

بررسی طراحی چشمه مینیاتوری نوترون Am-Be و مقایسه راندمان آن از طریق تجربی و محاسبات با استفاده از کد MCNP

طیب کاکاوند^۱، حسین غفوریان^۲، مهسا حاجی شفیعیها^{۱*}، سید امیر حسین فقهی^۳

۱- دانشکده علوم پایه، دانشگاه زنجان، صندوق پستی: ۳۱۳-۴۵۱۹۵، زنجان، ایران

۲- مرکز تحقیقات هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۱۴۸۵-۴۹۸، تهران، ایران

۳- دانشکده فیزیک و علوم هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران، ایران

چکیده

چشمه های مینیاتوری با شار بالای نوترون کاربردهای فراوانی در پزشکی، صنعت و تحقیقات دارند. مهمترین مشخصه عمومی چشمه های مینیاتوری نوترون، قطر آنها می باشد که به طور متوسط ۳ mm است. در این کار تحقیقاتی بررسی و طراحی جهت ساخت یک چشمه مینیاتوری نوترون Am-Be انجام گرفته است. تحقیقات انجام شده در این طرح با امکانات موجود منجر به ساخت چشمه نوترونی Am-Be با استفاده از پودر فلز بریلیوم با درجه خلوص ۹۸ درصد و دانه بندی تقریباً ۲۰۰-۱۰۰ μm و چشمه آمرسیوم با اکتیویته حدود ۲۰۰ μC گردیده است. طراحی چشمه نوترون با رعایت مسائل ایمنی و حفاظتی صورت گرفته است. سیستم به صورت وصل یعنی وجود نوترون و قطع یعنی عدم وجود نوترون (cut off) طراحی شده است. شار نوترون حاصل از چشمه مذکور که با استفاده از آشکارساز BF₃ شمارش و محاسبه گردیده، (1.14(n/sec.cm²) به دست آمده است. نتایج حاصل از آزمایشات تجربی با کد محاسباتی MCNP مقایسه گردید و مشاهده شد که شار نوترون به دست آمده از روش مونت کارلو بیش از دو برابر شار نوترونی چشمه ساخته شده است که دلیل آن عدم امکان وارد کردن فاکتورهای اصلاحی مانند درجه خلوص و دانه بندی بریلیوم در کد MCNP است. نتیجه محاسبه شده به روش مونت کارلو به وسیله کد MCNP(4C)، (2.56(n/sec.cm²)، می باشد. با فراهم آوردن امکانات و تجهیزات لازم جهت ساخت چشمه مینیاتوری از قبیل چشمه آمرسیوم با قدرت بالا و تهیه ماده هدف در فرمهای مختلف ساخت چشمه نوترون Am-Be در ابعاد مینیاتوری امکان پذیر می باشد.

واژه های کلیدی: چشمه مینیاتوری نوترون، کد MCNP(4C)، آشکارساز BF₃، شار نوترون، اکتیویته.

۱- مقدمه

کاربرد نوترونها بستگی به انرژی آنها داشته که به عنوان مثال: از نوترونهای سریع در پرتو درمانی، نوترونهای حرارتی در آنالیز با فعالسازی نوترونی (NAA) و نوترونهای فوق حرارتی در BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) استفاده می شود [۱].

چشمه های نوترونی عبارتند از: راکتورها، شتابدهنده ها و چشمه های رادیو ایزوتوپی نوترونی. چشمه های رادیو ایزوتوپی نوترون بنا به ویژگیهایی که دارند، حمل آسان، سهولت عملکرد و بهای

پایین تر، دارای کاربردهای گسترده تری نسبت به سایر چشمه های نوترونی می باشند. البته این نوع چشمه ها دارای معایبی مانند بهره نوترونی پایین و نیمه عمر کوتاه نیز می باشند. چشمه های رادیوایزوتوپی معمولاً به صورت کپسولهایی با ارتفاع و قطر تقریباً برابر (در حدود چند سانتی متر) ساخته می شوند. در حالیکه چشمه های مینیاتوری دارای قطر بسیار کوچکتری می باشند و هر اندازه قطر کپسول چشمه کوچکتر باشد، چشمه مینیاتوری مناسبتری به دست می آید. در روشهای قدیمی درمان با اشعه، از فوتونهای گاما و یا اشعه ایکس استفاده می شده است. مزیت نوترونها به فوتونهای گاما و اشعه ایکس در این است که نوترونها قادرند انرژی تمرکز یافته بیشتری را در سلول باقی گذارند و نقص آنها در آسیب رساندن به بافتهای سالم می باشد. استفاده از چشمه های مینیاتوری به این دلیل مورد توجه قرار گرفته است که پزشک را قادر می سازد به دلیل مینیاتوری بودن چشمه نوترون، آن را با استفاده از ابزار مخصوص وارد بدن بیمار کرده به گونه ای که تابش نوترون مستقیماً به ناحیه مورد نظر رسیده و به بافتهای سالم مجاور آسیبی نرساند [۲].

در حال حاضر چشمه مینیاتوری نوترون ^{252}Cf جهت درمان برخی سرطانها در آزمایشگاه ملی اکریج (ORNL) ساخته شده است. این چشمه با قطر ۳ mm شامل $500\ \mu\text{g}$ کالیفرنیوم می باشد و جهت براکی تراپی استفاده می شود. شدت نوترونی آن $10^9\ (\text{n/sec})$ می باشد [۳]. دومین چشمه مینیاتوری نوترون ^{252}Cf ساخته شده در ORNL شامل $30\ \mu\text{g}$ کالیفرنیوم با قطر $2/8\ \text{mm}$ و ارتفاع $23\ \text{mm}$ می باشد [۴]. بر اساس روش مونت کارلو می توان برهمکنش بین ذرات در یک محیط را شبیه سازی کرد. در این مقاله با استفاده از روش مونت کارلو توسط کد MCNP(4C) به بررسی نتایج حاصل از آزمایش پرداخته شده است.

۲- روش کار

جهت ایجاد توانایی قطع تولید نوترون در مواقع لازم، یک روش این است که بر خلاف سایر چشمه های متداول از ترکیب نمودن ماده هدف و چشمه مولد آلفا خودداری گردد. از این رو فاصله ای معادل ۱mm میان چشمه آمرسیوم و بریلیوم در نظر گرفته ایم. دو عامل در تعیین فاصله میان چشمه آمرسیوم و ماده هدف در نظر گرفته شدند: عامل اول، از آن جایی که طراحی چشمه Am-Be مورد نظر می باشد نباید فاصله چنان باشد که باعث ایجاد تضعیف فاحشی در انرژی ذرات آلفا شود و دوم این که به دلیل محدودیت های فنی و با توجه به امکانات در دسترس و اهمیت دقت در کار تجربی کم نمودن فاصله از حدی بیشتر مقدور نمی باشد.

با استفاده از کد Srim میزان افت انرژی ذرات آلفای ساطع شده از چشمه آمرسیوم در هوا و برد آنها در بریلیوم برآورد شدند. با توجه به نتایجی که در خصوص ضخامت موثر ماده هدف جهت تولید نوترون به دست آمد و از طرفی محدودیتهای موجود در تهیه ماده هدف در فرمهای مختلف قادر به ساخت چشمه نوترونی با ویژگیهای مورد نظر (چشمه ای با قطر کمتر از ۳ mm) نشدیم. با این وجود با اتکا بر امکانات

در دسترس، پودر فلز بریلیوم با درجه خلوص ۹۸ درصد و دانه بندی تقریباً $200-100 \mu\text{m}$ و چشمه آمرسیوم با اکتیویته حدود $200 \mu\text{C}$ ، یک چشمه نوترونی Am-Be ساخته و به وسیله آشکار ساز BF_3 ، شار نوترون حاصل از آن بررسی و توسط کد MCNP شبیه سازی شد.

محفظه ای که واکنش (α, n) در آن روی می دهد، به شکل استوانه و از جنس پلکسی گلاس می باشد. بدین ترتیب که چشمه آمرسیوم به فاصله ۱mm بالاتر از بریلیوم قرار گرفت. با توجه به ابعاد چشمه آمرسیوم، کوچک کردن قطر ناحیه حاوی بریلیوم به این دلیل که مانع از رسیدن کل شار آلفای گسیل شده به ماده هدف می شود، باعث کاهش راندمان واکنش (α, n) خواهد شد. از این رو با توجه به این که قطر چشمه آمرسیوم در دسترس حدود ۱۴mm بود و هندسه محفظه و به منظور جلوگیری از کاهش راندمان، قطر سطح حاوی بریلیوم ۱۲mm در نظر گرفته شد.

۳- نتایج

با توجه به نتایج به دست آمده از کد Srim میزان افت انرژی ذرات آلفای ساطع شده از چشمه آمرسیوم پس از طی کردن مسافت یک میلیمتر در هوا تقریباً 0.08 MeV به دست می آید. از این رو ذرات آلفا با انرژی تقریبی 5.4 MeV (انرژی ذرات آلفای ساطع شده از چشمه آمرسیوم 5.48 MeV می باشد) وارد ماده هدف می شوند. بار دیگر کد Srim برای ماده هدف بریلیوم و ذرات فرودی آلفا جهت به دست آوردن برد ذرات آلفا در بریلیوم اجرا شد. به جدول ۱ توجه کنید.

جدول ۱- نتایج حاصل از کد Srim برای ذرات آلفا در بریلیوم (Stopping Unit=MeV/mm)

Ion Energy	dE/dx Elec.	dE/dx Nuclear	Projected Range
100.00 keV	2.32E+02	2.17E+00	6310 A
300.00 keV	3.22E+02	8.95E-01	1.32 um
400.00 keV	3.33E+02	7.05E-01	1.62 um
500.00 keV	3.34E+02	5.85E-01	1.92 um
600.00 keV	3.32E+02	5.01E-01	2.22 um
700.00 keV	3.26E+02	4.40E-01	2.52 um
800.00 keV	3.19E+02	3.93E-01	2.83 um
900.00 keV	3.11E+02	3.55E-01	3.15 um
1.00 MeV	3.03E+02	3.25E-01	3.48 um
2.00 MeV	2.32E+02	1.78E-01	7.27 um
3.00 MeV	1.87E+02	1.25E-01	12.09 um
4.00 MeV	1.58E+02	9.72E-02	17.92 um
5.00 MeV	1.37E+02	7.98E-02	24.72 um
5.40 MeV	1.31E+02	7.46E-02	27.70 um
5.48 MeV	1.29E+02	7.36E-02	28.32 um

اکتیویته فعلی چشمه آمرسیوم به کار رفته در آزمایش تقریباً $194/625 \mu\text{C}$ می باشد. با استفاده از بهره نوترونی برآورد شده برای ^{241}Am با ماده هدف بریلیوم، (2.7×10^6 neutrons per second per curie) و همچنین نتایج کد MCNP شار چشمه نوترونی در ضخامتهای متفاوتی از ماده هدف به دست می آید.

جدول ۲- نتایج حاصل از شبیه سازی .

ضخامت بریلیوم(میکرون)	خروجی کد MCNP ($1/\text{cm}^2$)	شار نوترون ($\text{n}/\text{sec}.\text{cm}^2$)
2000	4.89×10^{-3}	2569.6×10^{-3}
1500	5.085×10^{-3}	2672.2×10^{-3}
1000	5.3098×10^{-3}	2790.28×10^{-3}
500	5.562×10^{-3}	2923.03×10^{-3}
400	5.617×10^{-3}	2952.09×10^{-3}
300	5.674×10^{-3}	2981.52×10^{-3}
200	5.729×10^{-3}	3010.62×10^{-3}
100	5.787×10^{-3}	3041.35×10^{-3}
80	5.799×10^{-3}	3047.35×10^{-3}
60	5.81×10^{-3}	3053.57×10^{-3}
40	5.822×10^{-3}	3059.69×10^{-3}
27.7	5.829×10^{-3}	3063.39×10^{-3}
25	5.82995×10^{-3}	3063.58×10^{-3}
20	5.82986×10^{-3}	3063.56×10^{-3}
15	5.82988×10^{-3}	3063.54×10^{-3}
10	5.82993×10^{-3}	3063.53×10^{-3}
5	5.82946×10^{-3}	3063.32×10^{-3}

آهنگ واکنش به دست آمده با استفاده از آشکارساز BF_3 ، $1/6$ نوترون در ثانیه محاسبه شد که این مقدار با چندین بار شمارش در بازه های زمانی یکسان به دست آمده است.

دقیقه / شمارش ۹۶: آهنگ شمارش خالص

$96 \pm 3/2$ %: خطای استاندارد

با احتساب زاویه فضایی میان چشمه و آشکارساز و راندمان آن می توان تعداد کل نوترونهای گسیل شده از چشمه را با استفاده از رابطه ۱ به دست آورد [۵]:

$$S = N \frac{4\pi}{\epsilon\Omega} \quad (1)$$

$N=1.6$: تعداد نوترونهای شمارش شده توسط آشکارساز

$\epsilon = 0.01$: راندمان آشکارساز

$\Omega = 2\pi$: زاویه فضایی بین چشمه و آشکارساز

$S=320$: اکتیویته چشمه نوترون

اگر چشمه به صورت دیسکی به شعاع R باشد شار در فاصله قائم d از صفحه چشمه و فاصله z از محور چشمه توسط رابطه زیر محاسبه می شود [۶]:

$$\phi = \frac{S}{4\pi R^2} \text{Ln}\left\{\frac{1}{2z^2} [z^2 + R^2 - d^2 + \sqrt{R^4 + 2R^2(z^2 - d^2) + (z^2 + d^2)^2}]\right\} \quad (2)$$

با استفاده از رابطه ۲ شار نوترون بر روی محور چشمه و در سطح تحتانی محفظه به دست می آید:

$$\phi = 1.14 \frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}} \quad (3)$$

سه محفظه با ویژگی های کاملاً یکسان به جز در ارتفاع حجم حاوی برلیوم (1mm ، $1/5\text{mm}$ و 2mm) مورد آزمایش قرار گرفتند. هر سه محفظه بهره نوترونی تقریباً یکسانی ایجاد کردند. این امر از آن جا ناشی می شود که برد ذرات آلفا با انرژی $5/4\text{MeV}$ در برلیوم مطابق نتایج به دست آمده از کد Srim تنها $27/7\ \mu\text{m}$ می باشد. در این صورت منطقی است که در ضخامت های بیشتر از $27/7\ \mu\text{m}$ نباید تغییری در تعداد نوترون های گسیل شده از چشمه نوترونی مشاهده شود. چنانکه آزمایش های انجام شده این مسئله را تأیید می کنند.

۴- بحث و نتیجه گیری

با تهیه برلیوم به میزان مورد نیاز جهت آزمایشات وسیع و در فرم بهینه از نظر دانه بندی همچنین با توجه به ویژگیهای خاص آن از قبیل سمی و فلزی بودن لایه نشانی برلیوم امکان پذیر می شود. پودر برلیوم با دانه بندی حدود $200 - 100\ \mu\text{m}$ و درجه خلوص ۹۸ درصد تهیه و آزمایشات انجام شد. در این پروژه سعی شد که به طور تجربی برلیوم در ضخامتهای حدود چند میکرون تهیه شود که با تمام سعی و کوشش ساخت میکرو فیلم عملی نشد. مقایسه نتایج کد MCNP با نتایج تجربی در ضخامتهای 2mm ، 0.2mm و 0.5mm انجام گرفت. رابطه ۳ و نتایج جدول ۲ در ضخامت 2mm توافقی منطقی روشنی را بین نتایج حاصل از کد و نتایج حاصل از آزمایش نشان می دهند. تولید نوترون در حالتی که چشمه مولد آلفا و ماده هدف با یکدیگر مخلوط نشده باشند، به طور تجربی به اثبات رسید. نو آوری چشمه ساخته شده در مدل طبقاتی چشمه مولد آلفا - برلیوم می باشد که این چشمه نوترونی قادر خواهد بود با تغییر در کشوی رفت و برگشت چشمه آمرسیوم، تولید شار نوترون را آغاز کند یا خاتمه دهد که این فناوری در جهت حفاظت و ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار است.

چشمه آمرسیوم استفاده شده در بخش تجربی از اکتیویته بسیار پایینی برخوردار بوده که خود عامل کاهش بهره نوترونی می باشد. با استفاده از چشمه های آمرسیوم با اکتیویته بالاتر، بهره نوترونی به مقادیر مورد نیاز با توجه به نوع کاربرد آن افزایش خواهد یافت.



References:

1. H. R. Vega-Carrillo and C. Torres-Muhech, "Low Energy from PuBe Isotopic Neutron Sources Inserted in Moderating Media," *Revista Mexicana de Fisica*, 48, 5, 405-412, 2002.
2. H.R. ,Vega-Carrillo and E.Manzanares-Acuna, "Neutron Source Design for Boron Neutron Capture Synovectomy," *Alasbimn Journal*, 6, 2003.
3. R.C.Martin, et al., "Development of Miniature Californium-252 Neutron Sources for Cancer Therapy," Report, 2001.
4. R.C.Martin and D.S.Halpern,"Development of Miniature High-Dose-Rate Californium-252 Sources for Boron-Enhanced and Fast Neutron Brachytherapy," Report, 2002.
5. G.F.Knoll," Radiation Detection and Measurment , " Wiley, New York, 1979, 93-95.
6. A.E.Profio," Experimental Reactor Physics," John Wiley & Sons, New York, 1976, 195-203.