

بررسی استفاده از کندکننده ترکیبی در مجموعه‌ی شکل دهنده‌ی طیف جهت استفاده در روش درمانی BNCT

احمدی گنجه، زهرا^(۱) - اسلامی کلانتری، محمد^(۱)

^(۱) دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، گروه هسته‌ای

چکیده

واکنش ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ از جمله‌ی واکنش‌های تولید نوترون مبتنی بر شتابدهنده‌ها است که با شکل‌دهی طیف حاصل از آن با استفاده از یک مجموعه‌ی شکل دهنده‌ی طیف می‌توان به طیف مناسب جهت درمان به روش BNCT دست یافت. یکی از قسمت‌های مهم یک شکل دهنده، کندکننده است که که محدودی انرژی نوترون‌ها را در راستای مناسب جهت درمان جابه‌جا می‌کند. در این کار شکل دهنده با ترکیبات مختلفی از کندکننده‌ها در قالب دو کندکننده با استفاده از کد MCNPX مورد محاسبه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند بسیاری این ترکیبات می‌توانند شار نوترون‌های فوق‌گرمایی از مرتبه‌ی بالا را فراهم آورند و علاوه بر آن دز نوترون‌های سریع را به نسبت زیادی کاهش دهند.

واژگان کلیدی: BNCT، MCNPX، کندکننده، سطح مقطع پراکندگی

مقدمه

تومور مغزی رشد یک توده غیرطبیعی در مغز است که امکان دارد خوش‌خیم یا بدخیم باشد. به طور کلی سه روش درمانی جهت درمان تومورهای مغزی مورد استفاده قرار می‌گیرد که شامل جراحی، پرتودرمانی و شیمی‌درمانی است. به دلیل مشکلات استفاده از روش‌های جراحی و شیمی‌درمانی امروزه استفاده از روش پرتودرمانی روز به روز در حال گسترش است. مبنای روش پرتودرمانی، قرار دادن سلول‌های بدخیم در معرض پرتوهای یونیزان می‌باشد که می‌تواند منجر به مرگ و از بین رفتن این سلول‌ها گردد. هدف ایده‌آل در پرتودرمانی این است که تومور مورد نظر بیشترین دز پرتو را دریافت کند و در همان حال بافت‌های سالم اطراف کمترین مقدار پرتوگیری را داشته باشند.^۱ BNCT از جمله‌ی روش‌های پرتودرمانی است. این روش درمانی برای اولین بار در سال ۱۹۳۶ توسط لوچر مطرح شد و مورد بررسی قرار گرفت [۱]. وی اظهار داشت که اگر بتوان هسته‌های بور، که یک ایزوتوپ پایدار است را درون سلول‌های تومور متمرکز کرده سپس باریکه‌ای از نوترون‌ها با انرژی و شدت مناسب روی منطقه تومور تابانده شود، در نتیجه‌ی این تابش نوترون‌های حرارتی جذب ${}^{10}\text{B}$ می‌شوند و برای زمان کوتاهی حدود 10^{-12} ثانیه به صورت اتم‌های برانگیخته ${}^{11}\text{B}$ در می‌آیند و سپس واپاشیده می‌شوند. ذره آلفا و هسته لیتیم تولیدی در واکنش مطرح شده

¹ Boron Neutron Capture Therapy

در مسیر حرکت خود انرژی زیادی را منتقل می‌نمایند. به طوری که این فرایند باعث نابودی سلول‌های سرطانی در محدوده‌ی واکنش، بدون آسیب‌رسانی به بافت سالم می‌شود [۲]. موضوع مهمی که باید به آن دقت شود این است که برای تولید نوترون باید از یک چشمه مناسب استفاده نمود که واکنش ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ از جمله این چشمه‌هاست. نوترون‌های گسیل شده از چشمه‌های مختلف به دلیل محدوده انرژی نامطلوب، به صورت مستقیم قابل استفاده در روش درمانی BNCT نمی‌باشند. برای رساندن محدوده انرژی نوترون‌های تولید شده از چشمه به ناحیه‌ی انرژی نوترون‌های فوق‌گرمایی که محدوده لازم جهت استفاده در BNCT می‌باشد، از مجموعه‌ی شکل‌دهنده‌ی طیف که ${}^2\text{BSA}$ نامیده می‌شود استفاده می‌کنند. در واقع هدف از طراحی BSA، دستیابی به شار نوترون لازم با کمترین آلودگی ناشی از نوترون‌های سریع، گرمایی و همچنین آلودگی گاما می‌باشد. یکی از مهمترین قسمت‌های یک BSA کندکننده است. زمانی که نوترون‌ها از ماده‌ای عبور می‌کنند معمولاً دو نوع از واکنش‌های هسته‌ای واکنش‌های دیگر را تحت الشعاع قرار می‌دهند: گیراندازی تابشی نوترون و برخوردهای کشسان بین نوترون‌ها و هسته‌های ماده. در برخی مواد، سطح مقطع گیراندازی آنقدر کوچک است که نوترون‌ها با هسته‌های ماده عمدتاً در برخوردهای کشسان برهم‌کنش می‌کنند در عبور از چنین موادی که عمدتاً کندساز نامیده می‌شوند از سرعت نوترون‌های فرودی که در آغاز پرنرژی‌اند کاسته می‌شود، یا به عبارتی نوترون‌ها کند می‌شوند [۳]. انتخاب یک کندکننده مناسب جهت کمترین کاهش در مقدار شار نوترون‌های فوق‌گرمایی و بیشترین کاهش در ناحیه‌ی نوترون‌های سریع از اهمیت بالایی برخوردار است. در این کار سعی شده است با انتخاب ترکیبات دوتایی مختلفی از کندکننده‌ها در BSA که قبلاً بهینه‌سازی شده است یک مجموعه‌ی مناسب در راستای استفاده در روش درمانی BNCT بازطراحی گردد. تمامی محاسبات با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX انجام گرفته است.

روش کار

واکنش ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ از جمله واکنش‌های با بازده بالا جهت تولید نوترون برای استفاده در روش درمانی BNCT است. با این وجود استفاده از لیتیم به عنوان چشمه تولید نوترون معایبی دارد که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان نقطه ذوب پایین (180°C) و هدایت حرارتی کم ($84/7 \text{ w/m}^\circ\text{k}$) آن را نام برد. با توجه به کارآمدی لیتیم جهت تولید نوترون، محققان بسیاری برای کاهش شار حرارتی وارد شده به آن تلاش کرده‌اند که استفاده از یک سیستم خنک‌کننده از معمولترین روش‌های پیشنهاد شده جهت برآورده کردن این هدف است. این روش شامل انتخاب یک زیرلایه مناسب برای هدف لیتیم به همراه لوله‌های خنک‌کننده است که از داخل زیرلایه عبور کرده‌اند. پس از طراحی هدف تولید نوترون به همراه سیستم خنک‌کننده، با توجه به اینکه عموماً

² Beam Shaping Assembly

طیف خروجی از چشمه‌ی نوترونی به صورت مستقیم قابل استفاده در BNCT نمی‌باشد، لازم است توسط BSA شکل‌دهی شود. در واقع هدف از طراحی BSA، دستیابی به شار نوترون لازم با کمترین آلودگی ناشی از نوترون‌های سریع، گرمایی و همچنین آلودگی گاما می‌باشد. BSA طراحی شده در این مقاله که جهت تولید شار مناسب نوترون برای درمان بوسیله BNCT طراحی شده، شامل بازتابنده، موازی‌ساز، فیلتر نوترون‌های گرمایی و گاما و همچنین کندکننده است. در برخورد‌های کشسان بین دو ذره هنگامی بیشترین مقدار انرژی از یکی به دیگری منتقل می‌شود که جرم آنها یکسان باشد. از این رو وقتی نوترونی با یک پروتون برخورد رو در رو می‌کند تمامی انرژی جنبشی خود را می‌تواند از دست بدهد. در برخورد‌های مایل (برخورد‌هایی که رو در رو نباشند و تحت زاویه انجام گیرند) انرژی کمتری انتقال داده می‌شود. بنابراین مواد هیدروژنی در کندسازی نوترون‌ها موثرترند. هنگامی که نوترون‌ها با هسته‌های سنگین‌تر از پروتون‌ها برخورد کنند تنها کسر کوچکی از انرژی جنبشی خود را حتی در یک برخورد رو در رو از دست می‌دهند و تعداد زیادی از این رو در رویی‌ها لازم است تا سرعت آنها کند شود. نوترون‌ها در کندساز تنها آهسته می‌شوند، هرگز به طور کامل متوقف نمی‌شوند. باریکه‌ای از نوترون‌های با انرژی بالا که بر یک کندساز نوعی همچون گرافیت یا آب سنگین فرود می‌آیند، به دلیل ویژگی‌های مناسب کندکنندگی در کمترین زمان ممکن به باریکه‌ای از نوترون‌های گرمایی تبدیل می‌شوند. ماده‌ای به عنوان کندکننده انتخاب می‌شود که جذب پایینی داشته و بتواند نوترون را طی اندرکنش کشسان (حتی الامکان کشسان بدون آلودگی گاما) به ناحیه‌ی نوترون-های فوق‌حرارتی برساند. این ملاحظات نشان می‌دهند که هسته‌های سبک باید در کندکردن نوترون‌ها مورد استفاده قرار گیرند. هسته‌های سبک با جذب کم عبارتند از C ، O ، 2H ، Be . استفاده از ترکیبات این مواد به عنوان کندکننده می‌تواند شرایط مناسبی را فراهم آورد [۴ و ۳]. در ادامه‌ی کار قبلی در این کار استفاده از دو کندکننده هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است.

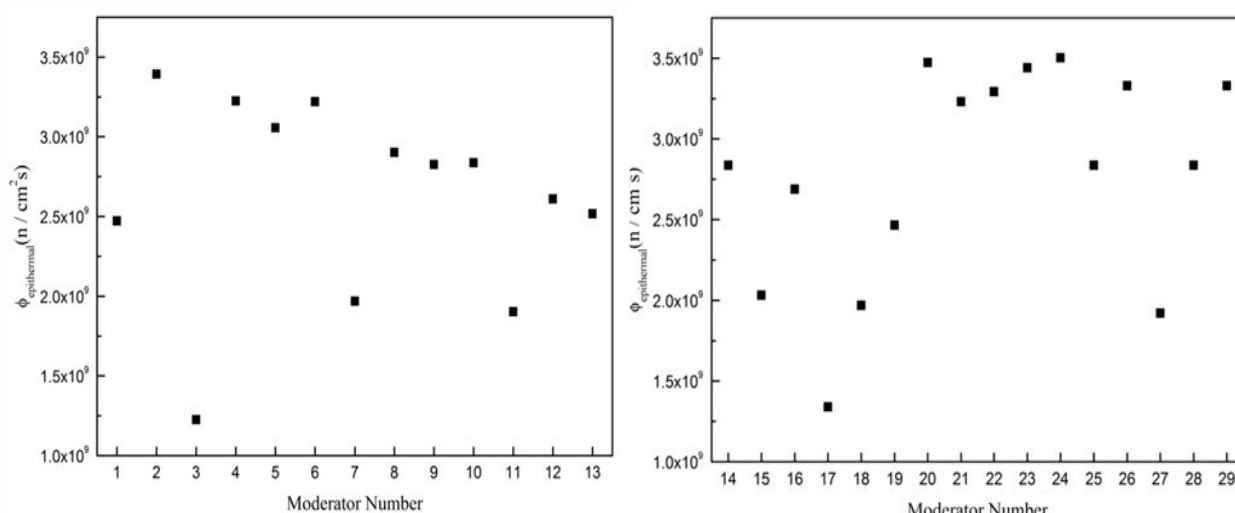
نتایج

به دلیل نامناسب بودن طیف به دست آمده از پشت هدف لیتیم و سیستم خنک‌کننده برای درمان، مجموعه‌ی شکل‌دهنده‌ی طیفی شامل کندکننده D_2O ، بازتابنده گرافیت، فیلتر نوترون‌های گرمایی کادمیوم و موازی‌ساز بریلیم اکسید طراحی شد. سیستم طراحی شده تمامی معیارهای تعیین شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی را برآورده می‌کند. تمامی محاسبات مربوط به بهینه‌سازی در مرجع [۵] ذکر گردیده است. در جهت انتخاب کندکننده مناسب از ۵ کندکننده پیشنهاد شده شامل D_2O ، LiF ، BeO ، MgF_2 ، TiF_3 ، در هر مرحله طبق جدول ۱، ترکیبی از دو کندکننده در ضخامت‌های مختلف در سیستم قرار داده شده و نتایج اندازه‌گیری شدند. کندکننده‌های مذکور دارای سطح مقطع پراکندگی بالا در ناحیه‌ی نوترون‌های با انرژی بالا و سطح مقطع پراکندگی پایین در ناحیه‌ی نوترون‌های با محدوده‌ی انرژی فوق‌گرمایی است. نمودارهای مربوط به

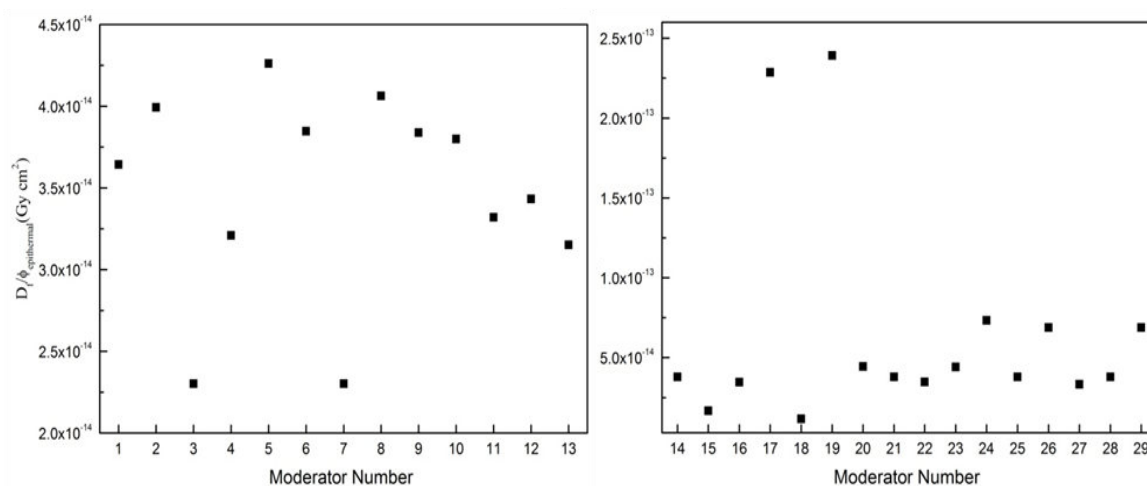
شار نوترون‌های فوق گرمایی برای ۲۹ ترکیب مختلف از کندکننده‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین به منظور مشاهده میزان اثرگذاری در کاهش دز نوترون‌های سریع، نمودار نسبت دز نوترون‌های سریع به شار نوترون‌های فوق گرمایی برای این ترکیبات در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱: ترکیبات مختلف از کندکننده‌های امتحان شده

شماره کندکننده	ترکیبات 1(cm)+2(cm)	۱۵	10 LiF +10BeO
۱	20D ₂ O	۱۶	15LiF+5BeO
۲	5D ₂ O+15LiF	۱۷	5 MgF ₂ +15BeO
۳	5D ₂ O+15 BeO	۱۸	10 MgF ₂ +10BeO
۴	5D ₂ O+15MgF ₂	۱۹	15 MgF ₂ +5BeO
۵	5D ₂ O+15TiF ₃	۲۰	5 MgF ₂ +15LiF
۶	10D ₂ O+10LiF	۲۱	10MgF ₂ +10LiF
۷	10D ₂ O+10BeO	۲۲	15MgF ₂ +5LiF
۸	10D ₂ O+10MgF ₂	۲۳	5TiF ₃ +15MgF ₂
۹	10D ₂ O+10TiF ₃	۲۴	5TiF ₃ +15LiF
۱۰	15D ₂ O+5LiF	۲۵	10TiF ₃ +10MgF ₂
۱۱	15D ₂ O+5Beo	۲۶	10TiF ₃ +10LiF
۱۲	15D ₂ O+5MgF ₂	۲۷	10TiF ₃ +10BeO
۱۳	15D ₂ O+5TiF ₃	۲۸	15TiF ₃ +5MgF ₂
۱۴	5LiF+15BeO	۲۹	15TiF ₃ +5LiF



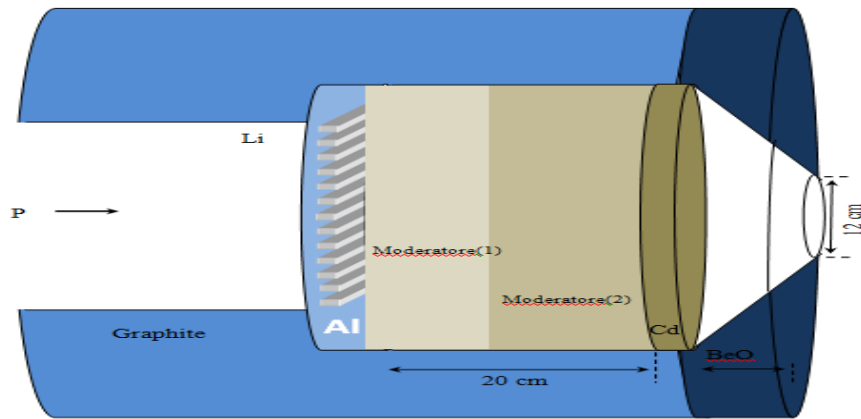
شکل ۱: شار نوترون‌های فوق‌گرمایی برای ۲۹ ترکیب دوتایی از کندکننده‌ها



شکل ۲: نسبت دز نوترون‌های سریع به شار نوترون‌های فوق‌گرمایی برای کندکننده‌های مربوط به شکل ۱

همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است، کلیه ترکیبات انتخاب شده حدود تعیین شده توسط آرژانس را فراهم می‌آورند و بسیاری از ترکیبات می‌توانند شار فوق‌گرمایی بیشتری نسبت به کندکننده D_2O که قبلاً به عنوان کندکننده مناسب انتخاب شده بود در انتهای BSA داشته باشند. با توجه به نمودارهای ۱ و ۲، مواردی از ترکیبات انتخاب شده با شماره‌های ۴، ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۶، ۲۲، ۲۵ و ۲۸ با داشتن مقدار بیشتر شار

نوترون‌های فوق‌گرمایی، همچنین می‌توانند مقدار کمتری دز نوترون‌های سریع نسبت به کندکننده D_2O مربوط به مرجع ۵ فراهم آورند. مقایسه‌ای از نتایج به دست آمده و چند مورد از کارهای انجام شده در جدول ۲ و همچنین شماتیکی از سیستم طراحی شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. شماتیکی از سیستم طراحی شده

جدول ۲: مشخصات طیف در انتهای BSA و مقایسه نتایج به دست آمده با چند مورد از کارهای انجام شده

کندکننده	محدوده‌ی آژانس	۴	۱۰	۱۲	۱۳	۱۶
شار نوترون فوق‌گرمایی ($\times 10^9 \text{ n/cm}^2 \text{ s}$)	۰/۵	۳/۲۲	۲/۸۳	۲/۶	۲/۵	۲/۶
\dot{D}_f/ϕ_{epi} ($\times 10^{-13} \text{ Gycm}^2$)	۲	۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۴

چشمه‌ی	چشمه‌ی	چشمه‌ی	کندکننده‌ی	۲۸	۲۵	۲۲
[۸] ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	[۷] فوتونوترون	[۶] D-T	خالص D_2O [۵]			
۰/۹۵	۰/۲۹	۰/۸۱۹	۲/۴۷	۲/۸۳	۲/۸۳	۳/۲۹
۴/۳۷	۶/۳	۷/۹۸	۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۳۷	۰/۳۴

نتیجه‌گیری

از جمله خصوصیات یک کندکننده ایده‌آل داشتن سطح مقطع پراکندگی بالا در ناحیه‌ی نوترون‌های با انرژی بالا و سطح مقطع پراکندگی پایین در ناحیه‌ی نوترون‌های با محدوده‌ی انرژی فوق‌گرمایی است. با توجه با این نکته ترکیبات مختلفی از کندکننده‌ها در جهت انتخاب کندکننده مناسب مورد محاسبه قرار گرفتند. ترکیبات $(5D2O+15MgF_2)$ ، $(15D2O+5LiF)$ ، $(15D2O+5MgF_2)$ ، $(15D2O+5TiF_3)$ ، $(15LiF+5BeO)$ ، $(15MgF_2+5LiF)$ ، $(10TiF_3+10MgF_2)$ ، $(15TiF_3+5MgF_2)$ به لحاظ داشتن شار نوترون‌های فوق‌گرمایی بالا و کمترین مقدار دز نوترون‌های سریع به عنوان کندکننده مناسب انتخاب گردیدند. این ترکیبات می‌توانند شار نوترون‌های فوق‌گرمایی بیشتر از $2/49 \times 10^9$ n/cm²s و نسبت \dot{D}_p/\dot{D}_{epi} کمتر از $0/39 \times 10^{-13}$ Gy/cm² که مربوط به کندکننده خالص D₂O است فراهم آورند.

مراجع

- [1] Lee. C. L, Zhou. X. L, Thick target neutron yields for the ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ reaction near threshold, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B 152, 1-11, 1999.
- [2] Bleuel. DL, Donahue. RL, Ludewigt. BA, Vujic. J, Designing accelerator based epithermal neutron beams for boron neutron capture therapy, Med Phys, 1725-1734, 1998.
- [3] Weidner. R, Sells. R, Elementary Modern Physics, 1973.
- [4] Reuss .P, Neutron Physics, 2008.
- [5] AhmadiGanjeh. Z, Masoudi. S. F, Neutron beam optimization based on ${}^7\text{Li}(p;n){}^7\text{Be}$ reaction for treatment of deep-seated brain tumors by BNCT. Chinese Phisycs C, 38.108203(1-6), 2014.
- [6] Montagnini. B, Cerullo. N, Esposito. J, Giusti. V, Mattioda. F, Varone. R, Spectrum shaping of accelerator-based neutron beams for BNCT. Nucl. Instrum, Methods Phys. Res. A 476, 90-98, 2002
- [7] Rahmani. F, Shahriari. M, Beam shaping assembly optimization of linac based BNCT and in-phantom depth dose distribution analysis of brain tumors for verification of a beam model. Ann Nucl Energy 38:404-409, 2010.
- [8] M. S. Herrera, S. J. Gonzalez, D. M. Minsky, A. J. Kreiner, Evaluation of performance of an accelerator-based BNCT facility for the treatment of different tumor Targets, Phys. Med, 29, 436-449, 2013.