



انتخاب بهترین طیف شار نوترون تولیدی از واکنش $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ جهت استفاده در BNCT

محمد رضا اسکندری*، حسین خردادی

دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، گروه فیزیک

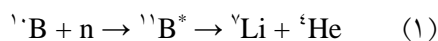
چکیده

در این تحقیق بر روی واکنش همجوشی $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ به عنوان چشمه نوترون برای دستیابی به خلوص طیفی مناسب و همچنین شار نوترونی مناسب جهت BNCT تمرکز کرده ایم. از آنجا که نوترون های مناسب جهت BNCT در محدوده نیمه حرارتی هستند، نوترون های حاصل از واکنش $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ باید به نوترون های نیمه حرارتی تبدیل شوند. برای این منظور یک سیستم استوانه ای تشکیل شده از فلئورید لیتیوم، اکسید آلومینیوم، تری فلئورید آلومینیوم و گادولینیوم که به ترتیب به عنوان کندکننده، بازتابنده، فیلتر و جاذب نوترون های حرارتی می باشند، شبیه سازی و در سر راه پرتو عبوری قرار داده شد. با توجه به نتایج، شار حاصل از این شبیه سازی به لحاظ خلوص طیفی برای کاربردهای BNCT مناسب می باشد.

کلید واژه: BNCT، مونت کارلو، واکنش $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ ، نوترون نیمه حرارتی، کندکننده، فیلتر، بازتابنده

مقدمه

یکی از روشهای نوین درمان سرطان ها به خصوص تومورهای مغزی (گلیوبلاستوما مولتی فرم) و سرطان پوست (ملانوما) استفاده از روش نوترون تراپی با بور می باشد. در این روش از دو مولفه استفاده می شود. مولفه اول ترکیباتی از ^{10}B می باشد که در محل مورد نظر تمرکز یافته و مولفه دوم شامل تابشی از نوترون های با طیف مناسب می باشد. پس از تابش، هسته های بور با گیراندازی نوترون طی واکنشی که به صورت:



می باشد، پاره های سنگین و پر انرژی تولید می کند [۱-۲]. برد محصولات این واکنش با توجه به انرژی آنها در حدود ابعاد سلولی است و با تخلیه انرژی خود در سلول های سرطانی باعث نابودی آنها می شوند. برای رسیدن به شرایط مطلوب، لازم است که طیف و انرژی منبع نوترونی بهینه شود [۳-۴]. ضمن اینکه نوترون-



های سریع و حرارتی و نیز پرتوهای گاما باید حذف شوند، تا باعث افزایش دز نامطلوب نگردند. میزان مجاز این پارامترها در جدول ۱ آمده است [۵].

در این مقاله از واکنش همجوشی ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ به عنوان چشمه نوترونی مناسب در نوترون تراپی با بور استفاده شده است. مزیت انتخاب این واکنش دوتریوم است که امکان ساخت و تهیه آن در کشور وجود دارد. به منظور بهینه‌سازی طیف نوترون برای درمان تومورهای مغزی، مجموعه شکل دهنده پرتو (BSA) شامل کندکننده، بازتابنده، فیلتر و جاذب نوترون حرارتی توسط کد محاسباتی شبیه‌سازی، طراحی و بهینه شده است. هدف از این بهینه‌سازی دستیابی به طیفی با محدودیت‌های ذکر شده در جدول ۱ می‌باشد. در هر مرحله سعی شد تا مواد، ضخامت‌ها، و ترتیب قرار گیری آنها برای رسیدن به پارامترهای مجاز بهینه شوند و خلوص طیفی مناسبی بدست آید.

جدول ۱: حدود پارامترهای نوترونی مناسب برای BNCT

پارامترهای پرتو مناسب	محدوده مناسب
شار نیمه حرارتی ($\text{n/cm}^2\text{s}$)	1×10^9
شار نیمه حرارتی به سریع	۲۰
شار نیمه حرارتی به حرارتی	۱۰۰

کندکننده، انرژی نوترون‌های سریع را کاهش می‌دهد تا به انرژی مناسب برای BNCT برسند. موادی که در این قسمت استفاده می‌شوند باید دارای عدد جرمی مناسب باشند و سطح مقطع جذب نوترون نیمه حرارتی پایین و سطح مقطع پراکندگی بالایی برای نوترون‌های سریع داشته باشند. به منظور جلوگیری از خروج نوترون‌ها از سیستم، یک بازتابنده نوترون در (Beam Shape Assembling) BSA وجود دارد. وجود بازتابنده باعث می‌شود تا شار نوترون خروجی در طول مسیر بیش از حد کاهش نیابد. و فیلترها، نوترون حرارتی و گاما را جذب کرده و اجازه عبور به آنها را نمی‌دهند.

روش کار

سیستم طراحی شده در واقع دو استوانه تودرتوی هم محور می‌باشد که توسط کد MCNP این طراحی انجام شده است [۶]. استوانه داخلی از دو لایه، که شامل لایه‌های ضخیم کندکننده و فیلتر (جهت کاهش شار نوترون سریع در شار خروجی) تشکیل شده است. یک لایه نازک نیز در انتهای فیلتر به عنوان ماده جاذب نوترون‌های حرارتی قرار گرفته است؛ و استوانه خارجی که بصورت لایه‌ای استوانه داخلی را در بر می‌گیرد، ماده بازتابنده می‌باشد. قسمت‌های مختلف سیستم به ترتیب شامل: شبیه‌سازی کندکننده، شبیه‌سازی بازتابنده، شبیه‌سازی فیلتر و شبیه‌سازی جاذب نوترون حرارتی است.

هشت ماده به عنوان ماده کندکننده پیشنهاد شدند که عبارتند از: آب سنگین، پارافین، پلی اتیلن، تفلون، گرافیت، فلئورید لیتیوم، تری فلئورید آلومینیوم و کربن. پنج ماده بازتابنده پیشنهادی در این شبیه‌سازی شامل: سرب، اکسید بریلیوم، اکسید آلومینیوم، گرافیت و کربنات لیتیوم می‌باشد. هفت فیلتر پیشنهادی،

آلومینیوم، نیکل، آهن، گوگرد، تری فلئورید آلومینیوم، ترکیب $AlF_3 + Al$ ۶۰٪ و سرب می باشد. و نهایتاً در این شبیه سازی، از هشت عنصر نسبتاً سنگین کادمیوم، نقره، ایندیوم، سرب، هافنیم، گادولینیم و بیسموت برای جذب نوترون حرارتی استفاده شد. در این مقاله از چشمه D-D و با انرژی نوترونی MeV ۲/۴۵ و تک جهت به صورت استوانه ای با شعاع ۵ cm استفاده شده است.

برای رسیدن به طیف بهینه نوترونی هر یک از مواد ذکر شده را در ضخامت های مختلف در سیستم آزمایش کرده و با استفاده از داده های بدست آمده از خروجی کد MCNP ماده مورد نظر برای هر قسمت را مشخص می کنیم. داده های بدست آمده در خروجی برنامه های اجرا شده، طبق مراحل شبیه سازی که پیش از این بیان شد، بصورت زیر می باشد: ابتدا شار خروجی از کندکننده از سطح انتهایی آن، سپس شار خروجی از کندکننده با حضور بازتابنده، سپس شار خروجی از سطح فیلتر و نهایتاً شار خروجی از سطح جذب نوترون حرارتی می باشد.

نتایج

ابتدا با تغییر ضخامت مواد پیشنهادی برای کندکننده، بهینه شار نوترون نیمه حرارتی خروجی از آنها را با اجرای برنامه بدست آوردیم. سپس برای هر ماده در ضخامتی که شار نیمه حرارتی آن بهینه بود، نسبت شار حرارتی، نیمه حرارتی و سریع به شار کل خروجی را بدست آورده و نتایج را با هم مقایسه کردیم. این نتایج در جدول ۲ آورده شده است. سرانجام فلئورید لیتیوم (LiF) به علت داشتن درصد شار نیمه حرارتی بیشتر، به عنوان ماده مناسب برای کندکننده و با ضخامت ۲۵ cm در نظر گرفته شد.

جدول ۲: درصد شار حرارتی، نیمه حرارتی و سریع برای ضخامت بهینه از هر ماده کندکننده

ماده	ضخامت بهینه (Cm)	درصد شار حرارتی به شار کل	درصد شار نیمه حرارتی به شار کل	درصد شار سریع به شار کل
CF _۴ (تفلون)	۳۰	۰/۴۸	۵۹/۹۵	۳۹/۵۷
CH _۴ (پلی اتیلن)	۶	۱۵/۲۷	۲۱/۲۸	۶۳/۴۵
C _۶ H _۶ (پارافین)	۶	۱۵/۷۵	۲۱/۴۰	۶۲/۸۵
LiF	۲۵	۰/۳۳	۷۲/۴۳	۲۷/۲۴
D _۲ O (آب سنگین)	۱۴	۱/۱۳	۴۷/۳۵	۵۱/۵۲
AlF _۳	۲۵	۰/۱۰	۵۷/۵۷	۴۲/۳۳
گرافیت	۳۵	۰/۶۰	۴۰/۹۸	۵۸/۴۲
C	۳۰	۱/۴۰	۵۱	۴۷/۶۰

سپس برای پنج ماده بازتابنده پیشنهاد شده، در یک ضخامت ثابت، درصد شار نوترون نیمه حرارتی خروجی از کندکننده و درصد شار نوترون سریع در شار خروجی را محاسبه کرده و سپس این نتایج را با نتایج حاصل از سیستم بدون بازتابنده مقایسه کردیم. پس از بررسی نتایج، اکسید آلومینیوم (Al_۲O_۳) را به دلیل داشتن

19 th Iranian's Nuclear Conference

درصد شار نیمه حرارتی بیشتر و همچنین درصد شار سریع کمتر نسبت به سایر مواد به عنوان ماده بازتابنده مناسب انتخاب نموده و برای رسیدن به شار نیمه حرارتی بهینه، ضخامت آن را تغییر داده و پس از ارزیابی نتایج، ضخامت بهینه ۱۲ cm را بدست آوردیم. نتایج بدست آمده در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳: درصد شار نیمه حرارتی خروجی از سیستم برای ضخامت یکسان مواد بازتابنده در حضور کندکننده

سیستم بدون بازتابنده	Al ₂ O ₃	Li ₂ CO ₃	Graphit	BeO	Pb	ماده
۵۷/۳۰	۷۸/۵۶	۷۶/۸۱	۷۶/۹۲	۷۳/۸۵	۷۲/۴۳	درصد شار نیمه حرارتی به شار کل

جدول ۴: درصد شار حرارتی، نیمه حرارتی و سریع برای ضخامت بهینه مواد بازتابنده در حضور کندکننده LiF

ماده	ضخامت بهینه (Cm)	درصد شار حرارتی به شار کل	درصد شار نیمه حرارتی به شار کل	درصد شار سریع به شار کل
Pb	۱۲	۰/۴۲	۷۲/۲۰	۲۷/۳۸
BeO	۴	۱/۰۳	۷۷/۱۱	۲۱/۸۶
Graphit	۸	۱/۷۰	۷۷/۱۳	۲۱/۱۷
Li ₂ CO ₃	۱۰	۱/۶۲	۷۶/۸۱	۲۱/۵۷
Al ₂ O ₃	۱۲	۲/۳۶	۷۹/۵۰	۱۸/۱۴

سپس در این مرحله، محاسبات لازم به منظور انتخاب ماده فیلتر مناسب و تعیین ضخامت بهینه آن انجام شد. هدف ماده را به عنوان مواد فیلتر پیشنهادی مورد بررسی قرار دادیم. بدین ترتیب که با استفاده از کد، برای ضخامت یکسان از مواد فیلتر پیشنهادی، درصد شار نوترون سریع در شار خروجی را محاسبه کرده و نتایج بدست آمده با نتایج سیستم بدون فیلتر مقایسه شد. در نهایت تری فلئورید آلومینیوم به علت داشتن درصد شار سریع کمتر نسبت به سایر مواد به عنوان فیلتر مناسب انتخاب شد. پس از انتخاب تری فلئورید آلومینیوم (AlF₃) به عنوان فیلتر مناسب، با تغییر ضخامت، به بهینه‌سازی آن جهت کاهش نوترون سریع و افزایش شار نیمه حرارتی در شار خروجی از سیستم پرداختیم و در نهایت ضخامت ۳۰ cm برای فیلتر، ضخامت بهینه در نظر گرفته شد. نتایج در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مقایسه درصد شار نوترون سریع خروجی از سیستم برای ضخامت یکسان از مواد فیلتر پیشنهادی

سیستم بدون فیلتر	Ni	Fe	S	%۶۰ AlF ₃ + %۴۰ Al	AlF ₃	Al	Pb	ماده
۴۰	۶۶	۸۲	۳۹	۲۵	۱۸	۳۳	۳۳	درصد شار سریع به شار کل

19 th Iranian's Nuclear Conference

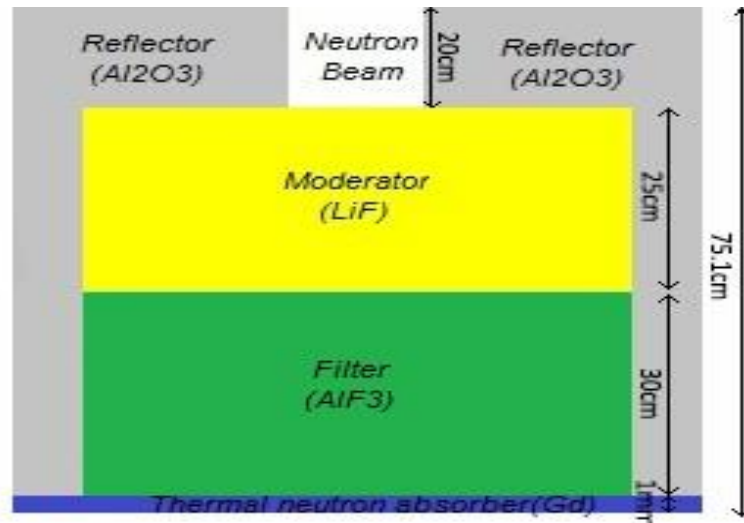
و در مرحله آخر، جهت کاهش شار نوترون حرارتی در شار خروجی سیستم، لایه نازکی از ماده جاذب استفاده شد. بدین منظور هفت ماده بررسی شد و با استفاده از کد، برای ضخامت یکسان از مواد جاذب نوترون حرارتی پیشنهادی، درصد شار نوترون حرارتی در شار خروجی را محاسبه کرده و نتایج بدست آمده را با نتایج سیستم بدون جاذب نوترون حرارتی مقایسه نمودیم. و سرانجام گادولینیم با ضخامت 1 mm به دلیل داشتن درصد شار حرارتی کمتر و درصد شار نیمه حرارتی بیشتر به عنوان مناسب‌ترین جاذب انتخاب شد. نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶: شار حرارتی خروجی، درصد شار حرارتی و نیمه حرارتی برای ضخامت یکسان عناصر جاذب پیشنهادی

ماده	شار حرارتی خروجی از سیستم ($1/cm^2$)	درصد شار حرارتی به شار کل	درصد شار نیمه حرارتی به شار کل
Gd	$1/59 \times 10^{-7}$	۱/۱۹	۹۳
Cd	$4/65 \times 10^{-7}$	۱/۵۰	۹۱/۲۷
In	$2/71 \times 10^{-7}$	۲/۴۳	۸۹/۸۷
Hf	$3/47 \times 10^{-7}$	۳/۴۲	۸۸/۱۵
Ag	$4/25 \times 10^{-7}$	۳/۸۵	۸۸/۵۳
Bi	$7/45 \times 10^{-7}$	۵/۸۰	۸۷/۰۷
Pb	$7/46 \times 10^{-7}$	۵/۸۱	۸۷/۴۲
سیستم بدون جاذب حرارتی	$7/48 \times 10^{-7}$	۵/۸۶	۸۷/۲۹

بحث و نتیجه‌گیری

حالت نهایی سیستم پیشنهادی شامل ۲۵ cm کندکننده LiF ، ۱۲ cm بازتابنده Al_2O_3 ، ۳۰ cm فیلتر AlF_3 و ۱ mm جاذب نوترون حرارتی Gd می‌باشد. شار کل خروجی از سیستم نهایی شامل ۱/۲٪ شار حرارتی، ۹۳٪ شار نیمه حرارتی و ۵/۸٪ شار سریع می‌باشد. ملاحظه می‌شود که با شبیه‌سازی صورت گرفته در این تحقیق، شار نوترونی خروجی از سیستم به لحاظ خلوص طیفی، شاری مناسب است. شکل ۱ سیستم طراحی نهایی شبیه‌سازی شده پیشنهادی را به همراه مواد و ضخامت‌های آنها نشان می‌دهد.



شکل ۱: سیستم بهینه شبیه‌سازی شده پیشنهادی نهایی

مراجع

- [۱] Y. Oka, S. An et al., Conceptual design of medical reactors, Nucl. Eng. Res. Lab. Univ., Tokyo, ۱۹۸۰.
- [۲] Eskandari, M. R, Kashian, S., Design of moderator and multiplier systems for D-T neutron source in BNCT, Ann. Nucl. Energy, ۲۰۰۹.
- [۳] Eskandari, M. R, Mostafaei, F., Design of for D-T neutron source in BNCT with MCNP, oct, ۱۷-۲۱, Tokyo, Japan, ۲۰۱۰.
- [۴] Eskandari, M. R, Mostafaei, F., Monte Carlo optimisation of a BNCT facility including multiplier, reflector, filter and moderator for D-T source, Med. Phys. ۳۷, ۳۲۸۶ (۲۰۱۰).
- [۵] Yanc, J. C., Current status of neutron captures therapy, Radiotherapy and Oncology ۳۷: (۱۹۹۵)
- [۶] Briesmeister, J.F., ۲۰۰۰. MCNP-۴C A General Monte Carlo N – Particle Transport Code System – Version ۴C. Los Alamos National Laboratory LA-۱۳۷۰۹-M.