



محاسبه دز موثر بیمار در درمان به روش نوترون درمانی با بور برای باریکه نوترونی

راکتور مینیاتوری اصفهان

مهدی منشی زاده^{۱،۲}، یاسر کاسه‌ساز^{۲*}، مجتبی تاجیک^۱

^۱ دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

^۲ سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

در این مقاله مؤلفه‌های دز ناشی از باریکه نوترون فوق حرارتی راکتور MNSR اصفهان، که برای نوترون درمانی با بور طراحی شده است، در ارگان‌های مختلف بدن بیمار مورد ارزیابی قرار گرفته است و از آنجا دز معادل هر عضو و نیز دز موثر بیمار طی درمان به روش نوترون درمانی با بور محاسبه و با نتایج مشابه مقایسه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد باریکه نوترون فوق حرارتی بهینه‌سازی شده جهت درمان تومورهای مغزی دارای شرایط مناسب می‌باشد و دز موثر بیمار در حین درمان برابر 0.2 Sv می‌باشد که قابل مقایسه با دیگر مراکز نوترون درمانی است.

کلید واژگان: نوترون تراپی با بور، راکتور مینیاتوری اصفهان، پارامترهای در-فانتوم، دز مؤثر

Calculation of patient effective dose in BNCT for neutron beam facility of Isfahan MNSR

Monshizadeh, Mahdi^{1,2}; Kasesaz, Yaser^{2*}; Tajik, Mojtaba¹

¹School of Physics, Damghan University, P.O. Box 36716-41167, Damghan, Iran

²Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran

Abstract

In this paper, different dose components due to the BNCT epithermal neutron beam of Isfahan MNSR have been evaluated in various organs of the patient. The equivalent dose rate of each organ and the effective dose rate of the patient have been calculated during BNCT treatment and compared with similar results. The results show that the optimized epithermal neutron beam is appropriate for brain tumor treatment and the effective dose of the patient is 0.2 Sv during treatment time which is comparable with the other BNCT facilities.

Key words: BNCT, MNSR, In-Phantom parameter, effective dose.



مقدمه:

در سال‌های اخیر یک باریکه نوترون فوق‌حرارتی مناسب برای BNCT برای راکتور مینیاتوری MNSR اصفهان طراحی شده است [۱] که دارای معیارهای توصیه شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برای درمان به روش BNCT است [۲]. در این روش درمانی، آنچه که باعث نابودی تومور می‌گردد ناشی از تخلیه انرژی حاصل از محصولات واکنش $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ در ناحیه سلول‌های سرطانی است، که با جذب دارو حامل بور-۱۰ تزریقی نشان‌دار شده‌اند. از سوی دیگر، نوترون و گامای موجود در باریکه نوترونی از طریق واکنش‌های دیگر، باعث ایجاد دز جذبی ناخواسته در بافت‌ها و اندام‌های سالم خواهد شد. در این مقاله با در نظر گرفتن فانتوم تمام بدن مرد بالغ، دز جذبی و معادل اندام‌های داخلی بدن و نیز دز مؤثر بیمار در طی پرتودهی بیمار، با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX 2.6 شبیه‌سازی و مورد محاسبه و ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها:

معرفی باریکه نوترون فوق‌حرارتی راکتور مینیاتوری اصفهان

راکتور مینیاتوری MNSR که توسط مؤسسه انرژی اتمی چین توسعه یافته است، یک راکتور تحقیقاتی کوچک بر اساس طراحی راکتور کانادایی SLOPOKE می‌باشد. این راکتور تحقیقاتی با قدرت ۳۰ کیلووات از نوع استخری با سوخت اورانیوم با غنای بالا (۲/۹۰٪ U-235، w/o)، می‌باشد؛ در این راکتور آب سبک به عنوان کندکننده و خنک‌کننده و برلیوم فلزی به عنوان بازتابنده مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. به طور کلی BSA شامل کندکننده، بازتابنده، فیلترهای نوترون حرارتی و گاما و موازی ساز طیف می‌باشد. مجموعه شکل دهنده طیف نوترون فوق‌حرارتی بهینه‌سازی شده راکتور MNSR شامل استوانه‌ای به قطر ۵۰ سانتی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر از آلیاژ فلوننتال (۳۰٪ Al، ۶۹٪ AlF₃ و ۱٪ LiF) به عنوان کندکننده، استوانه‌ای سربی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر به عنوان بازتابنده که دور کندکننده را احاطه کرده است، و صفحاتی به ضخامت ۱ میلی‌متر در ابتدای کندکننده، ۳ میلی‌متر در انتهای کندکننده و ۱ میلی‌متر دور و بین کندکننده و بازتابنده از جنس کادمیوم به عنوان فیلتر نوترون حرارتی، دیسکی به ضخامت ۵ سانتی‌متر در انتهای کندکننده از جنس بیسموت به عنوان فیلتر گاما و سرانجام مخروطی ناقص از جنس سرب با قطر قاعده بزرگ ۵۰ سانتی‌متر و قطر قاعده کوچک ۱۴ سانتی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر به عنوان موازی‌ساز مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. شکل ۱ نمایی کلی از BSA نوترون فوق‌حرارتی بهینه‌سازی شده راکتور مینیاتوری اصفهان را نشان می‌دهد. جدول ۱ پارامترهای باریکه نوترون فوق‌حرارتی تعیین شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و مجموعه‌های مختلف شکل دهنده طیف از جمله راکتور مینیاتوری اصفهان را بیان می‌کند.

جدول ۱ پارامترهای باریکه نوترون فوق‌حرارتی و مجموعه‌های مختلف شکل دهنده طیف [۱]

تاسیسات قدرت شار نوترون فوق‌حرارتی دز نوترون سریع به شار فوق‌حرارتی دز گاما به شار فوق‌حرارتی شار حرارتی به شار فوق‌حرارتی

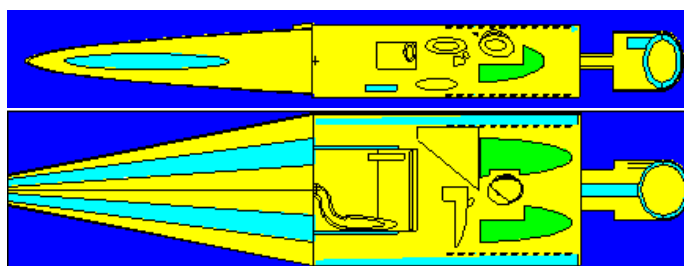
$\varphi_{thermal}/\varphi_{epi}$	D_{γ}/φ_{epi} ($\times 10^{-13} Gy cm^2$)	D_{fast}/φ_{epi} ($\times 10^{-13} Gy cm^2$)	φ_{epi} ($\times 10^9 n/(cm^2.s)$)	POWER (MW)	
$0.05 >$	$2 >$	$2 >$	$1 <$	-----	محدودیت های آژانس [۲]
0.007	0.87	0.07	0.635	0.03	راکتور مینیاتوری اصفهان [۱]
0.04	1.95	5.6	0.4	0.03	راکتور IHNI [۴]
0.05	1.7	7.98	0.28	0.03	راکتور مینیاتوری سوریه [۵]
0.04	2.1	2.2	0.65	5	راکتور تحقیقاتی تهران [۶]



شکل ۱- نمایی کلی از BSA حرارتی و فوق حرارتی نوترون بهینه سازی شده طیف راکتور مینیاتوری اصفهان [۱]

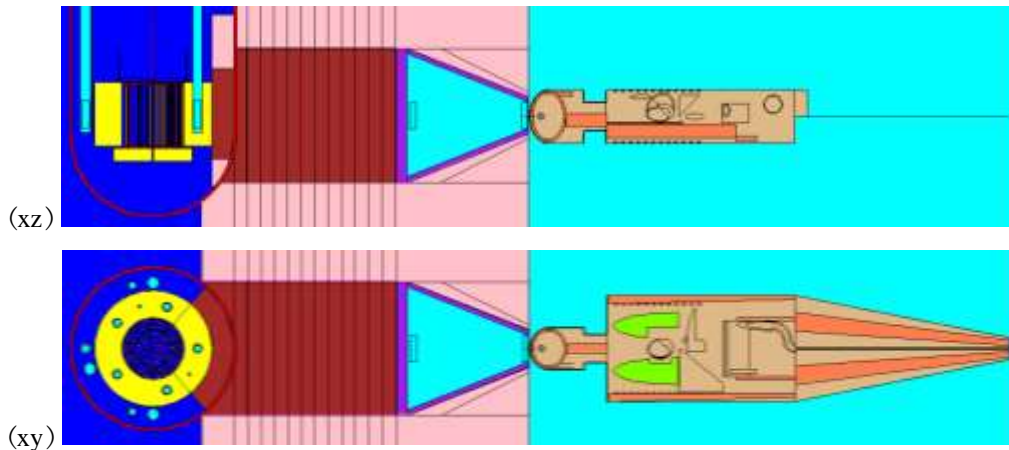
معرفی فانتوم مورد استفاده

به منظور محاسبه دز در ارگان های مختلف از فانتوم تمام بدن مرد بالغ MIRD که در معرض باریکه خروجی قرار گرفته؛ استفاده شده است. در این فانتوم هر یک از ارگان ها با سلول های مجزا شبیه سازی شده است. شکل ۳ نمایی کلی از فانتوم استاندارد MIRD که توسط کد مونت کارلو MCNPX مدل شده است را نشان می دهد. کره ای به شعاع ۱٫۲ سانتی متری در عمق ۳ سانتی متری مغز به عنوان تومور در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- نمایی کلی از مدل شبیه سازی شده فانتوم MIRD

فانتوم مورد نظر به صورت خوابیده و رو به بالا در امتداد باریکه بیم خروجی در نظر گرفته شده است. شکل ۴ نمایی کلی از موقعیت فانتوم و مجموعه شکل دهنده طیف را نشان می دهد.



شکل ۴- نمایش کلی از موقعیت فانتوم MIRD و مجموعه شکل دهنده طیف

محاسبات دزیمتری

به طور کلی مؤلفه مختلف دز در درمان به روش BNCT شامل دز ناشی از نوترون که مربوط به دو واکنش عمده ${}^1\text{H}(n,n){}^1\text{H}$ و ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$ است، دز گاما ناشی از گاماهاى موجود در باریکه نوترون فرودی و نیز ناشی از واکنش ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$ است و دز ناشی از گیراندازی نوترون‌های حرارتی با بور ۱۰ مربوط به واکنش ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ می‌باشد. این سه مؤلفه دز باید به صورت جداگانه برای ارگان مورد نظر محاسبه شود. دز معادل در هر ارگان، H_T برابر مجموع این سه مؤلفه دز با در نظر گرفتن ضریب وزنی مناسب است. طبق استاندارد ICRP103 [۷]، ضریب وزنی پرتوی گاما برابر یک، ضریب وزنی دز جذبی ناشی از برهمکنش بور برابر ۲۰ و ضریب وزنی نوترون به صورت یک تابع پیوسته وابسته به انرژی نوترون و به صورت رابطه ۲ در نظر گرفته می‌شود:

$$W_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-\frac{[\ln(E_n)]^2}{6}} & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-\frac{[\ln(2E_n)]^2}{6}} & 1 \text{ MeV} < E_n < 50 \text{ MeV} \end{cases} \quad (2)$$

دز ناشی از نوترون و پرتوهای گاما توسط کارت تالی F6 که انباشت انرژی در واحد جرم، حجم مورد نظر را می‌دهد، محاسبه می‌شود. به منظور در نظر گرفتن این ضرایب از کارت‌های DE6 و DF6 برای تالی F6 مورد استفاده قرار گرفته است. پس از محاسبه دز معادل هر عضو H_T دز مؤثر E به صورت مجموع دز معادل هر عضو در ضریب وزنی بافت هر ارگان که در جدول ۲ بیان شده است و طبق رابطه $E = \sum W_T H_T$ محاسبه می‌گردد. دز ناشی از واکنش بور ۱۰ با استفاده از ضرایب تبدیل شار به دز که این ضرایب توسط کارت‌های DE4 و DF4 به اعضای بازه‌های انرژی خاص در خروجی کارت تالی F4 ضرب می‌شود محاسبه می‌گردد.

جدول ۲ ضریب وزنی ارگان‌های مختلف بدن در استاندارد ICRP103



۰/۱۲	شش، معده، روده بزرگ، مغز قرمز استخوان، پستان
۰/۰۸	غدد جنسی
۰/۰۴	تیروئید، کبد، مثانه، مری
۰/۰۱	پوست، مغز، سطح استخوان، غدد بزاقی
۰/۱۲	باقیمانده: آدرنال، کیسه صفرا، قلب، کلیه‌ها، ماهیچه‌ها، مخاط دهان، پانکراس، پروستات، روده کوچک، طحال، تیموس، گره‌های لنفاوی، بافت قفسه سینه

طبق توصیه آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، دز بیولوژیکی تومور به صورت مجموع مؤلفه‌های مختلف دز و با در نظر گرفتن ضریب بیولوژیکی مناسب برای هر یک، به صورت زیر تعریف می‌شود که واحد آن Gy-eq می‌باشد:

$$D_{Tumor} = RBE_B D_B + RBE_n D_n + RBE_T D_T \quad (3)$$

ضرایب بیولوژیکی برای نوترون برابر ۳/۲، برای گاما برابر ۱ و برای بور ۱۰ برابر ۳/۸ گزارش شده است [۲] که به این ترتیب دز مؤثر و بیولوژیکی تومور محاسبه می‌شوند.

نتایج:

این نتایج برای غلظت ۶۵ppm حامل بور در تومور و ۱۸ppm بور در بافت سالم در نظر و محاسبه شده است. دز مؤثر ناشی از مولفه‌های گاما، نوترون و بور در کل حجم بافت هر یک از ارگان‌های مختلف بدن در فانتوم MIRD مورد محاسبه قرار گرفت که در جدول ۴ ارائه شده است.

مؤلفه‌های مختلف دز شامل دز بور ۱۰، پرتو گاما و نوترون‌های حرارتی و سریع در تومور مغزی فانتوم MIRD محاسبه شده است که در جدول ۵ ارائه شده است. دز جذبی برای درمان مؤثر تومور معادل ۲۰ Gy-eq می‌باشد که با توجه به پارامترهای بدست آمده مدت زمان درمان و دز جذبی کل بیمار محاسبه شده و در جدول ۶ ارائه شده است که با نتایج منتشر شده در مراجع معتبر مقایسه شده است.

بحث و نتیجه‌گیری:

نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد مجموعه شکل دهنده طیف نوترون فوق حرارتی بهینه‌سازی شده راکتور مینیاتوری اصفهان شرایط ایده‌آل جهت استفاده در یک مرکز درمان به روش BNCT را از لحاظ دز مؤثر بیمار دارا می‌باشد.

جدول ۴ - مؤلفه‌های مختلف دز جذبی معادل ارگان‌های بدن در فانتوم MIRD

ارگان بدن	دز گاما	دز نوترون	دز بور	ارگان بدن	دز گاما	دز نوترون	دز بور
-----------	---------	-----------	--------	-----------	---------	-----------	--------



(Gy/s)	(Gy/s)	(Gy/s)		(Gy/s)	(Gy/s)	(Gy/s)	
$3,11 \times 10^{-4}$	$1,20 \times 10^{-4}$	$5,35 \times 10^{-5}$	مغز	$1,99 \times 10^{-5}$	$7,05 \times 10^{-6}$	$6,13 \times 10^{-6}$	ریه‌ها
$1,08 \times 10^{-6}$	$3,64 \times 10^{-7}$	$5,31 \times 10^{-7}$	باقیمانده	$6,36 \times 10^{-6}$	$1,87 \times 10^{-6}$	$2,80 \times 10^{-6}$	معهده
$9,52 \times 10^{-6}$	$2,56 \times 10^{-6}$	$3,89 \times 10^{-6}$	آدرنال	$2,74 \times 10^{-6}$	$6,71 \times 10^{-7}$	$1,47 \times 10^{-6}$	کولون
$4,18 \times 10^{-6}$	$1,16 \times 10^{-6}$	$2,56 \times 10^{-6}$	کیسه صفرا	$2,77 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^{-6}$	$7,69 \times 10^{-7}$	استخوان قرمز
$1,31 \times 10^{-5}$	$3,97 \times 10^{-6}$	$5,80 \times 10^{-6}$	قلب	$1,04 \times 10^{-6}$	$4,64 \times 10^{-7}$	$5,60 \times 10^{-7}$	غدد جنسی
$4,43 \times 10^{-6}$	$1,46 \times 10^{-6}$	$2,28 \times 10^{-6}$	کلیه‌ها	$1,66 \times 10^{-5}$	$6,84 \times 10^{-6}$	$6,69 \times 10^{-6}$	تیروئید
$4,16 \times 10^{-7}$	$2,72 \times 10^{-7}$	$2,15 \times 10^{-7}$	عضله	$1,97 \times 10^{-5}$	$6,21 \times 10^{-6}$	$6,97 \times 10^{-6}$	مری
$6,88 \times 10^{-6}$	$1,88 \times 10^{-6}$	$3,32 \times 10^{-6}$	پانکراس	$1,50 \times 10^{-6}$	$4,40 \times 10^{-7}$	$1,04 \times 10^{-6}$	مثانه
$2,75 \times 10^{-6}$	$6,98 \times 10^{-6}$	$1,58 \times 10^{-6}$	روده کوچک	$6,25 \times 10^{-6}$	$2,05 \times 10^{-6}$	$3,08 \times 10^{-6}$	کبد
$6,05 \times 10^{-6}$	$2,04 \times 10^{-6}$	$3,32 \times 10^{-6}$	طحال	$5,90 \times 10^{-5}$	$2,09 \times 10^{-5}$	$1,30 \times 10^{-5}$	سطح استخوان
$1,95 \times 10^{-5}$	$7,04 \times 10^{-6}$	$7,45 \times 10^{-6}$	تامیس	$2,66 \times 10^{-5}$	$1,31 \times 10^{-5}$	$3,74 \times 10^{-6}$	پوست

جدول ۵- مؤلفه های مختلف دز تومور در فانتوم MIRD (Gy-eq/s)

دز بور	دز نوترون حرارتی	دز نوترون سریع	دز گاما	دز بیولوژیکی کل تومور
$2,26 \times 10^{-3}$	$4,90 \times 10^{-5}$	$2,54 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$	$2,67 \times 10^{-3}$

جدول ۶- نتایج نهایی و مقایسه با کارهای مشابه

قدرت (MW)	زمان درمان (دقیقه)	دز تومور (Gy-eq)	دز مؤثر کل بدن (Sv)
۰,۳۰	۱۲۵	۲۰	۰,۲۲۷
۵	۱۹	۲۰	۰,۹۰
۱,۲	۳۰	۲۰	۰,۸۶

مراجع:

- 1- M. Monshizadeh, Y. Kasesaz*, H. Khalafi, S. Hamidi "MCNP design of thermal and epithermal neutron beam for BNCT at the Isfahan MNSR " Progress in Nuclear Energy 83 (2015) 427e432
- 2- IAEA-TECDOC-1223, 2001. Current Status of Neutron Capture Therapy. ICRU Report 46, 1992. Photon, Electron, Proton, and Neutron Interaction Data for Body Tissues. International Committee on Radiation Units and Measurements.
- 3- Chengzhan, G., Yongchun, G., 1994. Safety Analysis Report for Miniature Neutron Source Reactor (MNSR). China Institute of Atomic Energy Report. RPT4-S-430-SIAE/SA, RC, FL, RP.
- 4- Ke, G., Sun, Z., Shen, F., Liu, T., Li, Y., Zhou, Y., 2009. The study of physics and thermal characteristics for in-hospital neutron irradiator (IHNI). Appl. Radiat. Isot. 67 (7), S234eS237.
- 5- Shaaban, I., Albarhoum, M., 2015. Design calculation of an epithermal neutron beam for BNCT at the Syrian MNSR using the MCNP4C code. Prog. Nucl. Energy 78 (0), 297e302.
- 6- Kasesaz, Y., Khalafi, H., Rahmani, F., 2014a. Design of an epithermal neutron beam for BNCT in thermal column of Tehran research reactor. Ann. Nucl. Energy 68 (0), 234e238.
- 7- ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, (2007).
- 8 - Hossein Jarahi, Yaser Kasesaz, Seyed Mohsen Saleh-Koutahi, Evaluation of the effective dose during BNCT at TRR thermal column epithermal facility, Applied Radiation and Isotopes 110 (2016) 134-137



9-Wang,J.-N.,Lee,K.-W.,Jiang,S.-H.,2014.EffectivedoseevaluationforBNCTbrain tumor treatment based on voxel phantoms.Appl.Radiat.Isot.88,55-58.