

## ارزیابی توزیع دز چشمه کلینیکی $^{252}\text{Cf}$ در حضور بور و گادولینیوم در براکی تراپی نوترونی با استفاده از روش مونت کارلو

ایزدی وصفی، غلامحسین\*؛ فیروزآبادی، محمد مهدی؛ جباری، ایرج<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم، گروه فیزیک

<sup>۲</sup>دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری های نوین، گروه مهندسی هسته ای

### چکیده:

هدف از انجام این تحقیق ارزیابی توزیع دز در حضور مواد بور و گادولینیوم و تعیین میزان افزایش دز در حضور این مواد در براکی تراپی نوترونی با چشمه  $^{252}\text{Cf}$  می باشد. شار نوترون، دز نوترون و گاما و همچنین میزان افزایش دز برای چشمه  $^{252}\text{Cf}$  با و بدون حضور این مواد با استفاده از کد MCNP5 تعیین گردید. نتایج افزایش دز در تومورهای حاوی گادولینیوم و بور را نشان می دهد که میانگین افزایش دز در فواصل مختلف، برای گادولینیوم ۵ برابر بور می باشد. افزایش دز از افزایش احتمال رخداد گیراندازی نوترون های گرمایی توسط این مواد نشأت گرفته و بزرگی آن به نوع محصولات گیراندازی ناشی از تفاوت در سطح مقطع جذب نوترون توسط این مواد و فاصله از چشمه بستگی دارد.

کلمات کلیدی: براکی تراپی،  $^{252}\text{Cf}$ ؛ افزایش دز، MCNP5

### مقدمه:

براکی تراپی نوعی روش درمان سرطان است که در آن منابع رادیواکتیو پوشش دار برای تحمیل بیشترین مقدار دز به تومور، در فاصله اندک از تومور قرار می گیرند. منابع تابش پرتو در براکی تراپی به سه دسته فوتونی، الکترونی و نوترونی تقسیم بندی می شود. براکی تراپی نوترونی بسیار موثر از براکی تراپی فوتونی و الکترونی در درمان تومورهای بدخیم و مقاوم در برابر تابش همچون ملانوما و گلیوبلاستوما می باشد [۱]. از اوایل دهه ۱۹۷۰ از  $^{252}\text{Cf}$  به عنوان چشمه براکی تراپی استفاده شده است. در دانشگاه کنتاکی نتایج تحسین برانگیزی در درمان تومورهای بدخیم زنانه با استفاده از چشمه  $^{252}\text{Cf}$  به دست آمد. بدون شک موفقیت های کلینیکی استفاده از چشمه  $^{252}\text{Cf}$  ناشی از مزیت های درمان تومور با نوترون های سریع می باشد. در سال های اخیر براکی تراپی نوترونی با استفاده از چشمه  $^{252}\text{Cf}$  بطور چشمگیری برای درمان سرطان های بدخیم مورد توجه قرار گرفته است. تاثیرگذاری چشمه  $^{252}\text{Cf}$  در افزایش میزان دز تحمیلی به تومور از طریق تزریق مواد گیرانداز نوترون به تومور افزایش می یابد. [۲،۳].

مواد بور-۱۰ و گادولینیوم-۱۵۷ به عنوان موادی برای درمان از طریق گیراندازی نوترون شناخته شده اند. با جذب نوترون های گرمایی توسط بور، ذرات پرنرژی آلفا و لیتیم گسیل می شوند که برد آن ها در حدود ۹-۵ میلیمتر (محدوده سلول) می باشد. به عبارتی این ذرات تمام انرژی خود را در محدوده سلول تخلیه می کند و از آسیب رسیدن به سلول های اطراف جلوگیری می شود. درمان از طریق گیراندازی نوترون توسط گادولینیوم روشی است که اخیرا پیشنهاد شده و بر پایه تبدیلات داخلی الکترون های ناشی از گیراندازی نوترون توسط گادولینیوم استوار است. مکانیسم این برهمکنش به فرم  $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$  می باشد و پرتوهای گامای تولید شده در این فرآیند، موجب افزایش دز می گردند [۴]. در این برهمکنش الکترون های کم انرژی نیز تولید می شود اما برد آن ها در بافت، بسیار کمتر از ابعاد سلولی می باشد.

هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی توزیع دز در حضور مواد بور و گادولینیوم و بررسی تاثیر این مواد در افزایش میزان دز در براکی تراپی نوترونی با چشمه  $^{252}\text{Cf}$  می باشد. در این تحقیق مجموعه کاملی از داده های دزیمتری برای چشمه  $^{252}\text{Cf}$  با و بدون حضور این مواد با استفاده شبیه سازی مونت کارلو به دست آمد.

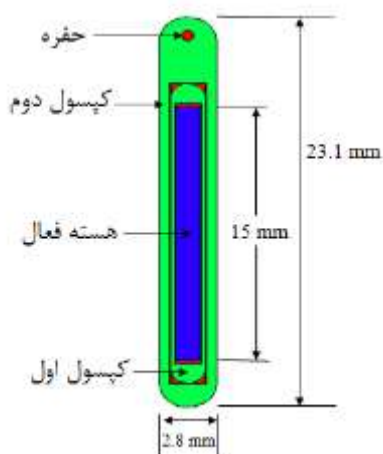
## روش کار:

برای ارزیابی توزیع دز نیاز به تحلیل دقیق مولفه های مختلف تابش و توصیف جز به جز توزیع دز با و بدون حضور این مواد می باشد. شار نوترون، دز نوترون و گاما و همچنین فاکتور افزایش دز چشمه  $^{252}\text{Cf}$  در حضور و عدم حضور بور و گادولینیوم با استفاده از کد MCNP5 محاسبه گردید [۵،۶،۷]. ساختار و ابعاد چشمه  $^{252}\text{Cf}$  شبیه سازی شده (موجود در آزمایشگاه ملی Oak Ridge) در شکل ۱ نشان داده شده است. در شبیه سازی صورت گرفته، چشمه  $^{252}\text{Cf}$  در مرکز یک فانتوم کروی به شعاع ۱۵ سانتیمتر قرار گرفته و فانتوم با آب به چگالی  $0.998 \text{ g/cm}^3$  و یا مخلوط آب-مواد برای توزیع یکنواخت از مواد بور-۱۰ و گادولینیوم-۱۵۷ با غلظت ۲۰۰ پی پی ام [۸] پر شده است.

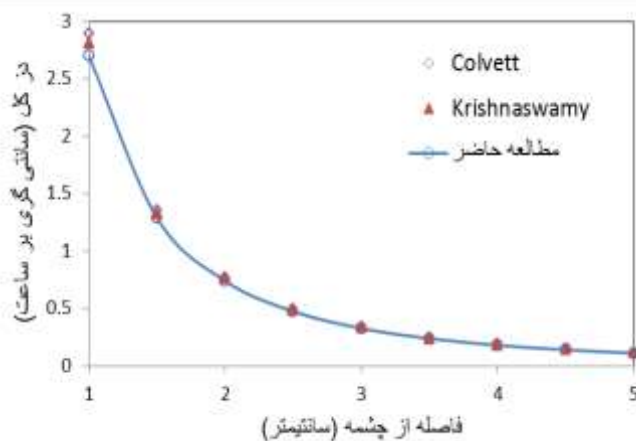
با فرض برابری کرما و دز جذب در فواصل مختلف، از تالی  $F_6$  برای محاسبه دز نوترون و دز گاما شامل دز گامای چشمه و گامای القایی استفاده شد. دز محصولات گیراندازی (دز جذب شده توسط مواد) ناشی از گیراندازی نوترون های گرمایی توسط این مواد با استفاده از تالی  $F_4$  و ضرایب تبدیل fluence به کرما به دست آمد [۷]. دز نوترون مجموع دز نوترون های چشمه ناشی از پراکندگی های متعدد نوترون های سریع در محیط آب، و دز محصولات گیراندازی می باشد. طیف انرژی نوترونی چشمه  $^{252}\text{Cf}$  به صورت طیف ماکسول با متوسط انرژی  $2/1$  مگاالکترون ولت و محتملترین انرژی  $0/7$  مگاالکترون ولت فرض شد. طیف فوتونی چشمه از محاسبات fortune در نظر گرفته شد [۶]. خطای نسبی محاسبات کمتر از ۱٪ می باشد.

## نتایج و بحث:

به منظور اعتبارسازی شبیه سازی صورت گرفته، مقایسه ای بین دز کل (مجموع دز نوترون، گامای چشمه و گامای القایی) به دست آمده در این تحقیق با نتایج تجربی Colvett و شبیه سازی Krishnaswam در شکل ۲ صورت گرفت [۲،۳]. مشاهده می گردد همخوانی نزدیکی بین نمودارها با اندکی تفاوت در فواصل نزدیک به چشمه وجود دارد. این تفاوت ها ناشی از تفاوت در طیف انرژی نوترونی و گامای مدل شده چشمه  $^{252}\text{Cf}$  در شبیه سازی ها و همچنین دقت و حساسیت وسایل اندازه گیری دز در نتایج تجربی می باشد.



شکل ۱: چشمه میله ای  $^{252}\text{Cf}$  شبیه سازی شده در این تحقیق



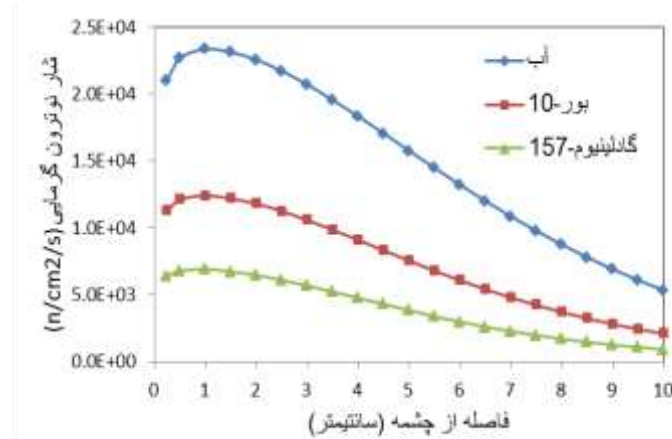
شکل ۲: مقایسه دز کل محاسبه شده در این تحقیق با نتایج دیگران

پس از اعتبارسنجی از کد مونت کارلو برای بررسی تاثیر بور و گادولینیوم بر توزیع دز استفاده گردید. شکل ۳ توزیع مکانی نوترون های گرمایی را در فانتوم آب با و بدون حضور این مواد نشان می دهد. شار نوترون های گرمایی همزمان با کاهش شار نوترون های سریع در اثر پراکندگی های متعدد، افزایش یافته و به ماکسیمم مقدار خود رسیده و سپس به دلیل گیراندازی نوترون های گرمایی توسط این مواد و هیدرژن موجود در آب کاهش یافته است.

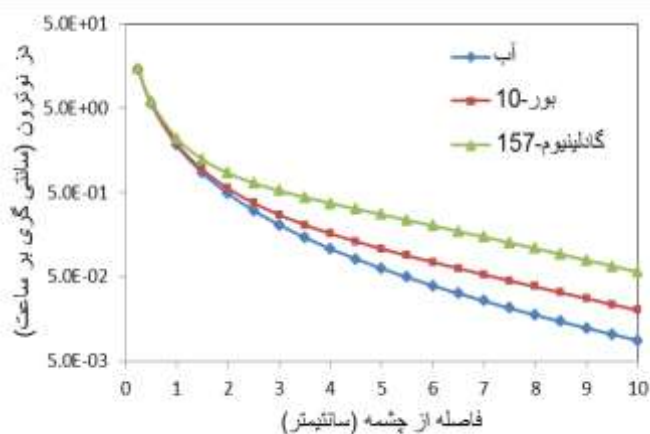
شکل ۴ روند تغییرات دز نوترون را به عنوان تابعی از فاصله نشان می‌دهد. با توجه به اینکه دز نوترون مجموع دز نوترون های چشمه و دز محصولات گیراندازی می‌باشد می‌توان استنباط نمود که تفاوت در میزان افزایش دز نوترون در حضور این مواد ناشی از تفاوت در میزان دز محصولات گیراندازی می‌باشد. به عبارتی میزان افزایش دز نوترون در حضور این مواد به نوع محصولات گیراندازی بستگی دارد.

شکل ۵ مقایسه بین میزان دز محصولات گیراندازی را بر حسب فاصله از چشمه نشان می‌دهد. شباهت و ارتباطی نزدیک بین میزان افزایش دز محصولات گیراندازی در شکل ۵ و کاهش شار نوترون های گرمایی در شکل ۳ با افزایش فاصله از چشمه وجود دارد. به عبارتی میزان افزایش دز محصولات ناشی از کاهش شار نوترون های گرمایی، برای گادولینیوم بیشتر از بور می‌باشد.

شکل ۶ تفاوت در میزان دز گامای چشمه و گامای القایی را با افزایش فاصله از چشمه نشان می‌دهد. پرتوهای گامای القایی در نتیجه گیراندازی نوترون های گرمایی توسط هیدرژن موجود در آب ( $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ ) حاصل می‌گردند. برخلاف دز نوترون، مقدار دز گامای القایی در محیط حاوی گادولینیوم کمتر از بور می‌باشد و دلیل آن ناشی از توانایی بیشتر گادولینیوم نسبت به بور در گیراندازی نوترون های گرمایی و در نتیجه کمتر بودن نوترون های گرمایی برای جذب توسط هیدرژن در محیط حاوی گادولینیوم می‌باشد.

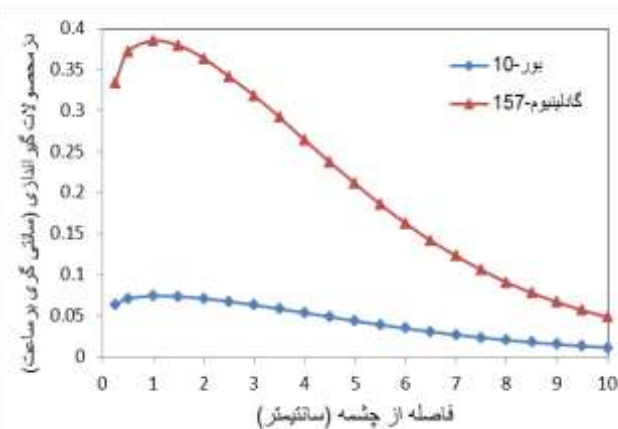


شکل ۳: شار نوترون های گرمایی در فانتوم آب با و بدون حضور مواد

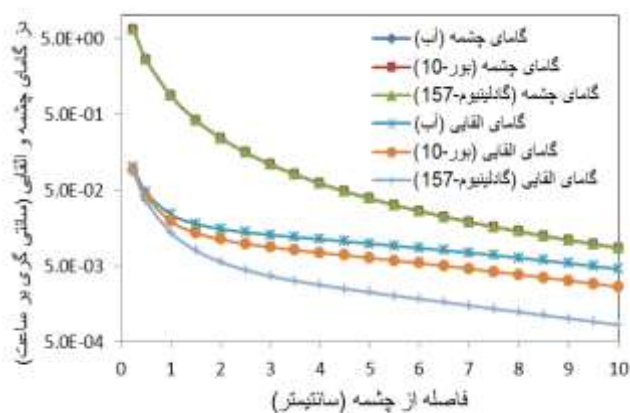


شکل ۴: توزیع دز نوترون در فواصل مختلف با و بدون حضور مواد

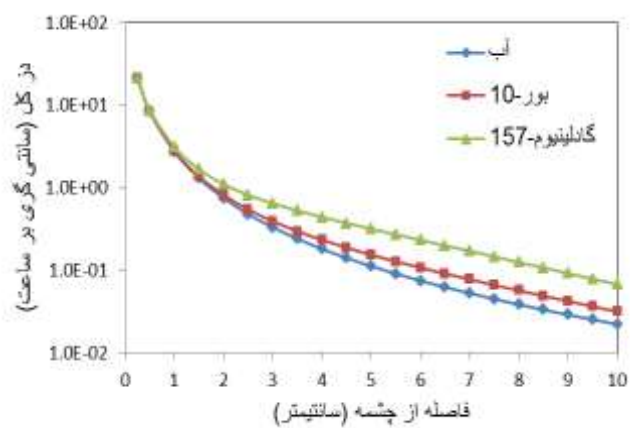
شکل ۷ تغییرات دز کل را با افزایش فاصله از چشمه در غیاب و حضور مواد نشان می دهد. مشاهده می شود که میزان افزایش دز کل در حضور گادولینیوم بیشتر از بور می باشد که دلیل آن با توجه به بیشتر بودن دز نوترون و کمتر بودن دز گامای القایی در محیط حاوی گادولینیوم نسبت به بور، بیشتر بودن دز محصولات گیراندازی برای گادولینیوم در مقایسه با بور می باشد. بنابراین میزان افزایش دز کل به میزان دز محصولات گیراندازی یا به عبارتی بزرگی سطح مقطع گیراندازی نوترون های گرمایی توسط این مواد بستگی دارد.



شکل ۵: تغییرات دز محصولات برحسب فاصله از چشمه با غلظت 200 ppm



شکل ۶: دز گامای چشمه و القایی در فانتوم آب با و بدون حضور مواد



شکل ۷: تغییرات دز کل برحسب فاصله از چشمه با و بدون حضور مواد

برای مقایسه تأثیر مواد مختلف در افزایش میزان دز، میزان افزایش دز برای بور و گادولینیوم در جدول ۲ محاسبه گردید. با توجه به داده های جدول، میزان افزایش دز با افزایش فاصله از چشمه به تدریج افزایش یافته و به بیشترین مقدار خود معادل با ۲۲۵/۸۰۵ و ۴۷/۷۲۲ به ترتیب برای گادولینیوم و بور در فاصله حدود ۸ سانتیمتری از چشمه می رسد و از این فاصله به بعد مقدار آن کاهش می یابد. به عبارتی میزان تاثیرگذاری مواد گادولینیوم و بور در افزایش میزان دز به فاصله از چشمه بستگی دارد.

جدول ۲: میزان افزایش دز بور و گادولینیوم با غلظت 200ppm در فواصل مختلف

فاصله	بور-۱۰	گادولینیوم-۱۵۷
۱	۲/۶۷۷	۱۳/۸۵۸
۲	۹/۳۵۱	۴۷/۸۵۳
۳	۱۸/۷۱۴	۹۴/۷۶۷
۴	۲۸/۶۷۹	۱۴۳/۰۶۶
۵	۳۷/۳۳۹	۱۸۴/۱۹۶
۶	۴۳/۷۲۲	۲۱۱/۸۰۷
۷	۴۷/۰۷۵	۲۲۵/۵۷۴

۸	۴۷/۶۲۲	۲۲۵/۸۰۵
۹	۴۶/۱۹۷	۲۱۸/۵۹۱
۱۰	۴۲/۸۶۳	۲۰۳/۹۴۶

### نتایج:

حضور مواد بور و گادولینیوم در تومور به دنبال پرتوگیری از چشمه براکی تراپی  $^{252}\text{Cf}$  موجب افزایش دز در تومور آغشته به این مواد می‌گردد که منجر به بهبود بهره درمان می‌شود. میزان افزایش دز برای گادولینیوم بیشتر از بور می‌باشد و تاثیرگذاری این مواد در افزایش میزان دز به نوع محصولات گیراندازی و فاصله از چشمه بستگی دارد. این بستگی از تفاوت در بزرگی سطح مقطع گیراندازی نوترون توسط این مواد و کاهش انرژی میانگین نوترون‌ها در اثر تضعیف با افزایش فاصله از چشمه ناشی می‌شود که موجب افزایش احتمال رخداد گیراندازی نوترون‌های گرمایی و به تبع آن افزایش میزان دز می‌گردند.

### مراجع:

1. Maruyama Y, Californium-252: New radioisotope for human cancer therapy. Endocurietherapy. Hyperthermia Oncology; 2: 171-187 (1986).
2. Colvet R. D, Rossi H. H, Krishnaswamy V, Dose distributions around a californium-252 needle. Phys. Med. Biol; 17(3): 356-64 (1972).
3. Krishnaswamy V, Calculated depth dose tables for californium-252 sources in tissue. Phys. Med. Biol; 17(1): 56-63 (1972).
4. Yosh Maruyama J. G, Porter A. T, Measurement of augmentation of  $^{252}\text{Cf}$  implant by  $^{10}\text{B}$  and  $^{157}\text{Gd}$  neutron. Med. Phys; 21(6): 787-90 (1994).
5. Briesmeister J.F., Ed, MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code. Version5. LA 12625, Los Alamos National Laboratory, (2003).
6. E. C Fortune. Gamma and neutron dose profiles near a Cf-252 brachytherapy source. M. Sc. Thesis in Mechanical Engineering. Georgia Institute of Technology. (2010).
7. Chadwick M.B, Barschall H.H, Caswell R.S, A consistent set of neutron kerma coefficients from thermal to 150MeV for biologically important materials. Med. Phys; 26(6): 974-91 (1999).
8. Khosroabadi M, Ghorbani M, Rahmani F et al. Neutron capture therapy: a comparison between dose enhancement of various agents, nanoparticles and chemotherapy drugs. Australas Phys Eng Sci Med ;37:541-49 (2014).