

بهینه‌سازی طیف‌نگار نوترون چند-کندکننده‌ای

به منظور اندازه‌گیری طیف نوترون فوق حرارتی در BNCT

زینب کاظمی^۱، فائزه رحمانی^{۲*}، نیما قلعه^۳

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

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، ۱۵۸۷۵-۴۴۱۶، تهران - ایران

۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، 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 فوق حرارتی در طیف انرژی و کوچک-بودن بازه انرژی مناسب برای درمان (بازه انرژی ۴ eV تا ۱۰ 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، LiI(EU)

Optimization Multi-Moderator Neutron Spectrometer in order to measure Epithermal neutron spectrum in BNCT

Kazemi, Zeinab¹; Rahmani, Faezeh²; Ghal-Eh, Nima³

1. physics department, Khaje Nasir Toosi university of Technology, Tehran, Iran.
2. physics department, Khaje Nasir Toosi university of Technology, Tehran, Iran.
3. physics department, Ferdowsi Mashhad university, Mashhad, Iran.

Abstract:

One of the occasions to commission a system based on absorbing neutron in Boron (BNCT), is measuring neutron energy spectrum exactly in therapeutic neutron energy area. Many instruments and different online or passive ways during the treatment or before it, for measuring the neutron energy spectrum have been used. The measuring difference of the therapeutic neutron spectrum and necessity of designing special system for this method is predominating epithermal neutrons in neutron energy spectrum in BNCT, and smallness of the therapeutic energy interval. Therefore there is need for measuring instruments which can exposure alternations of neutron energy spectrum in this energy interval. Now the Tehran research reactor (TRR) is the only neutron source which is available for BNCT in Iran. In this article, feasibility of designing and optimization of multi-moderator neutron cylindrical spectrum based on LiI(Eu) thermal neutron detector according to thermal beam witch is gained from TRR beam shaper for BNCT is done. In order to unfolding the spectrum, AFITBUNKI code has been used.

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

۱. مقدمه

درمان توسط گیراندازی نوترون به وسیله بور یا BNCT^۱ 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 به منظور نابودی گزینشی سلول‌های سرطانی است [۱]. در این روش درمان، ابتدا بور (¹⁰B) به صورت یک ترکیب خاص زیستی که به وسیله 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 ¹⁰B با نوترون‌های حرارتی، ⁷Li و ذره‌ی آلفا تولید می‌شود که به دلیل برد کم و انرژی زیاد در محل اندرکنش، موجب نابودی سلول‌های تومور می‌شوند [۲].

یکی از الزامات راه اندازی درمان بر پایه‌ی BNCT، اندازه‌گیری دقیق باریکه درمانی شامل نوترون و نیز اندازه‌گیری آلودگی گاما در طیف درمانی است. در حال حاضر راکتور تحقیقاتی تهران^۲ تنها منبع تأمین کننده‌ی طیف درمانی مورد استفاده در BNCT است [۳] که طبق استانداردهای تعیین شده از سوی آژانس بین المللی انرژی اتمی مورد تایید است [۴].

روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری و تعیین طیف نوترون درمانی وجود دارد. رحمانی و همکاران در سال ۲۰۲۰، یک طراحی اولیه از طیف‌نگار چندکننده‌ای برای اندازه‌گیری در میدان نوترونی BNCT ارائه کرده‌اند [۵]. هرچند نتایج شبیه‌سازی با کد مونت کارلو MCNP، از کیفیت قابل قبولی برخوردار بود، لیکن به منظور استفاده از این طیف‌نگار در

^۱ Boron Neutron Capture Therapy

^۲ Tehran Research Reactor

اندازه‌گیری‌های BNCT ضروری بود تا دقت آن حتی الامکان افزایش یابد. بنابراین در این مقاله اندازه‌گیری طیف نوترونی درمان، مبتنی بر روش‌های بازیابی در ساز و کار طیف نگاری چند کندکننده‌ای نوترون مناسب برای BNCT مورد بررسی قرار گرفته است و ساز و کار جدیدی در ادامه پژوهش مذکور، ارائه گشته است.

غالب بودن نوترون فوق حرارتی در طیف درمان مورد استفاده در BNCT و کوچک بودن بازه‌ی انرژی این نوترون‌ها (بازه انرژی ۴ eV تا ۱۰ keV)، پژوهشگر را بر آن داشت تا از ساز و کار طیف‌نگارهای چند کندکننده‌ای و ساز و کارهای مشابه کره‌های بانر بهره‌گیرد. کره‌ی بانر^۳ یک طیف نگار نوترون مبتنی بر کندسازی و گیراندازی نوترون در آشکارسازی نوترون حرارتی است [۶]. روش کره‌های بانر شامل مجموعه‌ای از کره‌ها با ضخامت‌های مختلف کندکننده نوترونی برای کندسازی نوترون است که می‌توانند برای محدوده‌ی وسیعی از طیف‌نگاری انرژی نوترون از حرارتی تا چند GeV استفاده شوند. این آشکارساز از یک کره‌ی پلی‌اتیلنی که در مرکز آن یک آشکارساز نوترون حرارتی ($\text{LiI}(\text{Eu})$) یا آشکارساز BF_3 یا ^3He) قرار دارد، تشکیل شده است [۷].

۲. روش کار

ساز و کار طیف‌نگاری چند کندکننده‌ای به این صورت است که در مرکز چیدمان از یک آشکارساز نوترون حرارتی استفاده می‌شود [۸]. برای آن که طیف نوترونی درمان که شار غالب آن در محدوده انرژی فوق حرارتی قرار دارد، مناسب آشکارساز شدن توسط آشکارساز مذکور شود، از لایه‌های کندکننده مناسب در مقابل آشکارساز استفاده می‌شود. بنابراین در این پژوهش از ساز و کار پیشنهادی که به صورت طرح‌واره در شکل ۱ مشخص شده است، بهره برده شد.



شکل ۱. تصویر ساز و کار پیشنهادی این پژوهش. (۱) آشکارساز $\text{LiI}(\text{Eu})$ در مرکز سامانه (۲) لایه‌های کندکننده پلی‌اتیلنی قابل تغییر.

۱.۲. تهیه ماتریس پاسخ آشکارساز

در این پژوهش به دلیل بازدهی بالای کریستال $\text{LiI}(\text{Eu})$ در آشکارسازی نوترون‌های حرارتی و امکان ساخت آن در ابعاد کوچک، از این آشکارساز در مرکز ساز و کار پیشنهادی بهره برده شده است و در مقابل آن لایه‌های کندکننده پلی‌اتیلنی به علت سادگی و کندسازی مناسب نوترونی، به‌عنوان کندکننده قرار گرفته اند [۹].

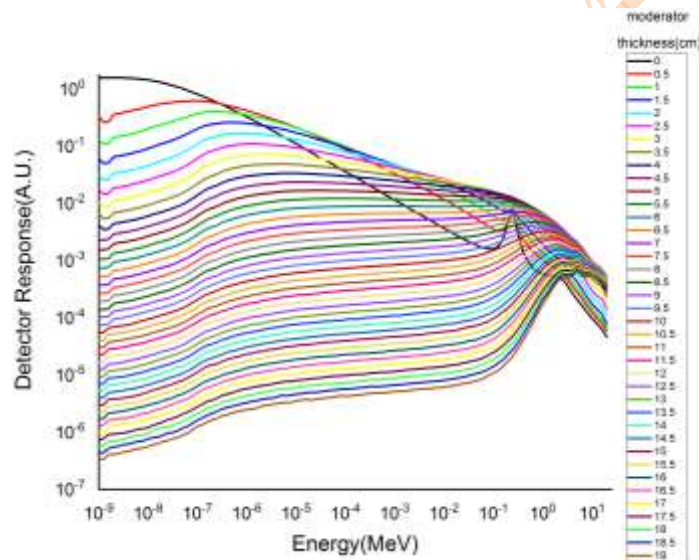
ابتدا حداقل ضخامت مورد نیاز برای کندسازی پر انرژی‌ترین نوترون طیف درمان توسط شبیه‌سازی با کد مونت کارلو ای MCNP برای آشکارسازی توسط $\text{LiI}(\text{Eu})$ باید مشخص شود که در جدول ۱ محدوده این ضخامت مقابل آشکارساز قرار داده شده و حداقل ضخامت کندکننده مورد استفاده در مقابل آشکارساز معین شد که برابر با 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 ساز و کار جمع آوری نمود [۱۰].

^۳ Bonner sphere

جدول ۱. جدول شمارش ثبت شده از آشکارساز در پشت کندکننده‌های پلی اتیلنی در ضخامت‌های مختلف.

ضخامت (cm)	شار نوترونی (n/cm ² -s-MeV)	ضخامت (cm)	شار نوترونی (n/cm ² -s-MeV)
۶/۵	$3/89 \times 10^{-3}$	۱۰	$4/73 \times 10^{-3}$
۷	$4/17 \times 10^{-3}$	۱۰/۵	$4/78 \times 10^{-3}$
۷/۵	$4/47 \times 10^{-3}$	۱۱	$3/98 \times 10^{-3}$
۸	$4/27 \times 10^{-3}$	۱۱/۵	$4/14 \times 10^{-3}$
۸/۵	$4/51 \times 10^{-3}$	۱۲	$4/57 \times 10^{-3}$
۹	$5/12 \times 10^{-3}$	۱۲/۵	$4/09 \times 10^{-3}$
۹/۵	$4/09 \times 10^{-3}$	۱۳	$4/18 \times 10^{-3}$

ضمن ارائه این ساز و کار نیاز بود تا تمامی شبیه‌سازی‌ها با کد مونت کارلویی MCNP انجام شود [۱۱] 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 ساز و کار این پژوهش به دست آید که به این منظور بیش از ۴۰۰۰ برنامه شبیه‌سازی نوشته و اجرا شد [۱۲]. شکل ۲ نمودار رسم شده پاسخ آشکارساز است که آرایه آن در ۹۴ گروه انرژی و ۳۹ ضخامت با میزان خطای قابل قبول کمتر از ۱۰٪ است و یک آرایه 94×39 است که برای بازیابی طیف نوترونی استفاده می‌شود.



شکل ۲. نمودار شمارش ثبت شده در آشکارساز پشت ضخامت‌های مختلف کندکننده در مقابل تک انرژی‌های مختلف نوترونی.

۲.۲. فرایند بازیابی طیف

بسته به روش بازیابی طیف، آشکارساز نوترون پاسخ خودش را برای بازه انرژی نوترون‌ها دارد. (بسته به ضخامت، ماده و چگالی) به طور کلی اگر پاسخ آشکارساز بر اساس هر انرژی مشخص شود، پاسخ آن به هر طیف انرژی می‌تواند مشخص شود. از سوی دیگر با فرض این که در برخی موارد آشکارساز به طیف وسیعی از انرژی حساس باشد، طیف نوترونی می‌تواند از طریق یک عملیات ریاضیاتی به نام بازیابی طیف، پیش بینی شود [۱۳].

هر لایه‌ی پلی اتیلنی (با احتساب آشکارساز عریان) در آشکارسازهایی مشابه این ساز و کار یک شمارش به دست می‌دهد که همان C در رابطه‌ی زیر است که وابسته به طیف نوترونی $\Phi(E)$ و ماتریس پاسخ R است. با استفاده از معادله انتگرال فردهولم نوع اول همانطور که در روابط ۱ و ۲ مشاهده می‌شود [۱۴].

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

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

می‌تواند به شکل ماتریسی رابطه ۳ ساده سازی شود.

$$M = R\Phi \quad (2)$$

از آن جایی که پاسخ معادله‌ی ۱ برای به‌دست آوردن $\Phi(E)$ به سادگی و مستقیم انجام نمی‌شود، می‌توان معادله‌ی ۳ را به جای آن حل نمود که عموماً توسط کدهای آنالیزگر عددی مانند کد بازیابی طیف معروف AFITBUNKI و یا کد بازیابی NSDUAZ انجام می‌شود.

اکنون برای دستیابی به نتیجه هر چه بهتر باید این دو کد به صورت عملیاتی با یکدیگر مقایسه شوند. بنابراین ابتدای امر به توضیح مختصری از این دو کد پرداخته و سپس مقایسه نتایج دو کد انجام می‌شود.

۱.۲.۲. کد بازیابی AFITBUNKI

این برنامه، یک کد معروف و کاربردی برای بازیابی طیف‌ها به زبان برنامه نویسی FORTRAN است. کد بازیابی طیف AFITBUNKI که ارتقاء یافته‌ی کد BUNKI محسوب می‌شود و در این پژوهش برای بازیابی طیف نوترونی استفاده شده است [۱۵]. 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^۴ نوشته شده است که این موضوع هرگونه تغییر را با مشکل مواجه می‌سازد. بر این اساس تصمیم گرفته شد که کد به یک روال و ۲۲ زیرروال^۵ تبدیل شده و برای آن یک پنجره مکالمه نیز طراحی گردد. 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 بصورت فایل متنی و به عنوان یکی از اطلاعات خروجی برنامه در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.

۲.۲.۲. کد بازیابی NSDUAZ

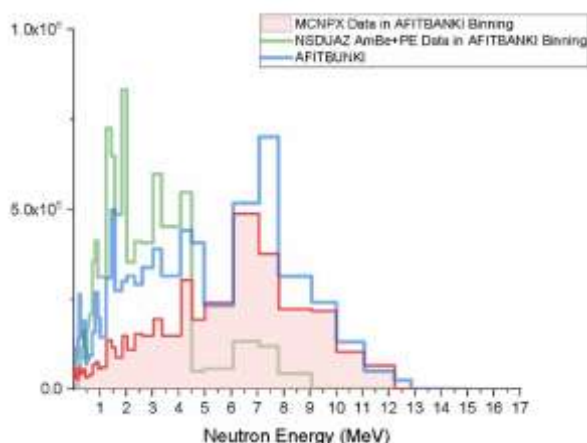
برنامه NSDUAZ یک برنامه‌ی کاربر پسند برای بازیابی طیف نوترونی کره بانر متشکل از سوسوزن ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ است که تحت نرم افزار lab view به صورت visual در آمده است و تهیه و تنظیم آن تلاش ارزشمند آقای کاریللو و همکاران در سال ۲۰۱۲ است. بازیابی طیف نوترونی با استفاده از روش تکرار معکوس‌پذیر توسط الگوریتم SPUNIT انجام شده و برای شروع روند تکرار معکوس‌پذیر، طیف اولیه توسط کتابخانه طیف اولیه به‌دست آمده است. اجرای NSDUAZ با اندازه‌گیری چشمه‌های ${}^{252}\text{Cf}$ ، ${}^{252}\text{Cf}/\text{D}_2\text{O}$ و ${}^{241}\text{Am}-\text{Be}$ صورت گرفته است [۱۶].

پس از سنجش صحت عملکرد کد NSDUAZ (نمونه‌های استفاده شده در مقاله‌ی معرفی این کد) بازیابی طیف چشمه‌های نوترونی ${}^{241}\text{Am}-\text{Be}$ و ${}^{252}\text{Cf}$ کند نشده و ${}^{252}\text{Cf}$ کند شده با D_2O توسط دو کد انجام شد و نتایج و کاربرد دو کد در آنها بررسی شد و نهایتاً کد AFITBUNKI از چند جهت برگزیده شد: اول آن‌که طبق مقایسه‌ها در شکل... عملکرد این کد بسیار بهتر بود و دوم آن‌که متن‌باز بودن این کد محاسباتی امکان بهینه‌سازی و شخصی‌سازی طیف‌نگاری را به پژوهشگر می‌دهد.

^۴ routine

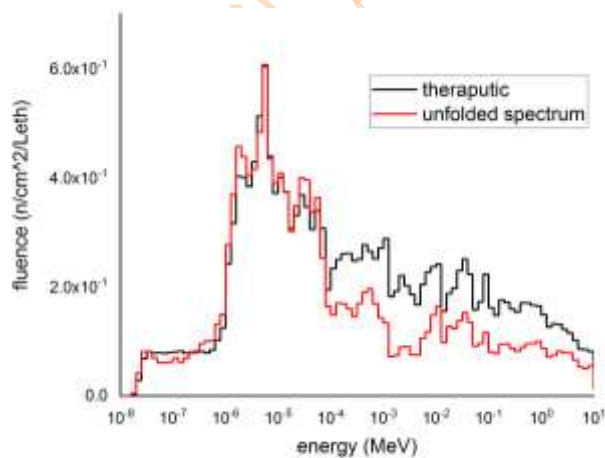
^۵ subroutine

نمودار مقایسه‌ی بازایی این دو کد با طیف معیار چشمه نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ که با شبیه‌سازی MCNP هم بازبندی با نتایج AFITBUNKI و NSDUAZ شده است، در شکل ۳ قابل مشاهده است.



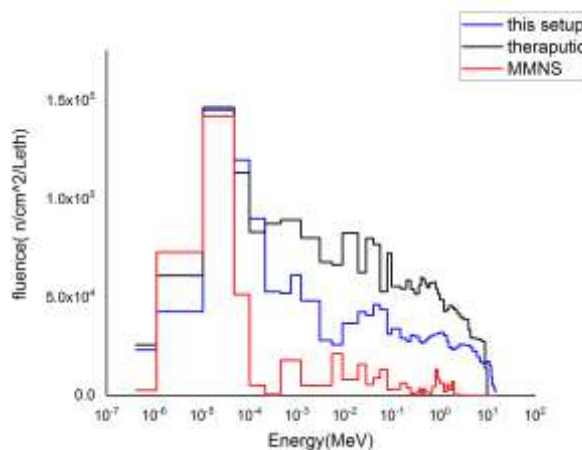
شکل ۳. مقایسه NSDUAZ و AFITBUNKI و MCNP. آبی AFITBUNKI و سبز NSDUAZ و قرمز MCNP است.

پس از انتخاب کد AFITBUNKI برای بازایی طیف درمان، عملیات بازایی آغاز گشت که پس از دریافت نتایج اولیه بازایی، 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 برآزش تغییر در متغیرهای مذکور، نهایتاً بازایی با مشخصات بهینه انجام گشته و در شکل ۴ با طیف درمان مقایسه شده است.



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

اما نکته حائز اهمیت این است که از آنجایی که شروع این پژوهش در ادامه پژوهش رحمانی و همکاران در راستای پیشنهاد و بهینه‌سازی ساختار $^{6}\text{MMNS}$ بود، باید نمودار نتایج طیف‌نگاری این ساز و کار با نتایج پژوهش پیشین خود بررسی می‌شد که در شکل ۵ این مقایسه انجام شد و نهایتاً موفقیت و کارآمدی این ساز و کار، از سنجش ظاهری نمودار آشکار گشت.



شکل ۵. نمودار مقایسه بین طیف حاصل از ساختار طیف‌نگاری MMNS (قرمز) طیف درمان (مشکی) و طیف حاصل از ساز و کار پیشنهادی این پژوهش در طیف بندی ساز و کار پژوهش پیشین MMNS

۳. نتیجه‌گیری

ساز و کار طیف‌نگار نوترونی چندکندکننده پیشنهادی در این پژوهش در انتها توانست هدف خود را که طیف‌نگاری هر چه دقیق‌تر طیف نوترونی خروجی از راکتور تحقیقاتی تهران مناسب برای درمان در روش BNCT بود، محقق سازد و نسبت به پژوهش پیشین خود یعنی ساختار MMNS موفقیت بیشتری را با استفاده از مواد و چینش ساده‌تر کسب کند. در نهایت این ساز و کار 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.

۴. سپاس و قدردانی

با سپاس و قدردانی فراوان از استاد عزیز سرکار خانم دکتر رحمانی بابت راهنمایی‌ها و صبوری‌هایشان در تک تک مراحل پژوهش و همچنین سپاس از جناب آقای دکتر قلعه بابت رهنمودهای ارزشمندشان.

۵. مراجع

- [۱] I. Kato, K. Ono, Y. Sakurai, M. Ohmae, A. Maruhashi, Y. Imahori, *et al.*, "Effectiveness of BNCT for recurrent head and neck malignancies," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 61, pp. 1069-1073, 2004
- [۲] 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
- [۳] 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
- [۴] "R. F. during Storage," *IAEA TECDOC SERIES*
- [۵] 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

- N. Ghal-Eh, M. Kalaei, A. Mohammadi, and H. Vega-Carrillo, "Replacement of Bonner spheres with polyethylene cylinders for the unfolding of an ^{241}Am -Be neutron energy spectrum," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 128, pp. 292-296, 2017 [٦]
- D. Thomas and A. Alevra, "Bonner sphere spectrometers—a critical review," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 476, pp. 12-20, 2002 [٧]
- Y. Uwamino, T. Nakamura, and A. Hara, "Two types of multi-moderator neutron spectrometers: Gamma-ray insensitive type and high-efficiency type," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 239, pp. 299-309, 1985 [٨]
- R. Murray, "Use of Li6I (Eu) as a scintillation detector and spectrometer for fast neutrons," *Nuclear Instruments*, vol. 2, pp. 237-248, 1958 [٩]
- S. Tamaki, F. Sato, and I. Murata, "Study on a liquid-moderator-based neutron spectrometer for BNCT—Development and experimental test of the prototype spectrometer," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 870, pp. 90-96, 2017 [١٠]
- 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*, vol. 4, 2011, LA-UR-11-02295 [١١]
- L. S. Waters, "MCNPX user's manual," *Los Alamos National Laboratory*, vol. 124, 2002 [١٢]
- M. del Rosario Martínez-Blanco, G. Ornelas-Vargas, C. L. Castañeda-Miranda, L. O. Solís-Sánchez, R. Castañeda-Miranda, 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 [١٣]
- A. Reyes H, J. Ortiz R, A. Reyes A, R. Castaneda M, L. Solis S, and H. Vega C, "Test and validation of the iterative code for the neutrons spectrometry and dosimetry: NSDUAZ," 2014 [١٤]
- 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 [١٥]
- H. Vega-Carrillo, J. Ortiz-Rodríguez, and M. Martínez-Blanco, "NSDUAZ unfolding package for neutron spectrometry and dosimetry with Bonner spheres," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 71, pp. 87-91, 2012 [١٦]