

## بهینه سازی طیف نوترونی حاصل از مولدهای نوترون به منظور استفاده در BNCT

\* یاسر کاسه ساز، مجید شهریاری

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

### چکیده

به منظور بهینه سازی طیف نوترونی حاصل از مولدهای نوترون که بر اساس واکنش  $D-D$  نوترون های پر انرژی  $2.45 \text{ MeV}$  تولید می کنند، یک مجموعه شکل دهنده طیف شامل کندکننده، بازتابنده، موزی کننده، فیلتر نوترون حرارتی و فیلتر گاما به کمک کد محاسباتی  $MCNP4C$  طراحی شد. به این منظور مواد، ضخامت ها و ترتیب قرار گرفتن آنها در مجموعه برای رسیدن به حالت مطلوب، بهینه شد. حالت نهایی شامل  $70$  سانتیمتر  $Fluental$  به عنوان کندکننده،  $30$  سانتیمتر  $Pb$  به عنوان بازتابنده،  $2$  میلیمتر  $Li-6$  به عنوان فیلتر نوترون حرارتی و  $2$  میلیمتر  $Pb$  به عنوان فیلتر گاما می باشد. با توجه به نتایج حاصل لازم است تا این مولدها توان تولید  $9.3e16 \text{ n/s}$  را داشته باشند که این مقدار با مقادیر شار مولدهای فعلی فاصله زیادی دارد. با این وجود طیف نوترون حاصل برای درمان بسیار مناسب است. یکی از راه های افزایش شار، استفاده از لایه های تکثیر کننده نوترون (صفحات شکافت پذیر) می باشد.

کید واژه ها:  $BNCT$ ، مولدهای نوترون،  $MCNP$ ،  $Beam Shaping Assembly$ ، طیف نوترونی

### ۱- مقدمه

$BNCT^{19}$  یک روش امید بخش در درمان تومورهای مغزی است. در این روش که بر اساس واکنش  $^{10}B(n,\alpha)^7Li$  می باشد، ابتدا داروی حامل بور بصورت وریدی به بیمار تزریق و پس از متمرکز شدن آن در تومور، ناحیه تومور بوسیله پرتو نوترونی مناسب بمباران می شود. هسته های بور  $^{10}B$  با جذب نوترون های حرارتی به لیتیوم و آلفا تبدیل شده که ذراتی با انرژی بالا و برد کم (در حدود ابعاد سلولی) هستند، تخلیه انرژی این ذرات در ابعاد سلولی باعث نابودی سلول های ناحیه واکنش می گردد. به منظور بالا بردن بهره درمان لازم است که طیف نوترون بهینه سازی شود. پارامترهایی که باید بهینه شوند عبارتند از انرژی، شدت و آلودگی ها. شبیه سازی ها نشان می دهد که انرژی مناسب برای درمان تومورهای عمقی در بازه  $1-10 \text{ keV}$  می باشد [۱]. نوترون های با انرژی کمتر قبل از رسیدن به تومور جذب می شوند و نوترون های با انرژی بیشتر باعث افزایش چشمگیر دز جذبی در پوست و سطح مغز می گردد. از آنجا که دز جذبی به زمان پرتودهی بستگی دارد، لازم

\*y kasesaz@yahoo.cpm

<sup>19</sup> Boron Neutron Captuer Therapy

است تعداد نوترون های فرودی نیز بهینه شوند. اگر شار نوترونی کم باشد باعث افزایش زمان پرتودهی شده و این خود باعث افزایش دز جذبی نامطلوب می شود و اگر شار خیلی زیاد باشد کنترل درمان مشکل می شود. چشمه های نوترونی عموماً شامل نوترون های حرارتی، فوق حرارتی و سریع و نیز تابش های گاما هستند درحالیکه تنها نوترون های فوق حرارتی مورد نیاز است و بقیه به عنوان آلودگی محسوب شده و باعث افزایش دز جذبی نامطلوب می گردند. لذا باید میزان آنها را تا حد امکان کاهش داد. میزان تمام پارامتر های مذکور طبق جدول (۱) مورد توافق قرار گرفته است [۱].

جدول (۱): حدود مجاز تابش های موجود در پرتو [۲]	
BNCT beam port parameters	Limit
$\Phi_{epi}$ [n/cm <sup>2</sup> - s]	$\geq 1 \times 10^9$
$\Phi_{epi} / \Phi_{fast}$	$\geq 20$
$\Phi_{epi} / \Phi_{thermal}$	$\geq 100$
$\dot{D}_{fast} / \Phi_{epi}$ [Gy cm <sup>2</sup> / n]	$\leq 2 \times 10^{-13}$
$\dot{D}_{\gamma} / \Phi_{epi}$ [Gy cm <sup>2</sup> / n]	$\leq 2 \times 10^{-13}$

چشمه های نوترونی مختلفی تاکنون مورد استفاده قرار گرفته اند. در این تحقیق امکان استفاده از مولدهای نوترونی که بر اساس واکنش D-D نوترون هایی با انرژی 2.45MeV تولید می کنند مورد بررسی قرار گرفته است. مولدهای نوترون علاوه بر کوچکی، قابلیت کنترل بالا، هزینه ساخت کم، ایمنی بیشتر از لحاظ پذیرش افکار عمومی نیز نسبت به راکتورها و شتابدهنده ها برتری دارند. به منظور بهینه سازی طیف، مجموعه ای شامل کندکننده، بازتابنده، موازی کننده، فیلتر نوترون حرارتی و فیلتر گاما به عنوان شکل دهنده طیف در MCNP [۳] طراحی و سعی شد تا مواد، ضخامت ها، ترتیب قرارگیری و شکل هندسی آنها برای دستیابی به محدودیت های جدول (۱) بهینه شوند.

## ۲- مواد و روش ها

چندین پارامتر و متغیر وجود دارد که نمی‌توان همه را همزمان بهینه کرد لذا در مرحله یک پارامتر بهینه شد و در مرحله بعد با توجه به نتیجه مرحله قبل پارامتر بعدی بهینه گردید. برای شروع یک پیکربندی اولیه شامل لایه‌های استوانه‌ای در نظر گرفته شد و به کمک MCNP شبیه‌سازی گردید. نمای کلی این پیکربندی در شکل (۱) نشان داده شده است.

انتخاب کند کننده: یک کند کننده مناسب باید سطح مقطع پراکندگی بالا برای نوترون‌های سریع و سطح مقطع جذب کم برای نوترون‌های فوق‌حرارتی داشته باشد. پارامتر دیگر عدد جرمی آنهاست، کندکننده‌های با عدد جرمی کوچک باعث می‌شوند تا نوترون‌ها به سرعت کند شوند با این وجود اگر عدد جرمی خیلی کوچک باشد، آلودگی به نوترون‌های حرارتی زیاد می‌شود. همچنین اگر عدد جرمی بزرگ باشد انرژی نوترون به ناحیه فوق‌حرارتی نمی‌رسد. با توجه موارد مذکور، مواد:

$MgF_2, D_2O, CF_2, Fe, BeO, AlF_3, Fluental (69\% AlF, 30\% Al, 1\% LiF), Al, Al_2O_3$

به عنوان کند کننده به صورت استوانه‌هایی به شعاع ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند و جهت انتخاب بهترین حالت (جنس و ضخامت) مواد با ضخامت‌ها و ترکیب‌های مختلف در بیش از ۲۰۰ حالت بررسی شدند و در هر حالت نسبت شار نوترون‌های فوق‌حرارتی به نوترون‌های سریع به عنوان قدرت کندکنندگی ارزیابی گردید و از بین آنها ۱۲ حالت با بالاترین قدرت کندکنندگی انتخاب شد.

در مراحل بعدی برای موارد انتخاب شده، محاسبات مربوط به بازتابنده، موازی کننده و فیلترهای گاما و نوترون انجام شد و نتیجه نهایی با توجه به ملاک‌های شار نوترون و گامای مناسب برای BNCT انتخاب شد.

### ۳- نتایج

از میان موارد بررسی شده برای جنس، ضخامت و ترتیب قرارگیری لایه‌های کندکننده ۱۲ حالت که بالاترین قدرت کندکنندگی را داشتند، انتخاب شدند. جدول (۲) نتایج بدست آمده را نشان می‌دهد.

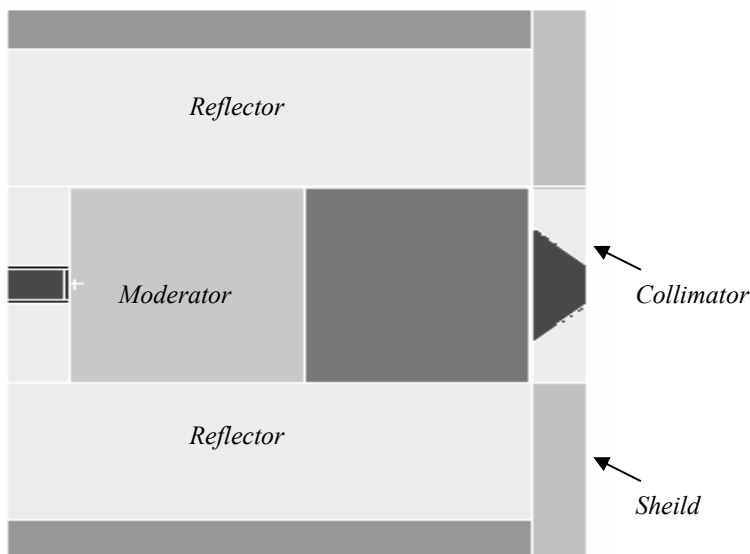
برای موارد مندرج در جدول (۲) بهترین جنس و ضخامت بازتابنده بررسی شد. نتایج بدست آمده در این مرحله در جدول (۳) آمده است. پس از قرارگیری موازی کننده در مقابل هر یک از ۱۲ حالت فوق، ۶ حالت که بهترین نسبت جریان فوق‌حرارتی به سریع را داشتند، انتخاب شدند. نتایج محاسبات در جدول (۴) دیده می‌شود.

برای انتخاب شرایط بهینه، فیلترهای گاما و نوترون حرارتی در مقابل باریکه خروجی موازی کننده قرار داده شد. محاسبات به ازای ۶ حالت مرحله قبل به انجام رسید. در هر آزمون ضخامت و ترتیب قرارگیری فیلترها بررسی

گردید و با توجه به نتایج بدست آمده بهترین حالت بر اساس معیارهای جدول (۱) انتخاب شد. نتیجه نهایی در جدول (۵) آمده است.

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

حالت نهایی شامل ۷۰ سانتیمتر **Fluental** به عنوان کندکننده، ۳۰ سانتیمتر **Pb** به عنوان بازتابنده، ۲ میلیمتر **Li-6** به عنوان فیلتر نوترون حرارتی و ۲ میلیمتر **Pb** به عنوان فیلتر گاما می باشد که نوترون های حاصل از مولد نوترون با عبور از این مجموعه دارای شرایط مطلوب برای درمان می گردند. با توجه به نتیجه نهایی قدرت این مولدها باید  $9.3e16$  n/s باشد که بالاتر از قدرت مولدهای فعلی است. برای برطرف کردن این مشکل میتوان از لایه های تکثیر کننده نوترون (صفحات شکافت پذیر) استفاده کرد که باعث افزایش شار نوترون می شود. علاوه بر شدت چشمه نوترون، با توجه به معیارهای جدول (۱)، مقدار آهنگ دز گاما به شار نوترون های فوق حرارتی نیز اندکی از مقدار مجاز بیشتر است. البته این مشکل در کارهای انجام شده توسط دیگران نیز مشاهده می شود. بنابر این در یک جمع بندی می توان گفت که در صورت دسترسی به شتابدهنده های قوی **D-D**، طراحی بدست آمده می تواند به عنوان انتخاب مناسبی جهت تولید باریکه **BNCT** مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۱): پیکربندی طراحی شده در MCNP

جدول (۲): مقادیر جریان نوترون و گاما به ازای یک نوترون چشمه بر حسب ضخامت های مختلف کندکننده.

NO.	Thickness (cm)	$J_{thermal}$	$J_{epithermal}$	$J_{fast}$	$J_{gamma}$	$\frac{J_{epithermal}}{J_{fast}}$
1	MgF2(50)	9.53041E-03	5.34905E-02	5.18612E-03	3.03146E-03	10.31417
2	MgF2(20)+AlF3(20)	3.31771E-03	2.16714E-02	2.09827E-03	1.06738E-03	10.32822
3	Fluental(40)+AlF3(40)	1.94619E-03	2.88855E-02	2.77496E-03	8.38497E-04	10.40934
4	MgF2(20)+ Fluental(20)	3.11983E-03	1.54955E-02	1.44810E-03	1.15669E-03	10.70057
5	Fluental(60)	2.82373E-03	4.33053E-02	3.94253E-03	1.81999E-03	10.98414
6	Fluental(80)	2.27677E-03	2.15662E-02	1.95671E-03	1.00450E-03	11.02166
7	MgF2(40)+ Fluental(40)	2.85210E-03	1.52028E-02	1.37932E-03	1.18649E-03	11.02195
8	MgF2(40)+ Al(40)	3.14498E-03	2.12415E-02	1.87118E-03	1.07819E-03	11.35193
9	CF2(70)	7.36985E-03	9.29228E-03	6.96128E-04	1.25696E-03	13.34852
10	MgF2(60)	7.50373E-03	2.58839E-02	1.77739E-03	1.98149E-03	14.56287
11	Fluental(70)	2.27066E-03	2.28333E-02	1.19666E-03	1.28949E-03	19.08086
12	MgF2(70)	4.92352E-03	1.12764E-02	5.66669E-04	1.33499E-03	19.89945

جدول (۳): مقادیر جریان نوترون به ازای یک نوترون چشمه برای بازتابنده های مختلف.

NO	Configuration	Thickness (cm)	$J_{thermal}$	$J_{epithermal}$	$J_{fast}$	$\frac{J_{epithermal}}{J_{fast}}$
1	MgF2(50)	Pb(30)	9.53041E-03	5.34905E-02	5.18612E-03	10.3142
2	MgF2(20)+AlF3(20)	Bi(35)	7.22741E-03	2.82476E-02	3.15343E-03	8.9577
3	Fluental(40)+AlF3(40)	Pb(35)	2.13614E-03	3.35159E-02	3.73573E-03	8.9717
4	MgF2(20)+ Fluental(20)	Bi(35)	5.83523E-03	2.09545E-02	2.96205E-03	7.0743
5	Fluental(60)	Pb(35)	3.01684E-03	4.63034E-02	4.31155E-03	10.7394
6	Fluental(80)	Bi(35)	3.45151E-03	2.63515E-02	3.98842E-03	6.6070
7	MgF2(40)+ Fluental(40)	Bi(35)	5.67185E-03	2.05608E-02	2.89232E-03	7.1088
8	MgF2(40)+ Al(40)	Bi(35)	6.10864E-03	2.59564E-02	3.45252E-03	7.5181
9	CF2(70)	Pb(35)	7.69E-03	1.01310E-02	8.17427E-04	12.3938
10	MgF2(60)	Pb(35)	7.85063E-03	2.77269E-02	2.03224E-03	13.6435
11	Fluental(70)	Pb(35)	2.43541E-03	2.44453E-02	1.37305E-03	17.8036
12	MgF2(70)	Pb(35)	5.20318E-03	1.22029E-02	6.46311E-04	18.8808