵. مراجع

- [1] A.K. Yengeni. Californium-252 Neutron Sources. *Appl. Radiat. Isot.* 48 10(12) (1997) 1563–1566.
- [2] M.J. Rivard, J.G. Wierzbicki, F. Van den Heuvel. Clinical brachytherapy with neutron emitting  $^{252}\text{Cf}$  sources and adherence to AAPM TG-43 dosimetry protocol. *Med. Phys.* 26 (1999) 87–96.
- [3] D. Hei et al. Design of a setup for a  $^{252}\text{Cf}$  neutron source for storage and analysis purpose. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.* 386 (2016) 1–3.
- [4] J.W. Poston. Neutron depth dose distribution in heterogeneous phantoms. Georgia Institute of Technology (1971).
- [5] A. Yadollahpour, M. Zahihzadeh and A. Ahmadabad. Calculation of Dose Distribution Around a Clinical  $^{252}\text{Cf}$  Source for Neutron Therapy Based on AAPM, TG-43 Protocol. *Biomedical & Pharmacology Journal.* 6(2) (2013) 137–143.
- [6] J. Ghassoun, D. Mostacci and V. Molinari. Detailed dose distribution prediction of  $^{252}\text{Cf}$  brachytherapy source with boron loading dose enhancement. *Applied Radiation and Isotopes.* 68 (2010) 265–270.
- [7] J.L.m. Venselaar, D. Baltas, A.S. meigooni and P.J. Hoskin. *A Comprehensive Brachytherapy Physical and Clinical Aspects.* CRC Press,ck. (2012).
- [8] V. Samerdokiene, K.P. Valuckas, E. Janulionis, V. Atkocius and M.J. Rivard. Second primary malignancies after radiotherapy including HDR  $^{252}\text{Cf}$  brachytherapy for cervical cancer. *Brachytherapy.* 14 (2015) 898–904.
- [9] S.F. Brandao and T.P.R. Campos. Intracavitary moderator balloon combined with  $^{252}\text{Cf}$  brachytherapy and boron neutron capture therapy, improving dosimetry in a brain tumor and infiltrations. Published by the British Institute of Radiology. (2015).
- [۱۰] احمدی، املیلا. توکلی عنبران، حسین. محاسبه درصد خطای به وجود آمده در استفاده از فانتوم آب به جای بافت نرم برای توزیع چشمه‌ی براکی تراپی  $^{103}\text{Pd}$  به روش مونت کارلو. *مجله‌ی علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد.* (۹) ۲۳، ۸۱۸–۸۰۶ (۱۳۹۴)
- [11] I. Al-Saihati and A.A. Naqvi. Neutron and gamma-ray doses from a  $^{252}\text{Cf}$  brachytherapy source in a water phantom. *J Radioanal Nucl Chem.* 296 (2013) 963–966.
- [12] D. Pelowitz. MCNPX user's manual, LA-CP-07-1473 Version 2.6.0. Los Alamos National Laboratory. 13 (2008).
- [13] C. Wang and R. Kelm. Determination of Neutron and Gamma Dose Rates in Water Surrounding a New Interstitial  $^{252}\text{Cf}$  Brachytherapy Source. *Med. Phys.* 36 (2009).
- [14] C. Wang and R. Kelm. Determination of Neutron and Gamma Dose Rates in Water Surrounding a New Interstitial  $^{252}\text{Cf}$  Brachytherapy Source. *Med. Phys.* 36 (2009).
- [15] L.L. Anderson. Status of dosimetry for  $^{252}\text{Cf}$  medical neutron sources. *Phys. Med. Biol.* 18 (1973) 779–799.
- [16] E. Fortune, I. Gauld and C. Wang. Gamma Dose near a New Miniature Cf-252 Brachytherapy Source. *Med. Phys.* 37 (2010).
- [17] R.D. Colvett, H.H. Rossi I and V. Krishnaswamy. Dose distributions around a californium-252 needle. *Phys. Med. Biol.* 17(3) (1972) 356.