



نشریه تابش و فناوری هسته‌ای، سال اول، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۳

امکان سنجی تجربی و تئوری استفاده از اتاق درمان موجود در راکتور تحقیقاتی تهران در نوترون درمانی

محدثه گلشنیان^۱، علی اکبر رجیبی^۲، یاسر کاسه ساز^{۳*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران

^۲ استاد، دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران

^۳ استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران، سازمان انرژی اتمی، تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۷/۲ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵)

چکیده در حال حاضر راکتور تحقیقاتی تهران تنها چشمه نوترونی موجود در کشور است که می‌تواند در نوترون درمانی مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه امکان استفاده از اتاق درمان موجود در ساختمان راکتور ارائه خواهد شد. امکان‌سنجی با توجه به الزامات ارائه شده از سوی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی بصورت تئوری و تجربی صورت گرفته است که شامل بررسی امکان بهره‌برداری از قلب راکتور در قسمت شرقی استخر، اندازه‌گیری طیف نوترون در مجاورت قلب به روش فعالسازی پولک‌های آستانه‌ای و شبیه‌سازی مونت کارلو به کمک کد MCNPX می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد با در نظر گرفتن یک کانال نوترونی مناسب بین قلب و اتاق درمان می‌توان باریکه نوترونی لازم برای درمان را ایجاد نمود. همچنین فضاها و امکانات موجود در ساختمان راکتور قابلیت ایجاد

سیستم نوترون درمانی عملیاتی را دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: راکتور تحقیقاتی تهران، نوترون درمانی با بور، اتاق درمان، کد MCNPX، کد SANDII

* تهران، تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کد پستی: ۱۴۳۹۹۵۱۱۱۳

پست الکترونیکی: ykasesaz@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

استفاده از این بخش غیر ممکن است. وجود دز بالای ذکر شده منجر به عدم دسترسی به بلوک‌های گرافیتی در عمق حدود سه متری ستون حرارتی می‌شود. وجود این مشکل و مشکلات فنی دیگر، زمینه تحقیقاتی جدیدی را در جهت امکان‌سنجی استفاده از اتاق درمان موجود در ضلع شرقی راکتور فراهم نموده است. در این مطالعه امکان استفاده از این اتاق به صورت تجربی و تئوری ارائه خواهد شد.

۲. معرفی تجهیزات پرتودهی راکتور تهران

استخر راکتور شامل دو بخش شرقی و غربی قابل تفکیک است. بخش غربی به جهت بهره‌برداری از قلب برای اهداف تحقیقاتی مختلف و از بخش شرقی به منظور انتقال قلب برای تعمیر و موارد اضطراری استفاده می‌شود.

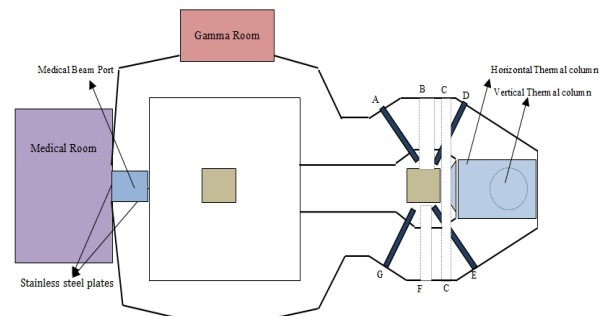
تصویر نشان داده شده در شکل (۱) نمایی از استخر، موقعیت قلب در دو قسمت استخر و تجهیزات پرتودهی را نشان می‌دهد. در قسمت غربی تعداد هفت عدد کانال پرتودهی با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف وجود دارد. همچنین ستون حرارتی راکتور که با بلوک‌های گرافیتی پر شده است در این قسمت قرار دارد. پشت دیوار شرقی استخر، اتاق درمان وجود دارد. روی این دیوار یک حفره بزرگ تعبیه شده است که توسط بلوک‌های بتونی پر شده و توسط دو صفحه فولادی آب بندی شده است. این دریچه‌ها تاکنون باز نشده‌اند. یکی از این دریچه‌ها داخل استخر و دیگری داخل اتاق قرار دارد (شکل ۲). جهت استفاده از اتاق درمان لازم است که قلب راکتور در قسمت شرقی مورد بهره‌برداری قرار گیرد و یک کانال بین قلب و دیوار شرقی استخر قرار داده شود. همچنین لازم است تا دریچه‌های روی دیوار باز شده و درون حفره تخلیه گردد.

آمارها نشان می‌دهد، سرطان سومین عامل مرگ و میر در ایران و دومین عامل در جهان است [۱، ۲]. از جمله روش‌های پرتو درمانی مناسبی که برای درمان سرطان‌هایی نظیر مغز، سر و گردن، پوست و اخیراً کبد پیشنهاد شده است، روش نوترون درمانی با بور یا ^{10}B BNCT است [۳]. در این روش سلول‌های سرطانی که با جذب داروی حامل هسته‌های پایدار بور-۱۰ نشاندار شده‌اند، توسط باریکه‌ای از نوترون‌های با انرژی و شدت مناسب بمباران می‌شوند.

جذب نوترون‌های حرارتی توسط هسته‌های بور-۱۰ منجر به تولید هسته‌های ^4He ، ^7Li می‌شود که این هسته‌ها با تخلیه انرژی خود در گستره ۹-۵ میکرومتر، که قابل قیاس با ابعاد یک سلول است، منجر به نابودی آن سلول می‌شوند [۴]. از جمله بخش‌های اصلی در روش نوترون درمانی با بور، ایجاد چشمه نوترونی با قابلیت تولید باریکه نوترونی موثر بر اساس معیارهای ارائه شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی می‌باشد [۵]. راکتورهای تحقیقاتی به علت دارا بودن شار نوترونی بالا تنها چشمه نوترونی استفاده شده در آزمون‌های درمانی می‌باشند [۳]. اخیراً مطالعات گسترده‌ای پیرامون ایجاد یک باریکه نوترونی مناسب در ستون حرارتی راکتور تهران صورت گرفته است. در این تحقیقات نشان داده شده است، با فرض خارج نمودن همه‌ی بلوک‌های گرافیتی از درون ستون حرارتی، می‌توان باریکه نوترونی مناسب برای درمان را در آن قسمت ایجاد نمود [۶، ۷]. اما با توجه به شرایط کاری فعلی راکتور و بدلیل مشکلاتی نظیر وجود دز گامای زمینه بسیار بالا، حتی در حالت خاموشی راکتور که به نظر می‌رسد ناشی از اکتیو شدن مواد مختلف در ساختمان و تجهیزات نزدیک قلب باشد،

شرقی قلب با روش فعال سازی پولک های آستانه ای اندازه گیری شد. شکل (۳) صفحه پلی اتیلنی شامل پولک‌ها را نشان می‌دهد. به منظور بازیابی طیف نوترون از کد SANDII استفاده شد [۸]. این کد با دریافت جنس پولک‌ها، واکنش در نظر گرفته شده برای هر پولک، مقادیر تجربی فعالیت پولک‌ها و همچنین حدس اولیه از طیف انرژی نوترون، طیف انرژی نوترون واقعی را محاسبه می‌کند.

مسئله مهم دیگر، امکان بازکردن دریچه های روی دیوار به منظور تخلیه بلوک های بتنی بود. با توجه به عمر بالای راکتور و اینکه این دریچه تا کنون باز نشده است، بازکردن دریچه داخل استخر بسیار مخاطره آمیز تشخیص داده شد و لذا تصمیم گرفته شد که حتی الامکان این دریچه باز نشود. اما دریچه داخل اتاق درمان را می‌توان با باز کردن تعداد ۱۲۰ پیچی که آن را به دیوار متصل کرده است، باز نمود. به این ترتیب در مراحل بعد دریچه داخل آب در محل خود ثابت در نظر گرفته شد. فاصله بین قلب تا محل قرار گیری بیمار در اتاق درمان حدود چهار متر است، لذا یکی دیگر از مواردی که باید بررسی می‌شد میزان افت شار نوترون در فاصله بین قلب و اتاق درمان بود که به این کار با استفاده از کد MCNPX2.6 صورت گرفت [۹]. به این منظور قلب، استخر و اتاق درمان با توجه به اطلاعات موجود در گزارش آنالیز ایمنی راکتور تهران شبیه سازی شد [۱۰]. شکل (۴) نمایی از هندسه شبیه سازی شده را نشان می‌دهد. سپس با در نظر گرفتن یک کانال استوانه‌ای بین قلب و دیوار استخر به گونه ای که کل سطح جانبی قلب را پوشش دهد، میزان افت شار نوترون در محل پرتودهی محاسبه شد. مدت زمان اجرای برنامه به گونه‌ای تنظیم شد تا خطای محاسبات زیر ۵ درصد باشد. نتایج این بخش در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۱. تصویری از راکتور تهران و تجهیزات پرتودهی آن نمایی از راکتور تهران و تجهیزات پرتودهی آن؛ A, D, G و E کانال‌های ۶ اینچی شعاعی، C کانال ۶ اینچی سراسری، B کانال ۱۲ اینچی مربعی و F کانال ۸ اینچی شعاعی



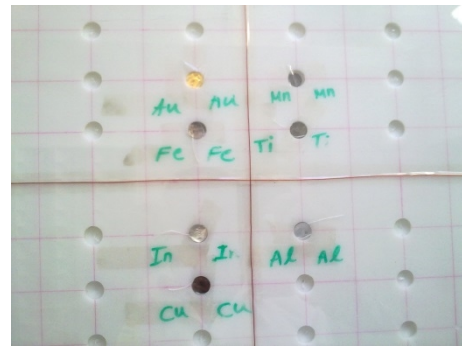
شکل ۲. دریچه های موجود روی دیوار شرقی استخر

۳. امکان سنجی استفاده از اتاق درمان

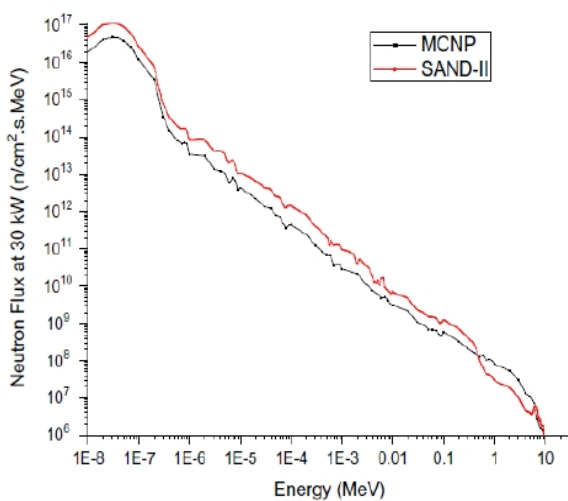
از نظر امکان سنجی، سه مسئله مهم باید مورد ارزیابی قرار می‌گرفت: (۱) امکان بهره برداری از قلب در قسمت شرقی و (۲) میزان افت شار در فاصله قلب تا درون اتاق درمان و (۳) امکان ایجاد سیستم نوترون درمانی بر اساس الزامات ارائه شده توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی [۵].

ابتدا طی یک آزمایش، با لحاظ نمودن مسائل فنی و ایمنی و با حضور کارشناسان گروه بهره برداری راکتور، امکان روشن نمودن و استفاده از قلب در قسمت شرقی استخر ارزیابی شد. بدین ترتیب پس از انتقال قلب به این قسمت، قلب راکتور با موفقیت روشن و به مدت ۲۰ دقیقه در قدرت ۳۰ kW قرار گرفت. همزمان با این کار، طیف انرژی نوترون در کنار وجه

شکل (۵) نتایج بازیابی طیف انرژی نوترون در مقایسه با نتایج تئوری حاصل از شبیه سازی، را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با توجه به بالا بودن میزان شدت نوترون در مجاورت قلب، قابلیت بهینه سازی برای بکارگیری در نوترون درمانی وجود دارد. اختلافات موجود در نتایج تئوری و تجربی می تواند ناشی از ساده سازی شرایط محاسبات تئوری، نظیر عدم در نظر گرفتن میزان مصرف سوخت باشد.



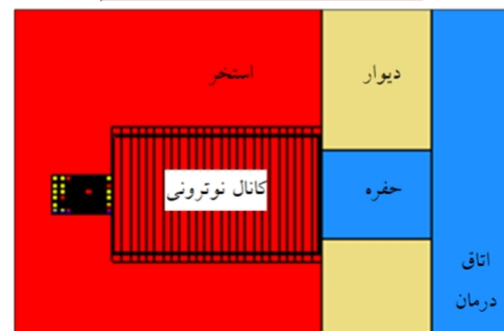
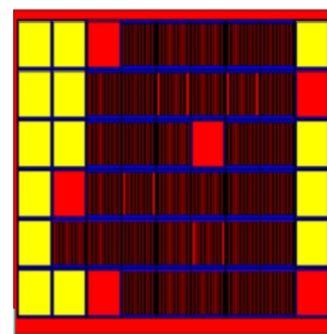
شکل ۳. صفحه پلی اتیلنی و مجموعه پولک ها جهت اندازه گیری طیف انرژی نوترون



شکل ۵. طیف انرژی نوترون بازیابی شده توسط کد SANDII در

مقایسه با کد MCNPX

جدول (۲) نتایج محاسبه شار سه گروهی نوترون در مجاورت قلب و محل پرتو دهی را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می شود با وجود افت فشار قابل توجه در مسیر نوترون میزان شدت شار در محل پرتو دهی به گونه ای است که می توان با طراحی یک مجموعه مناسب از مواد شامل کندکننده، فیلتر و موازی کننده، شار فوق حرارتی مناسبی را با توجه به معیار های ارائه شده از سوی آژانس بین المللی انرژی اتمی ایجاد نمود.



شکل ۴. هندسه شبیه سازی شده در کد MCNPX، قلب (بالا)،

استخر، کانال نوترون، اتاق درمان و قلب (پایین)

جدول ۱. مشخصات باریکه نوترونی مناسب [۴]

پارامتر	مقدار پیشنهادی
$\Phi_{\text{epithermal}} \left(\frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right)$	$> 10^9$
$\frac{\Phi_{\text{epithermal}}}{\Phi_{\text{thermal}}}$	> 20
$\frac{\dot{D}_{\text{fast}}}{\Phi_{\text{epithermal}}} (\text{Gy} \cdot \text{cm}^2)$	$< 2 \times 10^{-13}$
$\frac{\dot{D}_{\text{gamma}}}{\Phi_{\text{thermal}}} (\text{Gy} \cdot \text{cm}^2)$	$< 2 \times 10^{-13}$

جدول ۲. شار سه گروهی نوترون در مجاورت قلب و در محل پرتودهی

موقعیت	سرّیع (n/cm ² .s)	فوق حرارتی (n/cm ² .s)	حرارتی (n/cm ² .s)
در مجاورت قلب	۸/۱۵×۱۰ ^{۱۱}	۴/۶۶×۱۰ ^{۱۱}	۱/۳۱×۱۰ ^{۱۲}
در محل پرتودهی	۲/۵۵×۱۰ ^{۱۰}	۲/۱۴×۱۰ ^{۱۰}	۶/۴۴×۱۰ ^{۱۰}

عبور داد. دسترسی به اتاق درمان به گونه ای است که می توان بیمار را بدون اینکه وارد منطقه اصلی راکتور شود، به داخل اتاق انتقال داد. یکی از درب های ورودی به راکتور، درست در کنار درب ورودی اتاق درمان قرار دارد. مسیر به گونه ای است که می توان از طبقه زیر زمین ساختمان جنبی راکتور جهت دسترسی به اتاق درمان استفاده نمود.

۳- مسدود کننده یا شاتر: برای جلوگیری از خروج پرتوهای

نوترون و گاما از دریچه خروجی کانال در اتاق درمان در مواقع عدم استفاده از آن، لازم است تا یک مسدود کننده یا شاتر تعبیه شود. این شاتر می تواند یک بلوک سربی با لایه های مختلف پلی اتیلن، کادمیوم و مواد مناسب دیگر باشد که به کمک یک ریل در مقابل دریچه خروجی قرار گیرد. گزینه دیگر استفاده از آب است. می توان با استفاده از سیستم لوله کشی موجود در راکتور با پر نمودن کانال نوترون از آب، به عنوان شاتر استفاده کرد.

۴- سیستم اندازه گیری میزان بور در نمونه خون: پس از

تزریق داروی حامل بور-۱۰، لازم است تا با نمونه گیری خون در زمان های مختلف، میزان بور-۱۰ در خون اندازه گیری شود. می توان از روش آنالیز فعال سازی نوترونی جهت اندازه گیری میزان بور استفاده نمود. به این منظور می توان از سیستم ریبت متصل به کانال ۱۲ اینچی استفاده نمود. در این سیستم نمونه به ابتدای کانال ۱۲ اینچی شوت می شود و پس از پرتودهی به درون سیستم اندازه گیری فرستاده می شود. بدیهی است که برای اندازه گیری مطلق میزان بور-۱۰ باید ضمن ساختن یک نمونه استاندارد، آشکار ساز را کالیبره نمود.

۵- سیستم مانیتورینگ و کنترل درمان: به منظور کنترل

پرتودهی، شرایط بیمار و ... باید تجهیزات نظارتی و کنترلی

در پایان امکان ایجاد سیستم نوترون درمانی بر اساس الزامات ارائه شده توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی و با توجه به شرایط موجود در ساختمان راکتور به صورت زیرمورد بررسی قرار گرفت:

۱- کانال ایجاد باریکه نوترون مناسب: به منظور هدایت

نوترون های خروجی از قلب به درون اتاق درمان و همچنین بهینه سازی باریکه نوترون از نظر شدت، انرژی و آلودگی گاما، باید یک کانال بین قلب و دیوار اتاق و درون آب در نظر گرفته شود. این کانال می تواند یک استوانه باشد که شامل مواد کندکننده، فیلتر گاما، بازتابنده نوترون و هوا باشد. لایه ای از سرب را می توان به عنوان بارتابنده نوترون فوق حرارتی درون لایه داخلی استوانه در نظر گرفت. همچنین درون حفره دیوار، یک موازی ساز قرار می گیرد که نوترون ها را در محل پرتودهی متمرکز نماید.

۲- اتاق درمان و حفاظها: اتاق درمان موجود در راکتور

تهران، از نظر ابعاد بسیار مناسب است به گونه ای که می توان تخت بیمار را در هر حالتی در آنجا قرار داد. دیوارها باید حفاظ گذاری شوند و یک درب سربی جایگزین درب معمولی فعلی شود. این درب باید شامل پنجره ای باشد که بتوان از طریق آن بیمار را مشاهده نمود. پهنای ورودی باید کمی بزرگتر شود تا بتوان تخت بیمار را به راحتی از آنجا

مراجع:

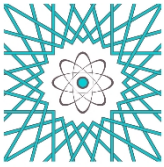
- [۱] گزارش ثبت موارد سرطانی کشوری، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، معاونت سلامت، مرکز مدیریت بیماریها، اداره سرطان، <http://ircancer.ir>
- [2] American cancer society, Annual report of cancer facts and figures, www.cancer.org/research/cancerfactsfigures/cancer_factsfigures/index.
- [3] G. L. Locher, Biological Effects and Therapeutic Possibilities of Neutrons, *Am J Roentgenol Radium Ther*, 36, 1-13, 1936.
- [4] R. F. Barth, M. Vicente, Current status of boron neutron capture therapy of high grade gliomas and recurrent head and neck cancer, *Radiat Oncol*, 7(146), 1-21, 2012.
- [5] IAEA, Current status of neutron capture therapy, TECDOC-1223, 2001.
- [6] Y. Kasesaz, H. Khalafi, F. Rahmani, Design of an epithermal neutron beam for BNCT in thermal column of Tehran research reactor, *Ann Nucl Energy*, 68(8), 234-238, 2014.
- [7] Y. Kasesaz, H. Khalafi, F. Rahmani, A feasibility study of the Tehran research reactor as a neutron source for BNCT, *Appl Rad Isotopes*, 90, 132-137, 2014.
- [8] W.N. McElroy, SAND-II neutron flux spectra determination by multiple foil activation iterative method. RSIC Computer Code Collection, 1967.
- [9] J. S. Hendricks, MCNPX 2.6 Manual, 2008.
- [10] TRR-Rep, Safety analysis report for Tehran research reactor, 2009.

مناسب در نظر گرفته شود. این تجهیزات شامل دوربین های مداربسته، دزیترهای محیطی و سیستم های اضطراری می باشد. بدیهی است که سیستم های کنترلی باید با سیستم کنترل راکتور مرتبط باشد تا در صورت نیاز بتوانند فرمان خاموشی راکتور را صادر نماید.

۶- دیگر تجهیزات جانبی: این تجهیزات شامل کلیه سیستم ها و ابزارهای لازم جهت یک مرکز پرتودرمانی است.

۴. بحث و نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که امکان بهره‌برداری از قلب راکتور در استخر شرقی وجود دارد و همچنین میزان افت شار نوترون به گونه‌ای است که شار نوترونی مورد نیاز در محل بیمار قابل دستیابی است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن یک کانال بین قلب راکتور و محل پرتودهی، میزان شار غیر حرارتی نوترون (مجموع شار سریع و فوق حرارتی) در محل پرتودهی برابر $4/69 \times 10^{10}$ (n/cm².s) است که مقدار قابل توجهی است به گونه‌ای که با طراحی یک مجموعه مناسب از مواد شامل کندکننده، فیلتر و موازی کننده، می‌توان شار فوق حرارتی مورد نیاز برای درمان را ایجاد نمود. لذا می‌توان از اتاق درمان موجود در راکتور تهران برای نوترون درمانی استفاده نمود. به این منظور باید قلب راکتور در استخر دوم روشن شود و یک کانال درون استخر بین قلب و دیوار اتاق درمان قرار گیرد. همچنین سیستم‌های کنترلی راکتور باید نسبت به موقعیت جدید قلب کالیبره شوند.



Experimental and theoretical feasibility study on the use of TRR medical room for BNCT

M. Golshanian¹, A. Rajabi², Y. Kasesaz^{3*}

1. Ph.D student, Department of Physics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2. Professor, Department of Physics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3. Assistant professor, Nuclear Science and Technology Research Institute of Iran, Tehran, Iran

* Corresponding author's E-mail: ykasesaz@aeoi.org.ir

(Received: 24/9/2014 - Accepted: 5/1/2015)

ABSTRACT

Recent researches show that the thermal column of TRR is an appropriate facility which can be modified for epithermal BNCT. The main need modification is to remove all graphite blocks from it but at present it is impossible. The most important challenge is the high gamma dose rate in the thermal column. The other alternative facility for BNCT is the TRR medical room. In this work an experimental and theoretical investigation on the use of this room for BNCT has been presented. The experimental investigation consists of (1) the possibility of operation of the reactor core in the open pool position, and (2) measurement of neutron energy spectrum near the eastern side of the reactor core. The theoretical investigation consists of MCNP Monte Carlo simulation to estimate the epithermal neutron flux at the patient position. Multi-foil activation method and SANDII unfolding code were used to measure the neutron energy spectrum. The MCNP simulation was consisted of the reactor core, medical room, reactor pool and a beam tube (between the core and patient position). The results show that in view of the technical aspects, the reactor core can operate in the open pool position. In an experiment the reactor core operate in this position for 20 min at 30 kW power. MCNP result shows that by considering a special in-pool BSA an appropriate epithermal neutron beam ($\sim 5 \times 10^9 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$) could be achieved.

Keywords: BNCT, Tehran Research Reactor, Medical room, MCNPX, SANDII