

بهینه سازی شار نوترون های پر سرعت و حرارتی حاصل از چشمه های فوتو- نوترون به منظور استفاده در BNCT

مونا، ذوالفقاری*؛ محمود، صداقتی زاده

تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک

چکیده:

مطالعات اخیر در امکان استفاده ی بالینی از شتاب دهنده های خطی الکترونی (لیناک) با انرژی بالا، متمرکز شده است، که می تواند به عنوان چشمه ی الکترون-فوتو-نوترون مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله با استفاده از کد شبیه سازی MCNPX ابتدا بهینه سازی چشمه ی فوتو-نوترون، سپس طراحی و شبیه سازی مجموعه ی شکل دهنده ی طیف (BSA) مورد استفاده در BNCT، صورت گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، چشمه ای متشکل از سه لایه ی سرب، اورانیوم طبیعی و Be^{2+} به عنوان چشمه ی فوتو-نوترون معرفی شد و شار نوترون های حرارتی بهینه شده از مرتبه ی $n/cm^2.s$ 10^8 به دست آمد، که می تواند برای درمان ملانومای پوست مناسب باشد.

کلید واژه: لیناک، MCNPX، BSA، BNCT

مقدمه:

در سال های اخیر درمان به روش گیراندازی نوترون توسط بور (BNCT) مورد توجه قرار گرفته است. اولین آزمایش بالینی BNCT در ارتباط با امکان درمان ملانومای پوست، در آرژانتین در ۹ اکتبر ۲۰۰۳ توسط کمیته ی ملی انرژی اتمی (CNEA) و مرکز پزشکی هسته ای مؤسسه ی Roffo انجام شد و حدود ۳۰ نفر از بیماران مبتلا به ملانومای پوستی در آرژانتین درمان شدند [۱، ۲]. همچنین، گزارش های اخیر، در مجموعه مقالات سیزدهمین کنفرانس بین المللی NCT، امکان استفاده از BNCT علاوه بر درمان تومورهای بدخیم مغز، درمان سرطان هایی مانند ریه، مزوتلیوما و تومورهای نخاعی، ملانوما، کبد، تیروئید و سرطان سینه مطرح شد [۳]. BNCT بر پایه ی گیراندازی نوترون و جزو واکنش های شکافت هسته ای است. زمانی که ^{10}B غیر اکتیو، که حدود ۲۰٪ از بور طبیعی را تشکیل می دهد، تحت تابش نوترون با انرژی مناسب ($0.025 eV$) قرار می گیرد، ^{11}B برانگیخته تولید می شود. نیمه عمر این ماده ی اکتیو حدوداً $S^{-1} 10^{12}$ بوده و به ذرات آلفا و لیتیوم با انرژی بالا تبدیل می شود. این تبدیل در ۹۴٪ موارد ذرات آلفا (4He) و لیتیوم (7Li) با انرژی های $1.47 MeV$ و $0.84 MeV$ به همراه گامای $0.48 MeV$ بوده و در ۶٪ موارد ذرات

آلفا و لیتیموم با انرژی های 1.78 MeV و 1.01 MeV تولید می شود. موفقیت درمان به روش BNCT به تحویل مقادیر کافی ^{10}B به تومور و مقدار کم آن در بافت سالم اطراف، وابسته است. تحمل بافت سالم، توسط واکنشهای جذب هسته ای که توسط هیدروژن و نیتروژن بافت طبیعی رخ می دهد، تعیین می شود [۴].

روش کار:

با توجه به هزینه های بالای چشمه های نوترون طبیعی و راکتورها، در این مقاله از شتاب دهنده ی خطی الکترونی لیناک مدل 2300 C/D Varian برای تولید الکترون های 20 MeV و از تنگستن به عنوان چشمه (e, γ) به صورت استوانه ای با شعاع 5 cm و ضخامت 0.26 cm استفاده شد [۵]، و برای چشمه ی فوتو-نوترون، چهار ماده ی سرب، اورانیوم طبیعی، D_2O و Be_2 به دلیل داشتن سطح مقطع برهمکنش (γ, n) مناسب انتخاب شدند. با استفاده از کد محاسباتی MCNPX، ابتدا شبیه سازی چشمه های فوتو-نوترونی صورت گرفت. در این شبیه سازی ها، تنگستن در فاصله ی 50 cm از شتابدهنده ی الکترونی لیناک قرار داده شد و چشمه های فوتو-نوترونی به صورت استوانه هایی هر یک با شعاع $6-12 \text{ cm}$ و ضخامت های مختلف $3-8 \text{ cm}$ در مقابل تنگستن قرار گرفتند. در نتیجه با قرار دادن لایه هایی با ضخامت های متفاوت از چهار ماده ی انتخاب شده و اجرای برنامه های گوناگون، شار بهینه سازی شده ی نوترون های پر سرعت امکان پذیر گردید. همچنین، با بررسی نمودار سطح مقطع انواع برهمکنش های نوترون با ماده، با استفاده از کد MCNP4C مانند برهمکنش های الاستیک، غیر الاستیک و گیراندازی نوترون و با توجه به رابطه ی شماره (۱)، مواد مناسب از نظر میزان کند کنندگی و حفظ شار نوترون های حرارتی از بین مواد گوناگون برای طراحی BSA انتخاب شدند. این مواد به ترتیب میزان کند کنندگی و حفظ شار نوترون های حرارتی، عبارتند از: BeO ، Bed_2 ، Plexyglass، Borated paraffin، کربن، (PE) Polyethylene، تفلون (CF_2) ، آب سنگین (D_2O) .

$$E'_n = E_n (A^2 + 2A \cos \theta + 1) / (A + 1)^2 \quad \text{رابطه ی شماره (۱)}$$

در این رابطه E_n و E'_n به ترتیب انرژی نوترون فرودی و پراکنده شده، A عدد جرمی ماده ی پراکنده شده و θ زاویه ی بین نوترون فرودی و نوترون پراکنده شده می باشد.

نتایج:

به دنبال شبیه سازی های انجام شده مربوط به طراحی چشمه، شار بهینه سازی شده ی نوترون های پرسرعت مربوط به سه چشمه تقریباً نزدیک به یکدیگر به دست آمد. ابعاد این سه چشمه در جداول زیر آورده شده است.

جدول شماره ۱: شعاع و ضخامت چشمه ی حاوی W ، Bed_2 ، Pb

*	W	+ Bed_2	+ Pb
Radius(cm)	5	12	10
Thickness(cm)	0.26	9	7

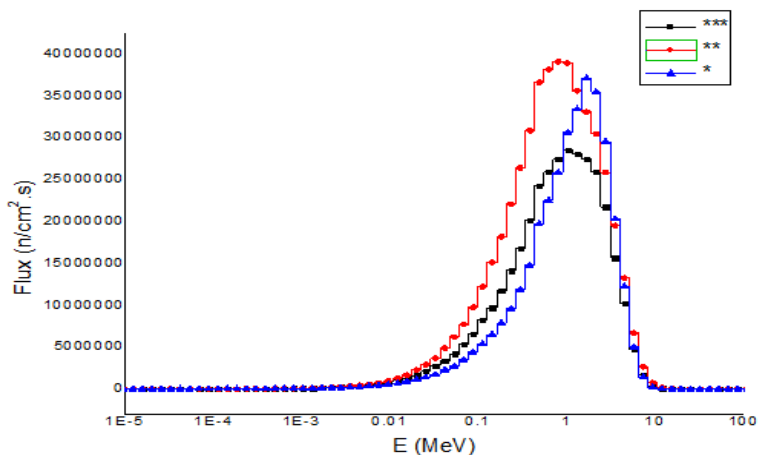
جدول شماره ۲: شعاع و ضخامت چشمه ی حاوی W ، Pb ، U ، Bed_2

**	W	+ Pb	+ U	+ Bed_2
Radius(cm)	5	10	10	10
Thickness(cm)	0.26	4	3	2

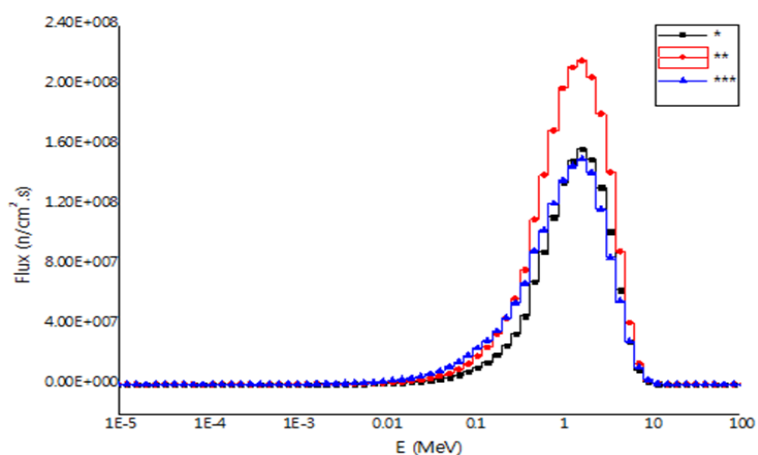
جدول شماره ۳: شعاع و ضخامت چشمه ی حاوی W ، U ، Pb ، Bed_2 ، Bed_1

***	W	+ Bed_2	+ Pb	+ U	+ Bed_1
Radius(cm)	5	10	10	10	10
Thickness(cm)	0.26	2	6	2	2

با توجه به نتایج حاصله از این سه چشمه، که در شکل های (۱) و (۲)، مشاهده می کنید، شار نوترون حرارتی مربوط به جدول شماره (۲) در قسمت جلو و پشت چشمه از دو چشمه ی دیگر بالاتر بوده، همچنین ماکزیمم شار در انرژی کمتری نسبت به دو چشمه ی دیگر قرار دارد. در نتیجه این چشمه نسبت به چشمه های دیگر برای BNCT مناسب تر است.

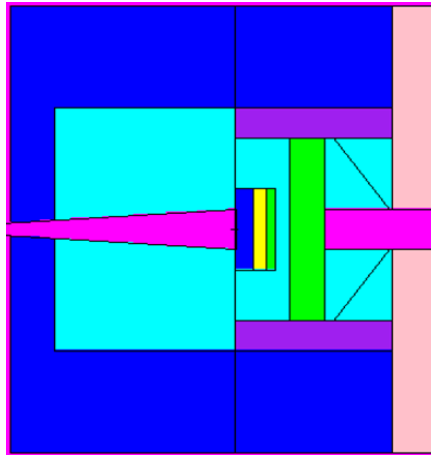


شکل شماره (۱): مقایسه ی شار بهینه شده مربوط به سه چشمه بر حسب انرژی در مقابل چشمه



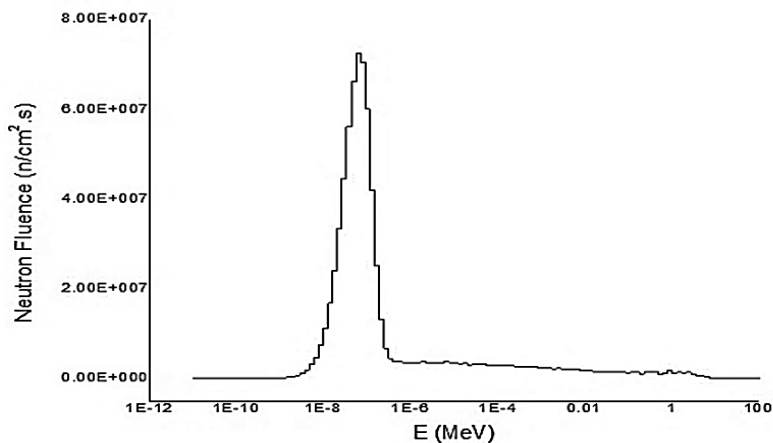
شکل شماره (۲): مقایسه ی شار بهینه شده مربوط به سه چشمه بر حسب انرژی در پشت چشمه

در نتیجه، نمودار "دو ستاره" به عنوان بهترین چشمه ی طراحی شده انتخاب شد. بنابراین، مجموع شار در مقابل چشمه از مرتبه ی $10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ و در پشت چشمه از مرتبه ی $10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ به دست آمد. همچنین، در طراحی BSA، BeO و Bed₂ به عنوان مناسب ترین کاندید و بازتابنده، Plexy glass به عنوان بازتابنده و موازی ساز در اطراف دهانه ی خروجی BSA و سرب به عنوان بازتابنده، سپر نوترون و فیلتر گاما و Borated paraffin به عنوان سپر نوترون در مقابل BSA در نظر گرفته شد. بنابراین، شار نوترون های حرارتی بهینه سازی شده با استفاده از BSA مکعبی شکل با ابعاد $110 \times 110 \times 95 \text{ cm}^3$ که در شکل شماره (۳) مشاهده می کنید، به دست آمد.



شکل شماره (۳): BSA طراحی شده

طیف نوترون حرارتی به دست آمده از طراحی BSA نیز در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل شماره (۴): نمودار شار نوترون در طول مسیر در واحد حجم

همانطور که مشاهده می کنیم، شار نوترون حاصل از شبیه سازی در بازه ی انرژی نوترون های حرارتی (10^{-7} - 10^{-8} MeV) و پیک شار در انرژی $5/5 \times 10^{-8}$ MeV قرار دارد.

بحث و نتیجه گیری:

در این مقاله با استفاده از شتابدهنده ی خطی الکترونی لیناک به عنوان چشمه ی تولید کننده ی نوترون طی فرایند الکترون- فوتو- نوترون، و استفاده از موادی که سطح مقطع برهمکنش فوتو- نوترون مناسبی دارند،

یک شار تقریباً خالص از نوترون های پر سرعت به دست آمد. همچنین، نرخ شار نوترون های حرارتی از مرتبه ی $5/77 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ با حداقل نوترون های پر سرعت و گامای زمینه به دست آمد. عموماً، شار نوترون از مرتبه ی $10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ برای BNCT مورد استفاده قرار می گیرد. اما شار نوترونی در بازه ی $10^8 - 10^9$ [۷،۶] برای BNCT مورد استفاده قرار گرفته، با این تفاوت که در شار نوع اول مدت زمان درمان کوتاه تر از شار نوع دوم بوده ولی از نظر حفظ سلامت بافت سالم، شار نوع دوم بیشتر استفاده شده و در درمان تومورهای سطحی مانند سرطان های پوست همیشه مورد توجه بوده است [۸]. بنابراین، شار نوترون حرارتی حاصل از این شبیه سازی انجام شده می تواند برای درمان سرطان های سطحی مانند ملانوما ی پوست به روش BNCT کاملاً مفید و مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع:

- [۱] Comision Nacional de Energia Atomica. "The BNCT Project at the National Atomic Energy Commission (CNEA)".
- [۲] Gonzalez SJ, Bonomi MR, Santa Cruz GA, et al. First BNCT treatment of a skin melanoma in Argentina: dosimetric analysis and clinical outcome. *Appl Radiat Isot*; ۶۱: ۱۱۰۱-۱۱۰۵, (۲۰۰۴).
- [۳] Altieri, Saverio; Bortolussi, Silva; Barth, Rolf F.; Roveda, Laura; Zonta, Aris. "Thirteenth International Congress on Neutron Capture Therapy". *Applied Radiation and Isotopes* ۶۷ (۷-۸): S۱-۲, (۲۰۰۹).
- [۴] Barth, R. F.; Coderre, JA; Vicente, MG; Blue, TE. "Boron Neutron Capture Therapy of Cancer: Current Status and Future Prospects". *Clinical Cancer Research* ۱۱(۱۱): ۳۹۸۷-۴۰۰۲, (۲۰۰۵).
- [۵] Ali Pazirandeh, Ali Torkamani, Ali Taheri, Design and simulation of a neutron source based on an electron linear accelerator for BNCT of skin melanoma, *Applied Radiation and Isotopes* ۶۹, ۷۴۹-۷۵۵, (۲۰۱۱).
- [۶] TORII, Y., et al., BNCT Irradiation Facility at JRR-۴, paper presented to the ASRR-۶, Mito, Japan, ۲۹ - ۳۱ March, (۱۹۹۹).
- [۷] YOKOO, K., et al., The Installation of a New Medical Irradiation Facility at JRR-۴, paper presented to the Workshop on the Utilization of Research Reactor, Yogyakarta, Indonesia, ۸ - ۱۱ February (۱۹۹۹).
- [۸] W.S.Kiger III, S.Sakamoto, O.K.Harling, *Nucl.Sci.Eng.* ۱۳۱(۱), (۱۹۹۹).