

## محاسبه‌ی اثر پرتوهای بتا، تابش ایکس ترمزی و استفاده از ذرات $^{10}\text{B}$ بر افزایش دز معادل چشمه‌ی براکی‌تراپی $^{252}\text{Cf}$

ام‌لیلا احمدی<sup>۱</sup>، حسین توکلی عنبران<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۵/۰۹ تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۱۰/۱۱

### چکیده

**پیش‌زمینه و هدف:** چشمه  $^{252}\text{Cf}$  یک چشمه گسیلنده نوترون، پرتوهای گاما و ذرات آلفا و بتا می‌باشد. در مدل‌های رایج این چشمه جهت استفاده در براکی‌تراپی تنها نوترون‌ها و پرتوهای گاما در دزیمتری اطراف چشمه نقش دارند. در این مطالعه ضمن بررسی فرار پرتوهای بتا و تابش ایکس ترمزی از کپسول چشمه براکی‌تراپی  $^{252}\text{Cf}$  مدل ایزوترون، دزیمتری کل پرتوهای موثر در محیط آب اطراف چشمه انجام شد و افزایش دز معادل کل با استفاده از ذرات  $^{10}\text{B}$  محاسبه گردید.

**مواد و روش کار:** با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX.2.6.0 دزیمتری برای پرتوهای نوترون، گاماها، اولیه، ثانویه، ذرات بتا و تابش ایکس ترمزی در یک فانتوم کروی آب به شعاع ۲۰ cm در فواصل ۰/۵ تا ۶ cm از چشمه صورت گرفت و فاکتور افزایش دز با استفاده از ذرات  $^{10}\text{B}$  با غلظت ۵۰ ppm محاسبه گردید. **یافته‌ها:** بیشترین میزان اختلاف نسبی مقادیر دز معادل کل با در نظر گرفتن پرتوهای ایکس ترمزی و ذرات بتا نسبت به عدم حضور آن‌ها در فاصله ۰/۵cm از چشمه ۱۹ درصد است. با افزایش فاصله از چشمه میزان تأثیر این پرتوها در دز معادل کل کم شده به طوری که در فاصله ۲/۵ cm مقادیر آن به کمتر از ۵ درصد می‌رسد. میزان تأثیر بورون در دز معادل کل با افزایش فاصله از چشمه افزایش پیدا می‌کند و در فواصل ۰/۵ cm تا ۶ cm از چشمه، از ۰/۱ درصد به بیش از ۲۲ درصد می‌رسد.

**بحث و نتیجه‌گیری:** طبق یافته‌های موجود در این مطالعه دز ناشی از پرتوهای ایکس و ذرات بتا عبوری از کپسول چشمه نقش قابل ملاحظه‌ای در دزیمتری اطراف چشمه دارد و افزایش دز با استفاده از  $^{10}\text{B}$  به افزایش فاصله تومور از چشمه بستگی دارد که باید در کاربردهای کلینیکی مد نظر قرار گیرد. **کلیدواژه‌ها:** پرتو بتا، تابش ایکس ترمزی، دز معادل، ذرات  $^{10}\text{B}$ ، چشمه براکی‌تراپی  $^{252}\text{Cf}$

مجله مطالعات علوم پزشکی، دوره سی و سوم، شماره ششم، ص ۴۵۰-۴۴۱، شهریور ۱۴۰۱

آدرس مکاتبه: شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، تلفن: ۰۹۱۵۱۱۸۸۰۶۲

Email: tavakoli-anbaran@shahroodut.ac.ir

### مقدمه

به طور کلی اکثریت واپاشی چشمه  $^{252}\text{Cf}$  (۹۶/۹ درصد)، از طریق واپاشی آلفاست اما به دلیل برد کوتاه ذرات آلفا و توقف در چشمه و کپسول اطراف آن نمی‌توانند در دزیمتری اطراف چشمه شرکت کنند. بخش با اهمیت واپاشی این چشمه با ۳/۱ درصد حالات مربوط به شکافت خود به خودی و گسیل نوترون‌ها است (۱). علاوه بر گسیل پرتوهای نوترون و ذرات آلفا، این چشمه پرتوهای گاما و ذرات بتا نیز از خود ساطع می‌کند. پرتوهای گاما همراه با شکافت خود به خودی چشمه و طی واپاشی محصولات شکافت تولید می‌شوند. از طرفی، نوترون‌های حرارتی غالباً از طریق

واکنش  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  منجر به گسیل گاماها ۲/۲ MeV می‌شوند. این گاماها که به گاماها ۱ ثانویه معروفند می‌توانند دز قابل توجهی در محیط اطراف چشمه به جا بگذارند که باید میزان دز ناشی از آن‌ها در محاسبات دزیمتری همانند گاماها ۱ آنی لحاظ شود (۲). در حالت کلی ذرات بتا گسیل شده از طریق واپاشی محصولات شکافت در همان دیواره کپسول چشمه  $^{252}\text{Cf}$  متوقف می‌شوند و در دزیمتری خارجی اطراف چشمه شرکت نمی‌کنند اما برای چشمه  $^{252}\text{Cf}$  مدل ایزوترون با ضخامت دیواره کپسول ۰/۰۲ cm تعدادی از پرتوهای بتا و همچنین پرتوهای ایکس تولید شده از طریق برهم‌کنش ذرات بتا با دیواره کپسول می‌توانند از آن فرار

<sup>۱</sup> دکترای تخصصی فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران (نویسنده مسئول)

کنند که باید سهم این پرتوها در میزان دز معادل کل محیط اطراف چشمه محاسبه گردد (۳). نوترون براکی‌تراپی با استفاده از چشمه  $^{252}\text{Cf}$  به طور چشمگیری در سال‌های اخیر به عنوان روشی جهت درمان سرطان مراحل پیشرفته دهانه گردنه رحم مورد توجه قرار گرفته است (۴). درمان با استفاده از روش گیراندازی نوترون حرارتی ( $\sim 0.253 \text{ eV}$ ) توسط  $^{11}\text{B}$  از اوایل ۱۹۳۶ مورد بحث و بررسی قرار گرفت. با گیراندازی نوترون حرارتی توسط  $^{11}\text{B}$  ابتدا، هسته برانگیخته  $^{11}\text{B}$  تشکیل شده سپس، این هسته طی واکنش  $^{11}\text{B}(n,\alpha)^4\text{Li}$  به ذرات سنگین آلفا و لیتیم واپاشی می‌کند. در نهایت ذرات آلفا با انرژی  $1.47 \text{ MeV}$  و برد  $8/8 \mu\text{m}$ ، لیتیم با انرژی  $0.84 \text{ MeV}$  و برد  $4/8 \mu\text{m}$  در ناحیه‌ای به ابعاد شعاع سلول متوقف شده و انرژی خود را به جا می‌گذارند (۵). جهت دستیابی به نتیجه درمان مطلوب با استفاده از روش گیراندازی نوترون حرارتی توسط  $^{11}\text{B}$ ، مقدار غلظت به کار رفته در کاربردهای کلینیکی  $\mu\text{g/g}$  ۵۰-۲۰ پیشنهاد شده است (۶). در سال ۲۰۰۴ توسط ریوارد و همکارانش<sup>۱</sup> محاسبات مونت کارلو بر روی فانتوم مغز جهت ارزیابی افزایش دز برای طیف وسیعی از غلظت‌های  $^{11}\text{B}$  در فواصل گسترده‌ای از یک منبع بالینی  $^{252}\text{Cf}$  انجام شد. نتایج تحقیقات نشان دادند که برای غلظت‌های  $^{11}\text{B} \leq 50 \mu\text{g/g}$  افزایش دز ناشی از گیراندازی نوترون در مقایسه با دز نوترون سریع کمتر است (۷). قسون و همکارانش<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۹ ضمن ارائه دزیمتری کاملی برای چشمه  $^{252}\text{Cf}$  در فانتوم آب، تأثیر  $^{11}\text{B}$  بر توزیع آهنگ دز با استفاده از روش مونت کارلو را بدست آوردند. نتایج حاکی از آن بود که مقدار افزایش دز با این طراحی درمان فقط به حضور  $^{11}\text{B}$  در تومور بستگی ندارد بلکه به فاصله تومور از چشمه نیز بستگی دارد (۸). در سال ۲۰۱۴ توسط خسرو آبادی و همکاران<sup>۳</sup> با استفاده از کد MCNPX<sup>۴</sup> مقایسه بین دز داروهای شیمی درمانی بورترزومیب<sup>۵</sup> و آمیفوستین<sup>۶</sup>، داروهای حاوی ذرات و نانو ذرات  $^{11}\text{B}$ ،  $^{157}\text{Gd}$  و  $^{137}\text{S}$  با استفاده از چشمه  $^{252}\text{Cf}$  مدل AT<sup>۷</sup> در غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ ppm صورت گرفته است. نتایج نشان داده‌اند که بیشترین عامل افزایش دز مربوط به ذرات و نانوذرات  $^{11}\text{B}$  با غلظت ۵۰۰ ppm است (۹). چشمه براکی‌تراپی  $^{252}\text{Cf}$  مدل ایزوترون<sup>۸</sup>، توسط آزمایشگاه ملی اوک ریج<sup>۹</sup> در آمریکا در سال ۲۰۰۲ ساخته شد. این چشمه کوچک، با شدت بیشتر نسبت به مدل‌های قبل‌تر از خود امکان استفاده در درمان تومور در هر جایی از بدن را فراهم

می‌کند. طول فعال چشمه در مدل ایزوترون (طول فعال  $0.5 \text{ cm}$ ) ۳ برابر کمتر از مدل رایج AT (طول فعال  $1.5 \text{ cm}$ ) است بنابراین می‌توان از آن در براکی‌تراپی درون بافتی و براکی‌تراپی درون حفره‌ای به دلیل کوچک‌تر بودن ابعاد آن استفاده نمود (۱۰، ۳). میزان دز پرتوهای گاما و نوترون گسیل شده از مدل ایزوترون در فانتوم آب با استفاده از کد MCNP5 در سال ۲۰۰۹ توسط وانگ و کلم<sup>۱۰</sup> بدست آمد (۱۱، ۱۰). در سال ۲۰۱۰ پرتوهای گامای خروجی از چشمه  $^{252}\text{Cf}$  مدل ایزوترون در محدوده انرژی‌های پائین اصلاح شد و دز ناشی از این گاماها در محیط آب اطراف چشمه محاسبه گردید (۳). دز پرتوهای گاما و نوترون خروجی از این مدل همراه با دز معادل کل بر روی محور عرضی و طولی چشمه در سال ۲۰۱۳ توسط آل سیحتی و نکوی<sup>۱۱</sup> با روش شبیه سازی در فانتوم آب بدست آمد (۱۲). در مطالعه‌ای دیگر دز ناشی از نوترون‌ها، پرتوهای گاما اولیه و ثانویه در محیط آب اطراف چشمه با سطح مقطع‌ها و چگالی‌های متفاوت از کار آل سیحتی و نکوی مورد بررسی قرار گرفت و دز معادل کل در این حالت محاسبه شد (۱۳). در سال ۲۰۲۰ مطالعه‌ای جهت تعیین پارامترهای دزیمتری نوترون، مدل ایزوترون با استفاده از تعریف تابع ماکسول برای طیف نوترون‌های چشمه با استفاده از کد MCNPX انجام شد. نتایج بدست آمده نشان دادند که به دلیل دیواره نازک این چشمه تابع ناهمسانگردی را می‌توان تقریباً بدون ناهمسانگردی قابل توجهی واحد در نظر گرفت (۱۴). اثر ترکیب، محل قرارگیری، اندازه و ناهمگنی بافت‌های مختلف بر روی دزیمتری چشمه  $^{252}\text{Cf}$  با استفاده از کد MCNPX در سال ۲۰۲۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان دادند که، دز نوترون در اثر ناهمگنی هوا و استخوان تا ۶۶ درصد کاهش می‌یابد در حالی که کاهش میزان دز گاما کل در اثر ناهمگنی هوا و استخوان تنها تا ۱۰ درصد است (۱۵). آریانتو<sup>۱۲</sup> و همکاران در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۲ با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از کد MCNPX شار نوترون‌های سریع و فوق حرارتی و میزان دز ناشی از آن‌ها در تومور مغزی را با استفاده از گیراندازی نوترون توسط بورون بدست آوردند (۱۶).

در این مطالعه جهت ارزیابی دقیق‌تر میزان دز ناشی از پرتوهای موثر در دز کلی چشمه  $^{252}\text{Cf}$  مدل ایزوترون با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX.2.6.0 ابتدا، محاسبات دز گاما کل و دز

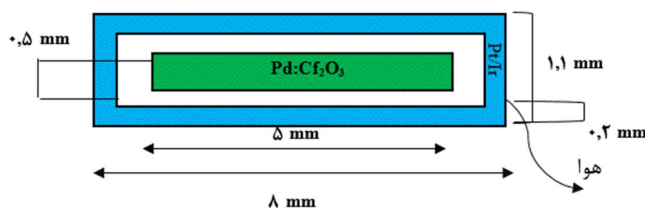
<sup>۱</sup>Applicator Tube<sup>۲</sup>Isotron<sup>۳</sup>Oak Ridge<sup>۴</sup>Wang and Kelm<sup>۵</sup>Al-Saihati and Naqvi<sup>۶</sup>Arianto et al.<sup>۷</sup>Rivard et al.<sup>۸</sup>Ghassoun et al.<sup>۹</sup>Khosroabadi et al.<sup>۱۰</sup>Monte Carlo N-Particle Transport<sup>۱۱</sup>Bortezomib<sup>۱۲</sup>Amifostine

محاسبه شد.

## مواد و روش کار

### مشخصات چشمه:

چشمه مورد استفاده در این مطالعه، چشمه  $^{252}\text{Cf}$  مدل ایزوترون است. با توجه به شکل ۱، قطر بیرونی این چشمه ۵ mm، طول کلی آن تقریباً ۸ mm و طول فعال آن ۵ mm بصورت  $\text{PdCf}_2\text{O}_3$  با چگالی  $12 \text{ g/cm}^3$  می باشد. ضخامت کپسول اطراف چشمه ۰/۲ mm است که جنس آن طبق گواهی صادر شده آمریکا USA/0018/S-96، از آلیاژ پلاتین/ ایریدیم با ۹۰٪ پلاتین و ۱۰٪ ایریدیم با چگالی  $21.51 \text{ g/cm}^3$  می باشد (۳، ۱۰).



شکل (۱): طرحی از هندسه چشمه  $^{252}\text{Cf}$  مدل ایزوترون

بنابراین تفاوتی بین mode e با mode p وجود ندارد. به عبارتی فرقی بین ترابرد فقط بتاها و یا پرتوهای ایکسی که توسط این بتاها تولید می شوند به دلیل جمع همگی رویدادها تا تمام شدن تاریخچه ذره قائل نیست. جهت انجام محاسبات دز ناشی از بتاها و پرتوهای ایکس تابش ترمزی، چشمه را در مرکز یک فانتوم کروی آب به شعاع ۲۰ cm قرار داده و بدین ترتیب آهنگ دز جذبی در پوسته های استوانه ای به ابعاد  $0.2 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$  در فواصل ۵۰/۰ تا ۶۰/۰ cm از چشمه با استفاده از تالی F۸\* کد MCNPX و با تقسیم بر جرم سلول مورد نظر بر حسب MeV/g محاسبه شد. سپس، با توجه به این که هر  $1 \mu\text{g}$  از  $^{252}\text{Cf}$ ،  $3.8 \times 10^6$  ذرات بتا در هر ثانیه گسیل می کند آهنگ دز جذبی بر حسب cGy/ $\mu\text{g.h}$  بدست آمد. تالی F۴ درکد متوسط میزان شار در سلول مورد نظر را محاسبه می کند با به کارگیری این تالی و کارت های DE و DF که به ترتیب بیانگر انرژی و ضرایب کرما در همان انرژی می باشند بهره برده و بدین ترتیب دز جذبی نوترون ها را در پوسته های استوانه ای به ابعاد  $0.2 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$  در فواصل ذکر شده در محیط آب اطراف چشمه بدست آمد. دز گاما اولیه که همراه با نوترون ها و طی واپاشی محصولات شکافت گسیل می شود و همچنین دز گاما ثانویه که از طریق اندرکنش نوترون حرارتی با هیدروژن آب تولید می شود در برنامه هایی جداگانه با استفاده از تالی F۸\* کد MCNPX در فواصل مختلف از چشمه همانند دیگر

ناشی از نوترون ها در محیط آب انجام شد. سپس، به بررسی پرتوهای بتا و تابش ایکس عبوری از دیواره کپسول چشمه پرداخته و دز ناشی از آن ها در محیط آب اطراف چشمه محاسبه گردید و نتایج آن در مقادیر دز کلی لحاظ شد (۱۷، ۱۸). از آنجا که هدف اصلی در پرتو درمانی رسیدن بیشینه دز به تومور و کمترین آسیب به بافت های سالم اطراف می باشد در این خصوص جهت افزایش میزان دز جذبی در ناحیه مورد نظر از روش گیراندازی نوترون حرارتی توسط  $^{10}\text{B}$  استفاده نموده و برای غلظت ۵۰ ppm طبق محدوده توصیه شده در کاربردهای کلینیکی، فاکتور افزایش دز برای فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت اختلاف نسبی دز جذبی با استفاده از  $^{10}\text{B}$  نسبت به عدم اعمال این فاکتور

### محاسبه دز جذبی پرتوهای گسیلی از چشمه $^{252}\text{Cf}$ :

جهت بررسی بتاها و پرتوهای تابش ایکس عبوری از کپسول چشمه ابتدا، با استفاده از تالی F۱ کد MCNPX.2.6.0 تعداد ذرات عبوری از کپسول چشمه بر روی سطح کره ای که آن را شامل می شود در دو حالت مورد ارزیابی قرار گرفت (۱۸): (۱) بررسی اثر خود جذبی چشمه بر روی طیف خروجی، که در این حالت تنها مواد چشمه تعریف شده و از تعریف مواد جداره کپسول صرف نظر شده است (۲) بررسی اثر مواد کپسول و چشمه بر روی طیف خروجی، که در این حالت جنس مواد جداره هم در شبیه سازی لحاظ شده است. علاوه بر ذرات بتایی که از دیواره کپسول فرار می کنند تعدادی از این ذرات با احتمال بیشتر، در طی عبور از دیواره کپسول تولید پرتوهای ایکس تابش ترمزی می کنند که این پرتوها نیز ممکن است از دیواره کپسول فرار کرده و در نتیجه موجب افزایش دز گاما به خصوص، در نواحی نزدیک چشمه شوند. بنابراین دز ناشی از پرتوهای ایکس تابش ترمزی نیز باید در محاسبات مربوط به دزیمتری لحاظ شود. تالی F۸ (تالی ارتفاع پالس) مقدار فراوانی ذرات ثبت شده در هر انرژی در سلول مورد نظر را محاسبه می کند. این تالی مانند دیگر تالی های کد MCNP یک تالی ردیابی مسیر سلول نیست و در ترابرد ذرات، همه فرآیندهایی که از هنگام تولد تا نابودی ذره رخ می دهند را در نهایت با یکدیگر جمع کرده و در انرژی مربوطه ثبت می کند.

$$C(\%) = \frac{D_{(\text{Total with } \beta)} - D_{(\text{Total without } \beta)}}{D_{(\text{Total without } \beta)}} \times 100 \quad (1)$$

(۱) ناحیه حرارتی ( $E < 0.5 \text{ eV}$ ) که محتمل‌ترین انرژی جنبشی نوترون در این ناحیه  $0.0253 \text{ eV}$  است. (۲) ناحیه فوق حرارتی ( $0.5 \text{ eV} < E < 10 \text{ keV}$ ). (۳) ناحیه نوترون سریع ( $10 \text{ keV} > E$ ). (۱۹). در طی اندرکنش نوترون‌ها با محیط حاوی ذرات  $^{10}\text{B}$  به دلیل بالا بودن سطح مقطع نوترون حرارتی با این ذرات ( $3837 \text{ barn}$ ) احتمال جذب نوترون‌ها افزایش پیدا کرده و در پی آن ذرات

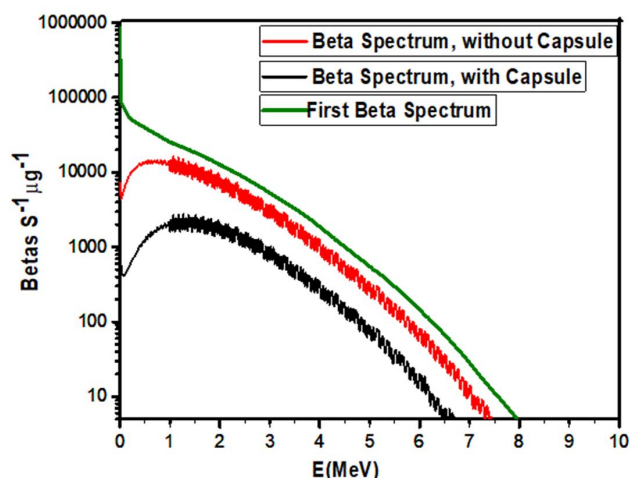
$$D_{\text{Total}} = D_{\text{fn}} \text{RBE}_{\text{fn}} + D_{\text{B}} \text{RBE}_{\text{B}} + D_{\gamma} \text{RBE}_{\gamma} + D_{\beta} \text{RBE}_{\beta} (\gamma)$$

مولفه های دز	واکنش اصلی	RBE ضرایب
نوترون ها	$^1\text{H}(n,n)^1\text{H}$	۶/۰
بورون	$^1\text{B}(n,\alpha)^4\text{He}$	۳/۸
گاما ثانویه	$^1\text{H}(n,\gamma)^1\text{H}$	۱/۰
گاما اولیه	-	۱/۰
بتا	-	۱/۰

$$C(\%) = \frac{D_{(\text{Total with Boron})} - D_{(\text{Total without Boron})}}{D_{(\text{Total without Boron})}} \times 100 \quad (3)$$

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های بتاهای خروجی از کپسول چشمه با استفاده از تالی F۱ همراه با طیف اولیه بتا جهت مقایسه در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. طبق این نتایج، تعداد پرتوهای قابل توجهی از دیواره کپسول بیرون می‌آیند که نادیده گرفتن آن‌ها در دز کلی به خصوص، در نواحی نزدیک محیط اطراف چشمه موجب تخمین کمتر دز از میزان واقعی می‌شود. در ادامه، شبیه‌سازی‌ها جهت محاسبات دز جذبی نوترون‌ها، گامای کل (مجموع گاماها ی اولیه و ثانویه) و ذرات بتا و تابش ایکس ترمزی در بر نامه هایی

333



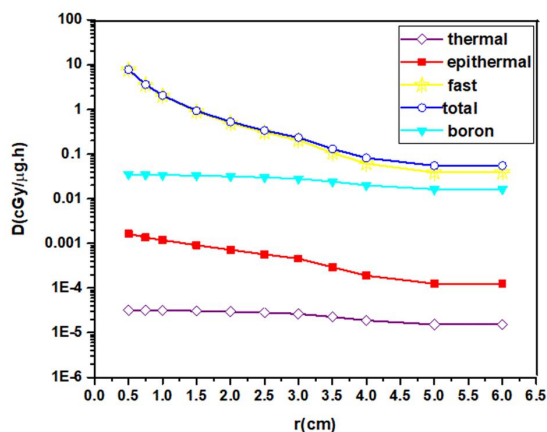
شکل (۲): مقایسه طیف بتاهای گسیل شده از چشمه  $^{252}\text{Cf}$  در اثر خودجذبی چشمه و اثر کپسول و مواد چشمه با طیف بتای اولیه (۲۲).

جدول (۲): آهنگ دز معادل مولفه‌های مختلف دز همراه با میزان اختلاف نسبی دز معادل کل با احتساب تابش ترمزی و ذرات بتا نسبت به بدون در نظر گرفتن آن‌ها بر حسب درصد.

C(%)	دز معادل نوترون (cSv/μgh)	دز معادل گاما کل (cSv/μgh)	دز معادل تابش ترمزی و ذرات بتا (cSv/μgh)	r(cm)
۱۹/۱۴	$4/66 \times 10^{-1} \pm 0/06$	$4/28 \times 10^{-1} \pm 0/05$	$9/73 \times 10^{-1} \pm 0/03$	۰/۵۰
۱۴/۱۸	$2/15 \times 10^{-1} \pm 0/03$	$2/03 \times 10^{-1} \pm 0/03$	$3/34 \times 10^{-1} \pm 0/01$	۰/۷۵
۹/۶۲	$1/22 \times 10^{-1} \pm 0/02$	$1/13 \times 10^{-1} \pm 0/02$	$1/28 \times 10^{-1} \pm 0/01$	۱/۰۰
۳/۵۶	$5/41 \times 10^{-1} \pm 0/01$	$4/99 \times 10^{-1} \pm 0/009$	$2/10 \times 10^{-1} \pm 0/003$	۱/۵۰
۱/۲۲	$2/97 \times 10^{-1} \pm 0/01$	$2/72 \times 10^{-1} \pm 0/006$	$3/94 \times 10^{-2} \pm 0/0011$	۲/۰۰
۰/۴۸	$1/85 \times 10^{-1} \pm 0/004$	$1/72 \times 10^{-1} \pm 0/004$	$9/75 \times 10^{-3} \pm 0/00048$	۲/۵۰
۰/۳۳	$1/24 \times 10^{-1} \pm 0/003$	$1/16 \times 10^{-1} \pm 0/003$	$4/95 \times 10^{-3} \pm 0/00005$	۳/۰۰
۰/۳۱	$6/39 \times 10^{-1} \pm 0/002$	$7/04 \times 10^{-2} \pm 0/0021$	$2/16 \times 10^{-3} \pm 0/00006$	۴/۰۰
۰/۳۴	$3/70 \times 10^{-1} \pm 0/001$	$4/10 \times 10^{-2} \pm 0/0014$	$1/39 \times 10^{-3} \pm 0/00004$	۵/۰۰
۰/۳۷	$2/33 \times 10^{-1} \pm 0/001$	$4/10 \times 10^{-2} \pm 0/0014$	$8/98 \times 10^{-4} \pm 0/000041$	۶/۰۰

نوترون‌ها در محیط به جا گذاشته می‌شود تمایز قائل شد. در شکل ۳، آهنگ دز جذبی نوترون‌ها برحسب نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع محاسبه شده و آهنگ دز جذبی ذرات بورون بدست آمده همراه با آهنگ دز کل برحسب فواصل مختلف از چشمه مشاهده می‌گردد.

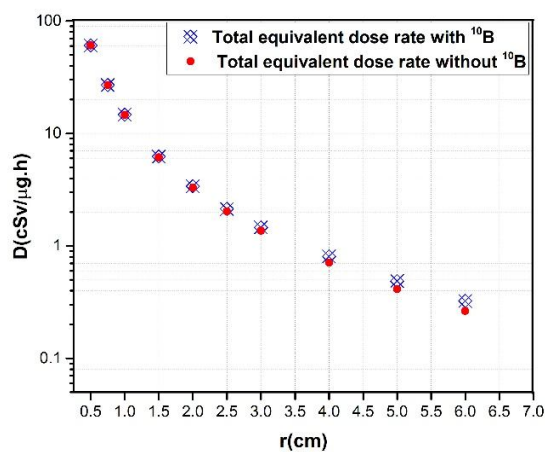
در گام بعد بررسی افزایش دز جذبی با اضافه نمودن ۵۰ ppm بورون در آب صورت گرفت. به دلیل RBE های متفاوت ذرات بورون و نوترون‌ها می‌بایست بین دز جذبی که ذرات بورون در طی گیراندازی نوترون ذخیره می‌کنند و مقدار انرژی که توسط



شکل (۳): آهنگ دز نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع همراه با آهنگ دز ذرات  $^{10}\text{B}$  و دز کل با استفاده از کد MCNPX

رابطه‌ی ۲ و مقادیر جدول ۱ بدست آمد. در شکل ۴ آهنگ دز معادل کل با حضور و عدم حضور ذرات  $^{10}\text{B}$  جهت مقایسه با یکدیگر بر حسب فواصل مختلف از چشمه مشاهده می‌گردد.

علاوه بر دز نوترون‌ها و بورون میزان دز ناشی از پرتوهای گاما، ذرات بتا و تابش‌های ایکس در محیطی که شامل آب و بورون می‌باشد نیز محاسبه شد و آهنگ دز معادل کل با استفاده از



شکل (۴): آهنگ دز معادل کل با حضور ذرات  $^{10}\text{B}$  و بدون حضور آن‌ها در آب

کل بدون حضور ذرات بورون، اختلاف نسبی بین این دو حالت با استفاده از رابطه ۳ بدست آمده است. در جدول ۴ مقادیر این اختلاف نسبی‌ها که نشان دهنده‌ی میزان تاثیر بورون در دز معادل کل می‌باشد مشاهده می‌گردد.

مقادیر آهنگ دز معادل هر یک از مولفه‌های دز با حضور ذرات  $^{10}\text{B}$  در آب در جدول ۳ مشاهده می‌گردد. جهت نشان دادن تمایز بین دز معادل کل با حضور ذرات بورون با غلظت ۵۰ ppm و دز معادل

جدول (۳): دز معادل مولفه های مختلف دز با حضور  $^{10}\text{B}$  با غلظت ۵۰ ppm بر حسب (cSv/μgh)

r(cm)	دز معادل تابش ترمزی و ذرات بتا	دز معادل گاما کل	دز معادل نوترون	دز معادل ذرات $^{10}\text{B}$
۰/۵۰	$۹/۷۱ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۴$	$۴/۲۸ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۵$	$۴/۶۴ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۳$	$۱/۳۳ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۱$
۰/۷۵	$۳/۳۳ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۲$	$۲/۰۳ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۳$	$۲/۱۴ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۲$	$۱/۳۱ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۱$
۱/۰۰	$۱/۲۸ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۱$	$۱/۱۴ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۲$	$۱/۲۲ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۱$	$۱/۳۰ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۱$
۱/۵۰	$۲/۱۰ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۳$	$۵/۰۵ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۹$	$۵/۳۸ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۶$	$۱/۲۵ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۱$
۲/۰۰	$۳/۹۵ \times ۱۰^{-۲} \pm ۰/۰۰۱۳$	$۲/۷۲ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۶$	$۲/۹۶ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۴$	$۱/۲۰ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۱$
۲/۵۰	$۹/۵۵ \times ۱۰^{-۳} \pm ۰/۰۰۰۴۸$	$۱/۷۱ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۴$	$۱/۸۴ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۳$	$۱/۱۴ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۱$
۳/۰۰	$۴/۲۳ \times ۱۰^{-۳} \pm ۰/۰۰۰۲۸$	$۱/۱۶ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۳$	$۱/۲۳ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۲$	$۱/۰۷ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۱$
۴/۰۰	$۲/۲۰ \times ۱۰^{-۳} \pm ۰/۰۰۰۱۰$	$۷/۱۶ \times ۱۰^{-۲} \pm ۰/۰۰۲۹$	$۶/۳۹ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۱۲$	$۹/۲۰ \times ۱۰^{-۲} \pm ۰/۰۰۰۱$
۵/۰۰	$۱/۴۱ \times ۱۰^{-۳} \pm ۰/۰۰۰۱۰$	$۳/۹۹ \times ۱۰^{-۲} \pm ۰/۰۰۲۱$	$۳/۷۰ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۰۸$	$۷/۶۰ \times ۱۰^{-۲} \pm ۰/۰۰۰۱$
۶/۰۰	$۹/۲۹ \times ۱۰^{-۴} \pm ۰/۰۰۰۱۰$	$۲/۹۹ \times ۱۰^{-۲} \pm ۰/۰۰۱۳$	$۲/۳۲ \times ۱۰^{-۱} \pm ۰/۰۰۰۱$	$۶/۱۶ \times ۱۰^{-۲} \pm ۰/۰۰۰۱$

جدول (۴): اختلاف نسبی دز معادل کل با در نظر گرفتن ذرات  $^{10}\text{B}$  با غلظت ۵۰ ppm در آب نسبت به عدم حضور آن در آب بر حسب درصد

r(cm)	۰/۵۰	۰/۷۵	۱/۰۰	۱/۵۰	۲/۰۰	۲/۵۰	۳/۰۰	۴/۰۰	۵/۰۰	۶/۰۰
D(%)	۰/۰۱	۰/۲۶	۰/۶۹	۱/۷۳	۳/۴۳	۵/۰۴	۷/۱۷	۱۳/۱۳	۱۸/۱۵	۲۲/۷۶

## بحث و نتیجه گیری

برای رسیدن به نتیجه درمان مطلوب در استفاده از چشمه  $^{252}\text{Cf}$  در براکی‌تراپی لازم است هر یک از پرتوهای گسیل شده از چشمه به دقت مورد بررسی قرار گیرند تا میزان دز کلی به دست آمده برآورد درستی از مقدار واقعی باشد. همان‌طور که در این مطالعه نشان داده شد، با توجه به ضخامت ۰/۲ cm کپسول اطراف چشمه نمی‌توان از ذرات بتا گسیل شده از چشمه و همچنین پرتوهای تابش ترمزی که در اثر اندرکنش ذرات بتا با دیواره کپسول تولید می‌شوند صرف نظر نمود. زیرا، نادیده گرفتن این پرتوها سبب تخمین کمتری از میزان واقعی دز به خصوص در نواحی نزدیک به چشمه می‌شود. با توجه به جدول ۲، نتایج نشان می‌دهند که، اختلاف نسبی مقادیر دز معادل در حالتی که دز ناشی از پرتوهای ایکس تابش ترمزی و ذرات بتا در نظر گرفته شود نسبت به حالتی که این مقادیر در دز معادل کل منظور نشوند در فاصله ۰/۵۰ cm از چشمه ۱۹٪ و در فواصل ۰/۷۵ cm و ۱/۰۰ cm از چشمه به ترتیب به بیش از ۱۴٪ و ۹٪ می‌رسد، با افزایش فاصله از چشمه میزان تأثیر این پرتوها در دز معادل کل کم شده به طوری که در فاصله ۲/۵۰ cm مقادیر آن به کمتر از ۵٪ می‌رسد. از آن‌جا که بیشترین

سهم مربوط به دز معادل کل مربوط به دز جذبی نوترون‌هاست، انتظار می‌رود که با اضافه نمودن ذرات بورون در آب به دلیل بالا بودن سطح مقطع گیراندازی نوترون حرارتی با این ذرات دز جذبی افزایش پیدا کند. علی‌رغم بهره‌ای که در استفاده از بورون برای افزایش دز در ناحیه توموری می‌توان برد به دلیل ایجاد سمیت و اثرات مخرب بیولوژیکی که ممکن است بر اندام‌های حیاتی بدن به جا بگذارد استفاده از مقادیر دلخواه بورون در کاربردهای کلینیکی مجاز نمی‌باشد. از این رو با توجه به محدوده توصیه شده (۵۰ ppm) انتظار می‌رود که با اضافه نمودن ذرات بورون در آب به دلیل بالا بودن سطح مقطع گیراندازی نوترون حرارتی با این ذرات دز جذبی افزایش پیدا کند. علی‌رغم بهره‌ای که در استفاده از بورون برای افزایش دز در ناحیه توموری می‌توان برد به دلیل ایجاد سمیت و اثرات مخرب بیولوژیکی که ممکن است بر اندام‌های حیاتی بدن به جا بگذارد استفاده از مقادیر دلخواه بورون در کاربردهای کلینیکی مجاز نمی‌باشد. از این رو با توجه به محدوده توصیه شده (۵۰ ppm) دزیمتری برای غلظت ۵۰ ppm بورون در آب صورت گرفت. با توجه به شکل ۳ دز ناشی از نوترون‌های سریع ( $E > ۱۰ \text{ keV}$ ) که عمده انرژی خود را در طی پراکندگی‌های کشسان با هیدروژن موجود در محیط از دست می‌دهند بیشترین میزان سهم در دز کلی نوترون‌ها را دارند، از طرفی میزان دز ناشی از بورون نسبت به نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی نشان می‌دهد که اضافه نمودن بورون در آب تا چه اندازه می‌تواند در افزایش دز کلی موثر باشد. با این وجود افزایش دز ناشی از گیراندازی نوترون در مقایسه با دز نوترون سریع کمتر است. با بدست آوردن دز معادل هر یک از پرتوهای موثر در دز کلی طبق جدول ۳، محاسبات مربوط به دز

چشمه ارائه می‌گردد باید براساس فیزیک حاکم بر مساله میزان دز ناشی از هر یک از پرتوهای گسیل شده از چشمه را به دقت مورد بررسی قرار داد تا بتوان برآورد درستی از میزان دز واقعی به عمل آورد. همچنین، طبق نتایج بدست آمده در این کار نشان داده شد که میزان ۵۰ppm بورون تا چه اندازه می‌تواند در افزایش دز کلی موثر باشد و به طور کلی جهت بهره بردن از خاصیت فیزیکی ذرات  $^{10}\text{B}$  برای افزایش دز در اهداف کلینیکی، با در نظر گرفتن عوارضی که ممکن است مقدار نامناسب آن برای بدن به همراه داشته باشد باید در جهت درمان مطلوب اقدام نمود.

### تشکر و قدردانی

از تمام کسانی که در این مطالعه ما را یاری کردند تشکر و قدردانی می‌گردد.

### تضاد منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تضاد منافی ندارند.

معادل کل انجام شد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد دز معادل کل در دو حالت با یکدیگر مقایسه شده است: ۱) دز معادل کل با احتساب دز ناشی از  $^{10}\text{B}$  ۲) دز معادل کل بدون در نظر گرفتن  $^{10}\text{B}$ . نتایج نشان می‌دهند که با افزایش فاصله از چشمه میزان تأثیر بورون در دز معادل کل افزایش پیدا می‌کند. با توجه به جدول ۴ میزان اختلاف نسبی دز معادل کل با در نظر گرفتن بورون نسبت به عدم حضور آن در آب در فواصل ۰/۵ cm تا ۶ cm از چشمه از ۰/۱ درصد به بیش از ۲۲ درصد می‌رسد. زیرا، با افزایش فاصله در اثر پراکندگی‌هایی که طی اندرکنش‌های نوترون با هیدروژن و اکسیژن آب رخ می‌دهد انرژی آن‌ها کم شده و تعداد بیشتری از نوترون‌ها به محدوده‌ی نوترون حرارتی می‌رسند. از طرفی نیز، به دلیل وجود ذرات  $^{10}\text{B}$  در آب و بالا بودن سطح مقطع گیراندازی نوترون‌های حرارتی با این ذرات سبب جذب نوترون‌ها شده و بدین ترتیب دز جذبی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، طبق یافته‌های موجود در این مطالعه در استفاده از مدل‌هایی که برای چشمه‌های براکی‌تراپی از جمله  $^{252}\text{Cf}$  بر اساس ابعاد و ضخامت کپسول اطراف

## References:

- Frederick C. H and et al. A review of Evaluation of time-dependent strengths of californium neutron sources by decay of  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{250}\text{Cf}$ , and  $^{248}\text{Cm}$ : Uncertainties by Monte Carlo method. Appl Radiat Isot 2021;167:109454.
- Chris Wang CK. Progress in californium-252 neutron brachytherapy. Brachytherapy. Kishi K. InTech; 2012. P. 34-58.
- Fortune E, Gauld I, Wang C. Gamma Dose near a New Miniature Cf-252 Brachytherapy Source. Med Phys 2011;175:73-6.
- Maruyama Y, Yoneda J, Powell D, Kryscio RJ. A review of californium-252 neutron brachytherapy for cervical cancer. Cancer 1991;68(6):1189-97.
- Beach JL, Schroy CB, Ashtari M, Harris MR, Maruyama Y. Boron neutron capture enhancement  $^{252}\text{Cf}$  Brachytherapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys 1990;18(6):1421-7.
- Barth RF, Zhang Z, Liu T. A realistic appraisal of boron neutron capture therapy as a cancer treatment modality. Cancer Commun 2018;38(1):36. Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s40880-018-0280-5>.
- Rivard MJ, Zamenhof RG. Moderated  $^{252}\text{Cf}$  neutron energy spectra in brain tissue and calculated boron neutron capture dose. Appl Radiat Isot 2004;61(5):753-7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.05.017>.
- Ghassoun J, Mostacci D, Molinari V. Detailed dose distribution prediction of  $^{252}\text{Cf}$  brachytherapy source with boron loading dose enhancement. Appl Radiat Isot 2010;68:265-70.
- Khosroabadi M, Ghorbani M, Rahmani F, Knaup C. Neutron capture therapy: a comparison between dose enhancement of various agents, nanoparticles and chemotherapy drugs. Australas Phys Eng Sci Med 2014;37(3):541-9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s13246-014-0284-7>.
- Wang C, Kelm R. SU-FF-T-61: Determination of neutron and gamma dose rates in water surrounding a new interstitial cf-252 brachytherapy source. Med Phys 2009;36(6Part9):2533. Available from: <http://dx.doi.org/10.1118/1.3181533>.



11. Wang C, Kelm R. Determination of Neutron and Gamma Dose Rates in Water Surrounding a New Interstitial 252Cf Brachytherapy Source. *Med Phys* 2009; 36(pt 6):2533.
12. Al-Saihati I, Naqvi AA. Neutron and gamma-ray doses from a 252Cf brachytherapy source in a water phantom. *J Radioanal Nucl Chem* 2013;296:963-6.
13. Ahmadi OL, Tavakoli-Anbaran H. Study of the rate of absorption dose of all rays emitted from the source of 252Cf brachytherapy source using Monte Carlo method. *Iran J Radiation Safety Measur* 2019; 7(3):29-34 (Persian).
14. Ahmadi OL, Tavakoli-Anbaran H. Study of the rate of absorption dose of all rays emitted from the source of 252Cf brachytherapy source using Monte Carlo method. *Sains Malays* 2020;49(3):693-701.
15. Karimi-Shahri K, Izadi-Vasafi GhH, Firoozabadi MM, Ghorbani M. Dosimetric effects of composition, location and size of tissue heterogeneities on 252Cf neutron brachytherapy. *Appl Radiat Isot* 2021;171:109639.
16. Arianto F, Handayani LT, Budi WS, Basuki P. Determination of Neutron Flux in Brain Cancer Boron Neutron Capture Therapy Using Monte Carlo Simulation. *Phys Comm* 2022;6(2):79-84.
17. Rivard MJ, Wierzbicki JG, Van den Heuvel F, Martin RC, McMahon RR. Clinical brachytherapy with neutron emitting 252Cf sources and adherence to AAPM TG-43 dosimetry protocol. *Med Phys* 1999; 26(pt 1):87-96.
18. Pelowitz D. MCNPX user's manual, LA-CP-07-1473 Version 2.6.0. Los Alamos National Laboratory, 2008.
19. Sakurai Y. Depth-Dose-Distribution control for incident beam directionality and irradiation field size in boron neutron capture therapy. *J Nucl Sci Technol* 2005;42(1):1-7.
20. Palmer LR, Goorly JT, Kiger WS, Busse PM, Riley KJ, Harling OK et al. Treatment planning and dosimetry for the Harvard -MIT phase I clinical trial of cranial neutron capture therapy. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 2002;53(pt 5):1361-79.
21. Rosidah S, Sardjono Y, Sumardi Y. Dose analyze of boron neutron capture therapy (BNCT) at skin cancer melanoma using MCNPX with neutron source from thermal column of kartini reactor. *Indonesian J Nucl Sci Technol* 2017;2(pt 3):111-23.
22. Fortune EC. Gamma and neutron dose profiles near a Cf-252 brachytherapy source [dissertation]. Georgia Institute of Technology, 2010.

## CALCULATION OF THE EFFECT OF BETA BEAMS, BREMSSTRAHLUNG X-RAY, AND THE USE OF $^{10}\text{B}$ PARTICLES ON INCREASING DOSE EQUIVALENT TO $^{252}\text{Cf}$ BRACHYTHERAPY SOURCE

Ome Leila Ahmadi<sup>1</sup>, Hossein Tavakoli-Anbaran<sup>\*2</sup>

Received: 31 July, 2022; Accepted: 01 January, 2023

### Abstract

**Background & Aims:**  $^{252}\text{Cf}$  is a source of emission of neutron, gamma rays, and beta and alpha particles. In the common models of this source used in brachytherapy, only neutrons and gamma rays contribute in the dosimetry around the source. In this study, while investigating the escape of beta rays and bremsstrahlung X-rays from the source capsule of brachytherapy  $^{252}\text{Cf}$  of Isotron model, the dosimetry of the total effective radiation in the water environment around the source was performed and the total equivalent dose increase was calculated using  $^{10}\text{B}$  particles.

**Materials & Methods:** Dosimetry for the neutron rays, the primary gammas, the secondary gammas, the beta particles, and the bremsstrahlung X-rays in the spherical water phantom performed with the radius of 20 cm at the distances of 0.5 to 6 cm from the source using the Monte Carlo MCNPX.2.6.0 code. Dose increment factor was calculated using B10 particles with a concentration of 50 ppm.

**Results:** The highest relative difference in dose values, taking into account the X-ray and the beta particles their absence at the distance of 0.5 cm from the source, was %19. As the distance from the source increases, the effect of these rays on the total equivalent dose rate decrease, as in the distance of 2.5 cm distance, its values reach less than % 0.5. The boron effect on the total equivalent dose increases by distance from the source, as at the 0.5 to 6 cm distances from the source will increase from %0.01 to more than % 22.

**Conclusion:** According to the findings of this study, the dose of the X-rays and the beta particles passing through the source capsule are effective in the dosimetry around the source, and increasing the dose by  $^{10}\text{B}$  depends on increasing the tumor source distance, which should be considered in clinical applications.

**Keywords:** Beta Beam,  $^{10}\text{B}$  Particles, Bremsstrahlung X-Ray,  $^{252}\text{Cf}$  Brachytherapy Source, Equivalent Dose

**Address:** Faculty of Physics and Nuclear Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

**Tel:** +989151188062

**Email:** tavakoli-anbaran@shahroodut.ac.ir

SOURCE: STUD MED SCI 2022; 33(6): 450 ISSN: 2717-008X

Copyright © 2022 Studies in Medical Sciences

This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, as long as the original work is properly cited.

<sup>1</sup> Ph. D In Nuclear Physics, Faculty of Physics and Nuclear Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Physics and Nuclear Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (Corresponding Author)