

## بهینه‌سازی طیف‌سنج نوترون چند-کندکننده‌ای به منظور اندازه‌گیری طیف نوترون فوق

## حرارتی در BNCT

## INC29-1296

زینب کاظمی<sup>۱</sup>، فائزه رحمانی<sup>۱\*</sup>، نیما قلعه<sup>۲</sup>

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۵۸۷۵-۴۴۱۶، تهران - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ۹۱۷۷۵-۱۴۳۶، مشهد - ایران

## چکیده:

یکی از الزامات راه‌اندازی سامانه درمانی مبتنی بر جذب نوترون در بور (BNCT)، اندازه‌گیری دقیق طیف انرژی نوترون در ناحیه انرژی درمانی است. ابزارها و روش‌های مختلفی به صورت برخط و یا تأخیری در حین درمان یا قبل از درمان برای اندازه‌گیری طیف انرژی نوترونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تفاوت اندازه‌گیری طیف نوترون درمانی در BNCT و الزام طراحی سامانه اختصاصی برای این روش، غالب بودن نوترون فوق‌حرارتی در طیف انرژی و کوچک بودن بازه انرژی مناسب برای درمان (بازه انرژی 4 eV تا 10 keV) است. به همین جهت به ابزار اندازه‌گیری نیاز است که بتواند تغییرات طیف انرژی نوترون را در این بازه انرژی نشان دهد. در حال حاضر راکتور تحقیقاتی تهران (TRR) تنها چشمه نوترون قابل استفاده برای BNCT در ایران است. در این پژوهش، امکان‌سنجی طراحی و بهینه‌سازی طیف‌نگار نوترون چندکندکننده‌ای (MMNS) استوانه‌ای با جنس پلی‌اتیلن مبتنی بر آشکارساز نوترون حرارتی LiI(Eu) برای اندازه‌گیری طیف باریکه نوترون درمانی به دست آمده از شکل‌دهنده طیف در TRR برای BNCT، انجام شده است. همچنین بازیابی طیف با کد بازیابی AFITBUNKI صورت گرفته است.

کلیدواژه‌ها: نوترون درمانی با بور، راکتور تحقیقاتی تهران، کد مونت کارلویی MCNP، آشکارساز چندکندکننده‌ای، کد بازیابی طیف نوترون AFITBUNKI، سوسوزن LiI(Eu)

**Optimization of a Multi-Moderator Neutron Spectrometer for epithermal neutron spectrum measurements in BNCT****Kazemi, Zeinab<sup>1</sup>; Rahmani, Faezeh<sup>1</sup>; Ghal-Eh, Nima<sup>2</sup>**

Department of Physics, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Department of Physics, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

**Abstract:**

One of the requirements for a treatment system based on BNCT is the precise measurement of the neutron energy spectrum in the therapeutic (i.e., epithermal) neutron energy range. Many instruments and different online or passive ways during the treatment or before it, for measuring the neutron energy spectrum have been used. What makes this measurement special is that the predominating epithermal neutrons are in a very narrow region of the neutron energy spectrum. In this research, the design and optimization of a cylindrical multi-moderator neutron spectrum based on LiI(Eu) has been proposed for BNCT. In order to unfold the neutron spectrum, the AFITBUNKI code has been used. The results confirm the feasibility of the proposed spectrometer for epithermal neutron measurements.

**Keywords:** BNCT, Epithermal Neutrons, AFITBUNKI unfolding code, Neutron Spectrometer, Neutron Detector, LiI(Eu)

## ۱. مقدمه

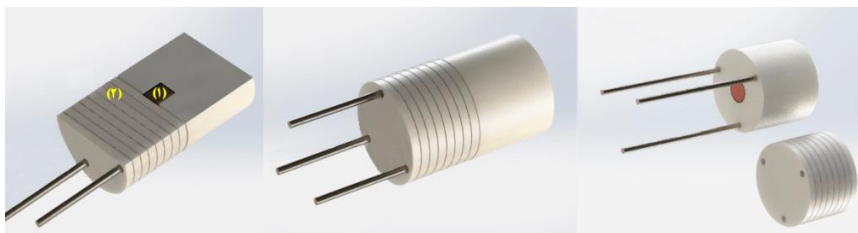
درمان توسط گیراندازی نوترون به‌وسیله بور یا  $^{10}\text{B}$  یکی از روش‌های مورد توجه در درمان بعضی سرطان‌ها از جمله تومورهای مغزی است. BNCT یک درمان دوره‌ای با استفاده از واکنش بین نوترون و بور ۱۰ به منظور نابودی گزینشی سلول‌های سرطانی است. در این روش درمان، ابتدا بور ( $^{10}\text{B}$ ) به‌صورت یک ترکیب خاص زیستی که به‌وسیله مواد تومور دوست، نشان‌دار شده است پس از تزریق به بدن، درون تومور متمرکز می‌شود. سپس یک باریکه از نوترون با انرژی و شدت مناسب بر روی منطقه تومور تابانده می‌شود. در اثر اندرکنش  $^{10}\text{B}$  با نوترون‌های حرارتی،  $^7\text{Li}$  و ذره‌ی آلفا تولید می‌شود که به دلیل برد کم و انرژی زیاد این ذرات در محل اندرکنش، موجب نابودی سلول‌های تومور می‌شوند [۱].

در حال حاضر راکتور تحقیقاتی تهران<sup>۲</sup> (TRR) تنها منبع تأمین‌کننده‌ی طیف درمانی مورد استفاده در BNCT است [۲] که طبق استانداردهای تعیین شده از سوی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی مورد تایید است [۳]. این پژوهش نیز به منظور ارائه یک سامانه اندازه‌گیری طیف انرژی نوترون در ناحیه طیفی خروجی از BSA طراحی شده برای TRR، انجام شده است.

یکی از الزامات راه اندازی درمان بر پایه BNCT، اندازه‌گیری دقیق باریکه درمانی شامل نوترون و نیز اندازه‌گیری آلودگی گاما در طیف درمانی است. روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری و تعیین طیف نوترون درمانی وجود دارد. رحمانی و همکاران در سال ۲۰۲۰، یک طراحی اولیه از طیف‌سنج چندکندنده‌ای برای اندازه‌گیری در میدان نوترونی BNCT ارائه کرده‌اند [۴]. هرچند نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار بود، لیکن به منظور استفاده از این طیف‌سنج در اندازه‌گیری‌های BNCT ضروری بود تا دقت آن تا حد امکان افزایش یابد. بنابراین در این پژوهش، اندازه‌گیری طیف نوترونی درمان، مبتنی بر روش‌های بازتابی در طیف‌نگاری با طیف‌سنج چند کندکندنده‌ای نوترون مناسب برای BNCT در ساختاری جدید مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲. روش کار

ساختار طیف‌سنج چند کندکندنده‌ای به این صورت است که در مرکز آن از یک آشکارساز نوترون حرارتی استفاده می‌شود. برای آن که طیف نوترون درمانی که شار غالب آن در محدوده انرژی فوق‌حرارتی قرار دارد، مناسب ثبت شدن توسط آشکارساز مذکور شود، از لایه‌های کندکندنده پلی‌اتیلنی مناسب در مقابل آشکارساز استفاده می‌شود.



شکل ۱. تصویر ساختار پیشنهادی این پژوهش. (۱) آشکارساز LiI(Eu) در مرکز سامانه (۲) لایه‌های کندکندنده پلی‌اتیلنی قابل جابجایی.

### ۱.۲. تهیه ماتریس پاسخ آشکارساز

در این پژوهش به دلیل بازدهی بالای کریستال سوسوزن LiI(Eu) در آشکارسازی نوترون‌های حرارتی و امکان ساخت آن در ابعاد کوچک، از این آشکارساز در مرکز ساختار پیشنهادی بهره برده شده است و در اطراف آن لایه‌های کندکندنده پلی‌اتیلنی به علت سادگی و کندسازی مناسب نوترونی، به‌عنوان کندکندنده قرار گرفته‌اند. به این ترتیب در ساختار پیشنهادی (شکل ۱) سوسوزن به شکل استوانه‌ای کوچک با شعاع و ضخامت ۱ mm است که متشکل از ۴/۳۶ درصد وزنی  $^6\text{Li}$  و ۰/۱۸ درصد وزنی  $^7\text{Li}$  و ۹۵/۴۶ درصد وزنی I با چگالی  $3/494 \text{ g/cm}^3$  است و در مقابل این سوسوزن، لایه‌هایی

<sup>۱</sup> Boron Neutron Capture Therapy

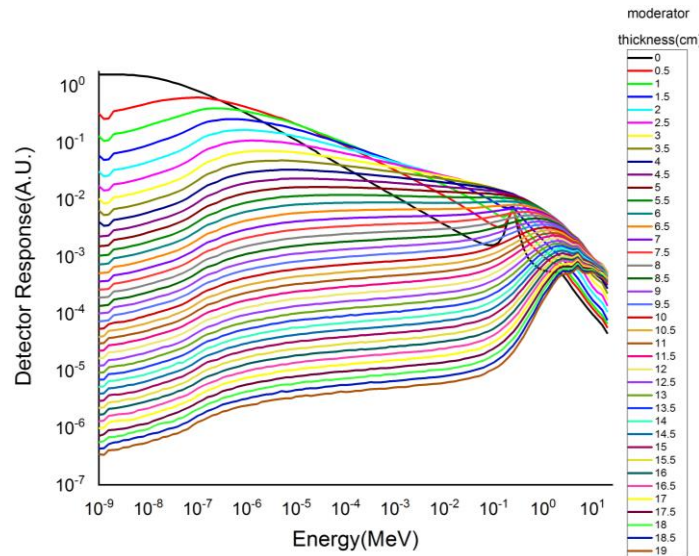
<sup>۲</sup> Tehran Research Reactor

استوانه‌ای از پلی اتیلن با شعاع ۱۰ cm و ضخامت ۵mm قرار داده شده است. ضمن این که تعداد این استوانه‌های پلی اتیلنی در هر مرحله افزوده شده و پاسخ آشکارساز در ضخامت‌های مختلف ثبت می‌شود.

برای تعیین ابعاد کلی آشکارساز، ابتدا حداقل ضخامت مورد نیاز برای کندسازی پرنرژی‌ترین نوترون طیف درمان توسط شبیه‌سازی با کد مونت کارلوی MCNPX2.6 براساس پیشینه شمارش در LiI(Eu) محاسبه شد. حداقل ضخامت کندکننده مورد استفاده در مقابل آشکارساز برابر با ۹cm است. سپس باید شمارش‌های ثبت شده در آشکارساز را در تک انرژی‌های نوترونی و در مقابل لایه‌های کندکننده با ضخامت‌های متفاوت در آرایه‌ای به نام ماتریس پاسخ این ساختار جمع آوری نمود.

ضمن ارائه این ساختار نیاز بود تا تمامی شبیه‌سازی‌ها با کد مونت کارلوی MCNPX2.6 انجام شود [۵] و پاسخ آشکارساز مرکزی LiI(Eu) در مقابل لایه‌هایی با ضخامت‌های متفاوت از کندکننده پلی اتیلنی و در تک انرژی‌های مختلف نوترونی ثبت شود تا ماتریس پاسخ مختص این ساختار به دست آید که به این منظور بیش از ۴۰۰۰ برنامه شبیه‌سازی، نوشته و اجرا شد [۶].

شکل ۲، ماتریس پاسخ آشکارساز است که آرایه‌های آن در ۹۴ گروه انرژی و ۳۹ ضخامت با میزان خطای قابل قبول کمتر از ۱۰٪ گسترش یافته که برای بازیابی طیف نوترونی استفاده می‌شود.



شکل ۲. نمودار شمارش ثبت شده در آشکارساز با ضخامت‌های مختلف کندکننده که در معرض چشمه‌های تک انرژی نوترون قرار گرفته است (ماتریس پاسخ).

## ۲.۲. فرایند بازیابی طیف

بسته به روش بازیابی طیف<sup>۱</sup>، آشکارساز نوترون پاسخ مختص به خود را برای بازه انرژی نوترون‌ها دارد (بسته به ضخامت، ماده و چگالی). به لحاظ نظری، اگر پاسخ آشکارساز به هر انرژی مشخص شود، پاسخ آن به هر طیف انرژی نیز قابل محاسبه است. به بیان دیگر، با این فرض که آشکارساز به طیف وسیعی از انرژی حساس باشد، طیف نوترونی می‌تواند از طریق یک عملیات ریاضی به نام بازیابی طیف، پیش‌بینی شود [۷].

<sup>۱</sup> Unfolding

اضافه شدن هر لایه‌ی پلی‌اتیلنی (با احتساب آشکارساز عریان) به آشکارساز، یک شمارش جدید به دست می‌دهد (C) که وابسته به طیف نوترونی  $\Phi(E)$  و ماتریس پاسخ R است (معادله انتگرالی فردهولم<sup>۱</sup> نوع اول که در روابط ۱ و ۲ مشاهده می‌شود [۸]):

$$C = \int_{E_i}^{E_f} R(E)\Phi(E)dE \quad (1)$$

$$C = \sum_{j=1}^n R_{ij}\Phi_j, \quad i = 1, m \quad (2)$$

معادله فوق می‌تواند به شکل ماتریسی رابطه ۳ ساده سازی شود.

$$M = R\Phi \quad (3)$$

از آن جایی که پاسخ معادله‌ی ۱ برای به دست آوردن  $\Phi(E)$  به سادگی و مستقیم انجام نمی‌شود، می‌توان معادله‌ی ۳ را به جای آن حل نمود که عموماً توسط کدهای تحلیلی-عددی قابل حل است که ما کد بازیابی طیف AFITBUNKI را انتخاب کردیم.

## ۱.۲.۲. کد بازیابی AFITBUNKI

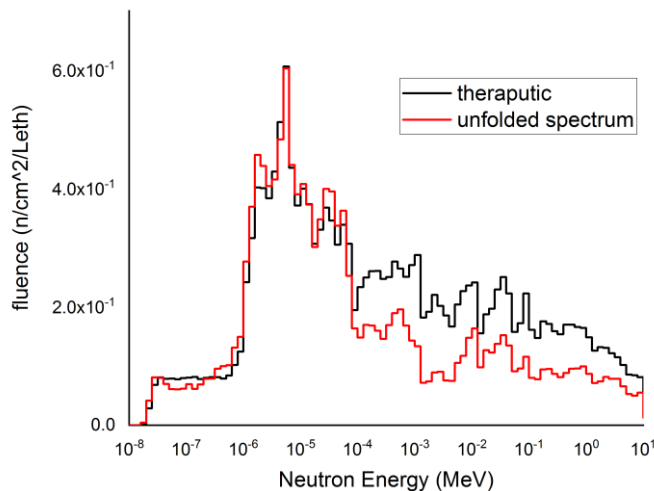
این برنامه، یک کد معروف و کاربردی برای بازیابی طیف‌ها به زبان برنامه نویسی FORTRAN است [۹]. نسخه در دسترس کد AFITBUNKI به زبان FORTRAN نسخه ۷۷ و در حدوداً ۱۵۰۰ خط نوشته شده است. مشکل اصلی استفاده از نسخه اصلی کد در این است که داده‌های مربوط به توابع پاسخ کره‌های بانر، داده‌های مربوط به طیف‌های نوترون اولیه پیشنهادی، داده‌های ضرایب تبدیل شار به دز و خطوط مربوط به الگوریتم بازیابی طیف (الگوریتم با روش تکرار SPUNIT) همگی در یک روال<sup>۲</sup> نوشته شده است که این موضوع هرگونه تغییر را با مشکل مواجه می‌سازد. کد به یک روال و ۲۲ زیرروال<sup>۳</sup> بازنویسی شد و برای آن یک پنجره مکالمه نیز طراحی گردید. تعداد کره‌ها و قرائت‌های هر یک مهم‌ترین اطلاعات ورودی کد بازیابی AFITBUNKI محسوب می‌شوند. همچنین برنامه قابلیت استفاده از ضرایب کالیبراسیون و هموارسازی را نیز در اختیار کاربر قرار می‌دهد. تعداد تکرار و رسیدن به مناسب‌ترین جواب نیز به عنوان ورودی قابل تعیین شدن است. پس از اجرای برنامه، طیف انرژی نوترون به صورت فایل متنی و به عنوان یکی از اطلاعات خروجی برنامه در اختیار کاربر قرار می‌گیرد [۱۰].

برای بازیابی طیف درمان، پس از دریافت نتایج اولیه بازیابی، کد باید برای طیف درمان بهینه‌سازی می‌شد که در این بهینه‌سازی تک تک متغیرهای موجود در پنجره مکالمه این کد که توسط کاربر تعیین می‌گردید، بهینه گشته و برای بدست آمدن یک مقایسه آماری مناسب، از آزمون کای دو بهره برده شد. بر اثر بررسی تغییر در متغیرهای مذکور، نهایتاً بازیابی با مشخصات بهینه انجام و در شکل ۴ با طیف درمان مقایسه شده است.

<sup>۱</sup> Fredholm integral

<sup>۲</sup> routine

<sup>۳</sup> subroutine



شکل ۴. تصویر مقایسه نتایج کد AFITBUNKI با طیف درمان خروجی از راکتور تحقیقاتی تهران.

### ۳. نتیجه‌گیری

ساختار طیف‌نگار نوترونی چندکندکننده پیشنهادی در این پژوهش، برای طیف‌نگاری باریکه نوترون درمانی خروجی از شکل‌دهنده راکتور تحقیقاتی تهران، مناسب است. این طرح ساده‌تر از طرح قبلی وبا دقت بیشتری است. در نهایت این ساختار طیف نوترونی با دقتی مناسب در بازه طیف درمانی خروجی از راکتور تحقیقاتی تهران که حدوداً  $10^{-8}$  MeV تا 10 MeV است، را طیف‌نگاری نمود.

### مراجع

- [۱] R. F. Barth, J. A. Coderre, M. G. a. H. Vicente, and T. E. Blue, "Boron Neutron Capture Therapy of Cancer: Current Status and Future Prospects," *Clinical Cancer Research*, vol. 11, pp. 3987-4002, 2005.
- [۲] Y. Kasesaz, H. Khalafi, and F. Rahmani, "Design of an epithermal neutron beam for BNCT in thermal column of Tehran research reactor," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 68, pp. 234-238, 2014.
- [۳] R. F. during Storage, "IAEA TECDOC SERIES".
- [۴] F. Rahmani, N. Ghal-Eh, and H. R. Vega-Carrillo, "A multi-moderator neutron spectrometer for use in BNCT studies of the Tehran research reactor," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 174, p. 109751, 2021.
- [۵] L. S. Waters, "MCNPX user's manual," *Los Alamos National Laboratory*, vol. 124, 2002.
- [۶] D. B. Pelowitz, J. W. Durkee, J. S. Elson, M. L. Fensin, J. S. Hendricks, M. R. James, et al., "MCNPX 2.7. 0 Extensions," *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-11-02295*, vol. 4, 2011.
- [۷] M. del Rosario Martinez-Blanco, G. Ornelas-Vargas, C. L. Castañeda-Miranda, L. O. Solís-Sánchez, R. Castañeda-Miranada, H. R. Vega-Carrillo, et al., "A neutron spectrum unfolding code based on generalized regression artificial neural networks," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 117, pp. 8-14, 2016.
- [۸] S. A. Hosseini, "Neutron spectrum unfolding using artificial neural network and modified least square method," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 126, pp. 75-84, 2016.

- [۹] S. C. Miller, "AFITBUNKI: a modified iterative code to unfold neutron spectra from Bonner sphere detector data," AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH SCHOOL OF ENGINEERING 1993.
- [۱۰] N. Ghal-Eh, M. Kalaei, A. Mohammadi, and H. Vega-Carrillo, "Replacement of Bonner spheres with polyethylene cylinders for the unfolding of an  $^{241}\text{Am}$ -Be neutron energy spectrum," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 128, pp. 292-296, 2017.