

**واپچش طیف گاماها و محاسبه نسبت نوترون به گامای  $4.438 \text{ MeV}$  چشمه  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$** علی اصغر مولوی\*؛ رحیم کوهی فائق<sup>۲</sup>۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت معلم سبزوار *E-mail: amowlavi@sttu.ac.ir*

۲- گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

## خلاصه

طیف گاماهاهی چشمه  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  با فعالیت  $10^{11} \times 1/9 \text{ Bq}$  و طیف زمینه را با یک آشکارساز سوسوزن  $\text{NaI(Tl)}$  به ابعاد  $2'' \times 2''$  به مدت ۱۰ دقیقه اندازه گرفته‌ایم. ابتدا برای آنالیز طیف ارتفاع تپ و کسب اطلاع اولیه از طیف گاماهاهی چشمه، طیف ارتفاع تپ تجربی را به کمک کد  $\text{MCNP}$  واپچش شده است. سپس تابش زمینه ناشی از برهم کنشهای نوترون با مواد اطراف و عناصر خود آشکارساز به کمک کد  $\text{MCNP4c}$  محاسبه شده است. با کم نمودن طیفهای زمینه طیف تجربی، طیف خالص گاماهاهی چشمه بدست آمد. با در نظر گرفتن یک چشمه گامای  $4.438 \text{ MeV}$  مقدار  $S_p$  و سپس نسبت نوترون به گامای  $4.438 \text{ MeV}$  چشمه،  $R = S_p/S_n = 0.596$  بدست آمد که در توافق بسیار خوبی با نتایج دیگران دارد.

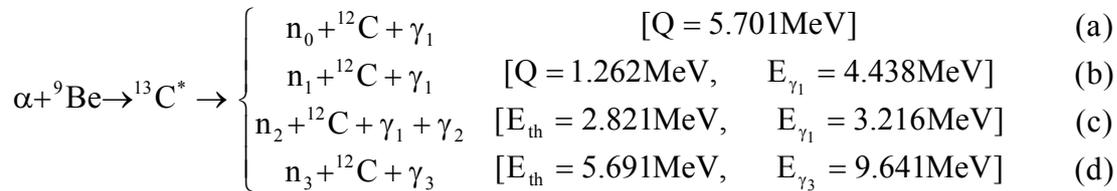
واژه‌های کلیدی: چشمه  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ ؛ نسبت نوترون به گاما؛ طیف زمینه مستقیم، کد محاسباتی  $\text{MCNP}$ 

## ۱. مقدمه

همه چشمه‌های  $(\alpha, n)$  نوترون از یک گسیلندهی آلفا و یک هدف با عدد اتمی پایین ساخته شده‌اند. مهمترین مادهی هدف که بیشترین بازده تولید نوترون را دارد،  $^9\text{Be}$  است.  $\text{Be}$  می‌تواند با عنصر آکتانید گسیلندهی آلفا (M)، آلیاژ پایدار  $\text{MBe}_{13}$  را بوجود آورد [۱]. چشمه‌های  $(\alpha, n)$  نوترون به علت ارزان بودن، کوچک و قابل حمل بودن، و شار نوترونی تقریباً ثابت کاربردهای زیادی دارند که می‌توان به کاربرد در آنالیز مواد به روش فعالسازی نوترونی [۲،۳]، استفاده به عنوان چشمه مدرج کننده [۴] و کاربردهای صنعتی [۵،۶] اشاره کرد. از این میان چشمه  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  با نیم عمر  $432/7$  سال در بسیاری از آزمایشگاهها به عنوان چشمه‌ی مدرج کننده نوترون به کار می‌رود [۷].



این چشمه نه تنها نوترون گسیل می‌کند که چشمه‌ی گاماها‌ی  $4/438\text{MeV}$  نیز هست و از طریق واکنش زیر نوترون و گاما تولید می‌کند:



کانالهای دیگری هم برای این واکنش وجود دارد که احتمال آنها بسیار ناچیز است. واکنش  ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$  در چشمه  ${}^{241}\text{Am}-{}^9\text{Be}$  اغلب به حالت پایه یا حالت اول برانگیخته‌ی  ${}^{12}\text{C}$  یعنی کانالهای a و b منجر می‌گردد [۷، ۴]. این چشمه به ازای هر  $10^6$  ذره آلفا  $70$  نوترون گسیل می‌کند [۳]. نسبت گامای  $4/438\text{MeV}$  به نوترون،  $R=S_\gamma/S_n$ ، کمیت بسیار مهمی برای چشمه‌های  $(\alpha, n)$  است، به خصوص در دزیمتری و طیف سنجی میدانهای آمیخته‌ی نوترون-گاما [۹، ۸].

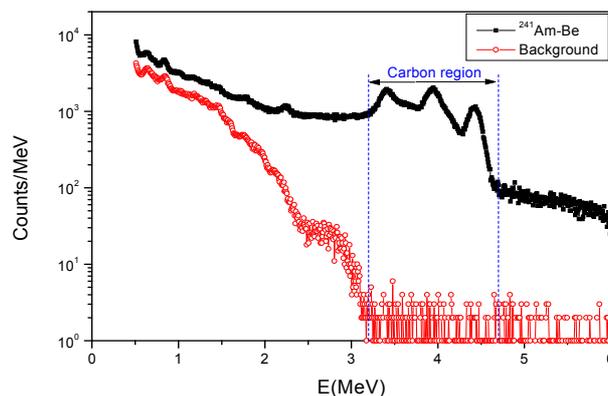
## ۲ طیف گاماها‌ی چشمه ${}^{241}\text{Am}-{}^9\text{Be}$

از دیر باز چشمه‌های  $(\alpha, n)$  نظیر  ${}^{241}\text{Am}-{}^9\text{Be}$  به عنوان چشمه‌های نوترون شناخته شده‌اند و طیف سنجی نوترون آنها مطالعات زیادی را به خود اختصاص داده است [۱۰، ۱۱]، ولی مطالعات طیف گامای آنها اندک بوده است. همان طور که قبلاً اشاره شد  ${}^{241}\text{Am}-{}^9\text{Be}$  به عنوان یک چشمه گاماها‌ی پرانرژی  $4/438\text{MeV}$  نیز می‌باشد که به ازای هر نوترون، حدود  $0/6$  گامای  $4/438\text{MeV}$  تولید می‌کند. مطالعات انجام شده روی طیف و شدت گاماها‌ی آن به نسبت آنچه در مورد نوترون‌هایش انجام گرفته است، بسیار اندک است؛ به همین سبب گاهی از نقش و اهمیت آن به عنوان یک چشمه‌ی گاما غفلت می‌شود. این در حالی است که اثر آن در طیف سنجی گاماها در فعالسازی نوترونی با این چشمه بسیار حائز اهمیت است.

## ۱-۲ اندازه‌گیریها طیف ارتفاع تپ چشمه



طیف گاماهاى چشمه  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  با فعالیت  $10^{11} \times 1/9$  Bq و طیف زمینه را با یک آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) به ابعاد  $2'' \times 2''$  به مدت ۱۰ دقیقه اندازه گرفته‌ایم که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. این طیف‌ها با طیف‌هایی که Vega-Corrillo و همکارانش [۱۱] اخیراً اندازه گرفته‌اند همخوانی دارد.



شکل ۱: طیف ارتفاع تپ تجربی گاماهاى چشمه  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  و طیف زمینه نرمال

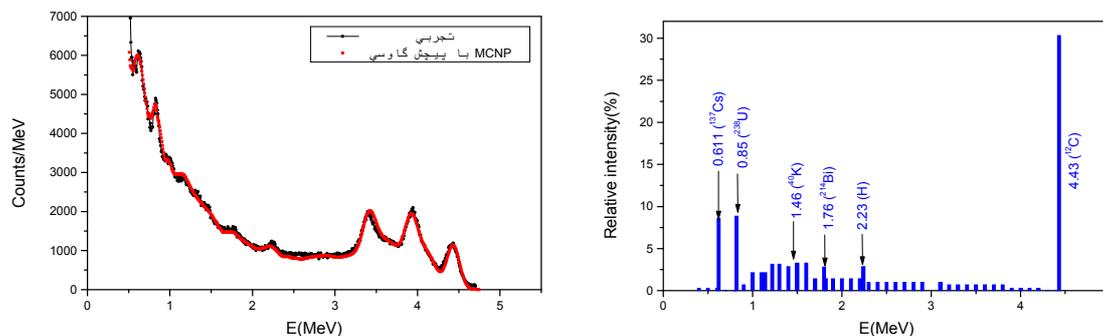
در طیف گاماهاى چشمه قله‌هاى زیر دیده می‌شود: قله تمام انرژی  $4/438\text{MeV}$ ، قله تک فراری  $3/927\text{MeV}$  و قله دو فراری  $3/416\text{MeV}$  ناشی از واکنش  $^9\text{Be}(n,\gamma)^{12}\text{C}$ ؛ قله  $2/23\text{MeV}$  ناشی از گیراندازی نوترون توسط هیدروژن؛ قله  $1/46\text{MeV}$  پتاسیم ( $^{40}\text{K}$ )؛ قله  $1/76\text{MeV}$  بیسموت ( $^{214}\text{Bi}$ )؛ قله  $0/85\text{MeV}$  اورانیوم ( $^{238}\text{U}$ ) و قله  $0/611$  سزیم ( $^{137}\text{Cs}$ ).

## ۲-۲ واپیچش طیف تجربی با سعی و خطا

ابتدا برای آنالیز طیف ارتفاع تپ و کسب اطلاع اولیه از طیف گاماهاى چشمه، طیف ارتفاع تپ تجربی را به کمک کد MCNP واپیچش نموده‌ایم. برای این منظور یک طیف چشمه گاما به عنوان ورودی اولیه MCNP در نظر گرفته‌ایم، طیف چشمه ورودی را به روش سعی و خطا آنقدر تغییر داده‌ایم، تا طیف ارتفاع تپ خروجی بعد از پیچش گاوسی با طیف ارتفاع تپ تجربی همخوان شود. طیف مناسب بدست آمده از واپیچش، در شکل ۲-الف نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود سهم عمده مربوط به گاماهاى  $4/438\text{MeV}$  است. با ورودی چشمه‌ای با طیف شکل ۲-الف و هندسه‌ی آزمایش تجربی، طیف ارتفاع تپ را با تالی F8:p محاسبه نموده‌ایم. طیف ارتفاع تپ



خروجی از MCNP، بعد از پیچش گاوسی با طیف تجربی در شکل ۲-ب نشان داده شده است. اما هنوز شدت گاماها و نسبت گاما به نوترون چشمه تعیین نشده است، و نیاز به تحلیل دقیق طیف مبنی بر این که چه گاما‌هایی از چشمه آمده‌اند و چه گاما‌هایی از برهم کنش نوترون با مواد اطراف چشمه وجود دارد.



شکل ۲: (الف) طیف گاما‌های بدست آمده از واپچش طیف ارتفاع تپ تجربی به کمک کد MCNP؛ (ب) تطابق

طیف ارتفاع تپ MCNP با پیچش گاوسی و طیف تجربی

### ۳. زمینه‌ها در طیف ارتفاع تپ چشمه $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$

به خاطر تابشهای کیهانی، وجود مواد رایواکتیو طبیعی در محیط و چشمه‌های موجود در آزمایشگاه، همه آشکارسازها تعدادی تپ زمینه ثبت می‌کنند. این نوع زمینه را زمینه نرمال می‌نامیم. نوع دیگر زمینه ناشی از گاما‌هایی است که در برهم کنش نوترون با مواد اطراف چشمه وجود می‌آیند یا از تپهایی که بر اثر پس زنی هسته‌های سدیم و ید توسط نوترون‌ها در آشکارساز ایجاد می‌گردد. این زمینه را زمینه مستقیم  $^{13}\text{C}$  می‌نامیم، زیرا ناشی از وجود چشمه نوترون است و با حذف چشمه نوترون قطع می‌شود. برای شبیه سازی زمینه مستقیم از کد محاسباتی MCNP استفاده نموده‌ایم [۱۲]. بطور خلاصه ناخالصیهای موجود در طیف چشمه را به سه نوع زیر تفکیک می‌کنیم:

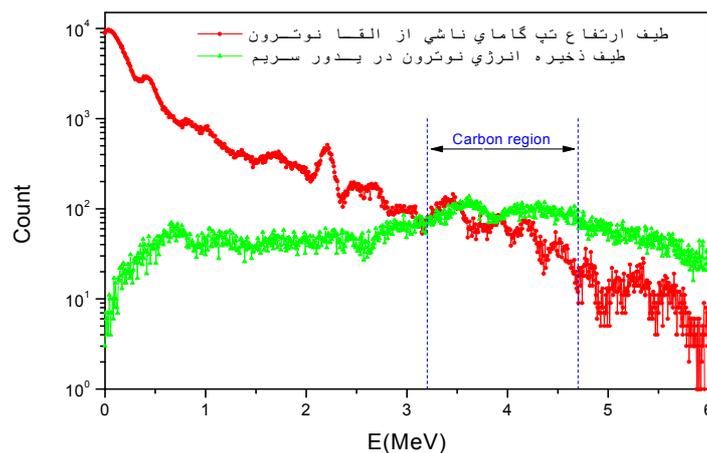
۱. زمینه نرمال ناشی از تابش کیهانی، چشمه‌های موجود در آزمایشگاه و عناصر رایواکتیو طبیعی موجود در همه مواد. این نوع زمینه به آسانی اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱).



۲. زمینه مستقیم ناشی از گاما‌های تولید شده از برهم‌کنش‌های نوترون نظیر  $(n,n')$  و  $(n,\gamma)$ . اندازه‌گیری مجزای طیف این گاماها غیرممکن است؛ فقط با شبیه‌سازی مونت کارلو می‌توان آن را محاسبه نمود. برای این منظور، کد محاسباتی MCNP را با هندسه شرح داده شده در قسمت قبل با چشمه نوترون  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  بکار برده‌ایم و طیف ارتفاع تپ گاما‌های آن را محاسبه نموده‌ایم. شکل ۳ طیف مونت کارلوی پیچانده شده با یک تابع گاوسی مناسب را نشان می‌دهد. پیچش گاوسی متناظر با توان تفکیک انرژی سیستم می‌باشد و طیف محاسباتی با  $\Delta E = 0$  را به طیفی با گسترده‌گی گاوسی  $\Delta E \neq 0$  تبدیل می‌کند تا قابل تطبیق با طیف‌های تجربی باشد. در طیف شکل ۳ قله‌های  $2/23\text{MeV}$ ،  $3/416\text{MeV}$ ،  $3/927\text{MeV}$  و  $4/438\text{MeV}$  به وضوح دیده می‌شوند.

۳. زمینه مستقیم ناشی از ذخیره انرژی نوترون‌ها در آشکارساز. نوترون‌ها در پراکندگی از هسته‌های  $^{127}\text{I}$  و  $^{23}\text{Na}$  آنها را پس زده و انرژی ناشی از این پس زده‌گی همانند یک تپ ثبت می‌شود. این طیف را با کد MCNP محاسبه و سپس در تابع گاوسی پیچیده‌ایم (شکل ۳).

طیف‌های زمینه مستقیم که تا انرژی بالای  $6\text{MeV}$  گسترده شده‌اند، در ناحیه کربنی ( $3/2\text{MeV}-4/7$ ) حدود  $14\%$  ناخالصی ایجاد نموده‌اند که تصحیح آن حائز اهمیت است.



شکل ۳: طیف‌های مونت کارلوی زمینه مستقیم پیچانده شده با یک تابع گاوسی

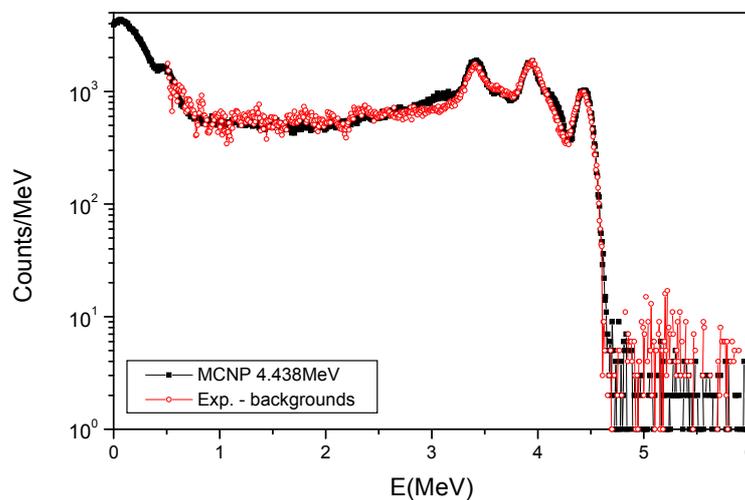


## ۴. محاسبات و تحلیل

برای بدست آوردن طیف خالص گاماهاى  $4/438\text{MeV}$ ، سه نوع زمینه را از طیف تجربی چشمه کم کرده‌ایم. سپس با هندسه قبلی و یک چشمه تک انرژی  $4/438\text{MeV}$  گاما، طیف ارتفاع تپ و بازده آشکارساز برای این چشمه به کمک کد MCNP محاسبه شده است. شکل ۴ طیف مونت کارلو بعد از پیچش با تابع گاوسی و طیف خالص را نشان می‌دهد که در آن طیف مونت کارلو به قله تک فراری  $3/927\text{MeV}$  طیف خالص نرمالیزه شده است. تطابق خوب این دو طیف، ما را بر آن داشت که سطح زیر طیف مونت کارلو را به عنوان شمارش کل گاماهاى  $4/438\text{MeV}$ ، یعنی  $N_t$  در نظر بگیریم. محاسبات مقدار  $(1 \pm 0/0003) \times 10^{-4}$   $\eta = 1/7622$  را برای بازده آشکارسازی بدست داده است. بدین ترتیب می‌توان تعداد کل گاماهاى گسیل شده ( $S_\gamma$ ) از چشمه در طی ۱۰ دقیقه محاسبه کرد:

$$N_t = 6.573 \times 10^5 \cdot \eta = 1.7622 \times 10^{-4} \Rightarrow S_\gamma = \frac{N_t}{\eta} = 3.730 \times 10^9$$

همچنین در مدت زمان ۱۰ دقیقه حدود  $6/258 \times 10^9$  نوترون از چشمه گسیل شده است.



شکل ۴: طیف مونت کارلو چشمه  $4/438\text{MeV}$  بعد از پیچش با تابع گاوسی و طیف خالص.



نهایتاً، نسبت گامای  $4/438\text{MeV}$  به نوترون را  $0/017 \pm 0/596$  بدست آورده‌ایم که با آخرین مقدار گزارش شده تطابق دارد [۳]. لازم به ذکر است که در محاسبه  $R$  فقط خطای هندسه و خطای مونت کارلو منظور شده است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

نسبت گامای  $4/438\text{MeV}$  به نوترون چشمه  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  را به روش تجربی-محاسباتی تعیین نموده‌ایم که از دقت بسیار خوبی برخوردار است [۱۳]. لازم به ذکر است که تصحیحات مربوط به زمینه مستقیم فقط با شبیه سازی مونت کارلو امکان پذیر است، گرچه یک اتاق کم پراکنده می‌تواند اثر آن را کاهش دهد.

#### ۶. مراجع

- [1] Pinault J.L., Nuclear quantitative analysis of P, Si, Ca, Mg, Fe and Al in boreholes in a phosphate mine. Nucl. Geophy. 2 (3), (1988) 191.
- [2] Shahriarib M., Sohrabpour M., Borehole parametric study for neutron induced capture g-ray spectrometry using the MCNP code. Appl. Radiat. Isot. 52(9), (2000) 127.
- [3] Croft S., The use of neutron intensity calibration  $^9\text{Be}(\alpha\text{-n})$  sources as 4438keV gamma-ray reference standards. Nucl. Inst. Meth. A281(14), (1989) 103.
- [4] Akahoa E.H.K., Jonahb S.A., Dagadua C.P.K, Maakuua B.T., Adua P.S., Anim-Samponga S., Kyere A.W.K., Geometrical effects on thermal neutron reaction of hydrogenous moderators using  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  source. Appl. Radiat. Isot. 55(5), (2001) 175.
- [5] Jonah S.A., El-Megrab A.M., Veradi M., Csikai J., An Improved Neutron Reaction setup for the Determination of H and (O+C)/H in oil samples. J. Radioanal. Chem. 218 (2), (1992) 193-195.
- [6] Norman E.B., Smith E.B., Trigg J., Chan Y.D. & the LBNL/SNO Group,  $^{241}\text{Am}\text{-}^9\text{Be}$  source for neutron and  $\gamma$ -ray calibrations of SNO. (2001).
- [7] Pal J., Saha S., Dey C.C., Sinha B.k., Chatterjee M.B., Neutron energy spectrum of an Am-Be source by gamma gated NTOF technique, Radiat. Chem. 51(3) (1998) 475.
- [8] Milman I.I., Nikiforov S.V., Kortov V.S., Dosimetry of Mixed gamma-neutron fields using TLD-500k detectors based anion-defective corundum, Radiat. Measure. 33(4), (2001) 567.
- [9] Marsh J.W., Thomas D.J., Burke M., High resolution measurements of neutron energy spectra from Am-Be and Am-b neutron source, Nucl. Instr. and Meth A 366 (1995) 340-348
- [10] J. Pal, S. Saha, C.C. Dey, B.K. Sinha, M.B. Chatterjee, Neutron energy spectrum of an Am-Be source by gamma gated NTOF technique, Radiat. Phys. Chem. 51 (1998) 475.
- [11] Vega-Carrillo H. R., Manzanares-Acuna E., Becerra-Ferreiro A. M., Carrillo-Nunez A., Neutron and gamma-ray spectra of  $^{239}\text{Pu}\text{-Be}$  and  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ . Appl. Radiat. Isot. 57(4) (2002) 167.
- [12] Briesmeister J.F., MCNP: a general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4C, Los Alamos National laboratory Report LA-13709-M, (2000).
- [13] Mowlavi A. A., Koochi-Fayegh R., Determination of 4.438 MeV  $\gamma$ -Ray to Neutron Emission Ratio from a  $^{241}\text{Am}\text{-}^9\text{Be}$  Neutron Source, Applied Radiation and Isotopes , vol. 60(6), 2004, pp. 959-962.