

etaati.reza@gmail.com :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۲/۱۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۸/۶/۲۵)

MCNP C

Am-Be

MCNP

پلاسمای کانونی قادر است که پلاسمای داغ و چگال را تا دماهای چند کیلو الکترون ولت و چگالی 10^{20} ion/cm³ تولید کند. آزمایش‌های انجام شده در دستگاه‌های پلاسمای کانونی مختلف [۱-۹] نشان می‌دهد که هنگام کار این دستگاه‌ها پرتوهای ایکس پالسی، باریکه‌های الکترونی نسبیته (REBs) و همچنین جریانی از یون‌های پالسی با انرژی نسبتاً بالا (تا چندین مگا الکترون ولت) تولید می‌شود [۴-۶]. این یون‌ها در راستای محور z دستگاه PF گسیل می‌شوند (اگرچه توزیع زاویه‌ای یون‌ها نسبتاً وسیع‌تر است [۶]). در حالتی که دستگاه با گاز دوتریم کار کند به دلیل واکنش همجوشی، علاوه بر پرتوهای فوق، نوترون‌های

یکی از دستگاه‌هایی که در تحقیقات همجوشی هسته‌ای^۱ به کار گرفته می‌شود پلاسمای کانونی^۲ (PF) نام دارد. این دستگاه در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی به‌طور مستقل توسط فیلیپوف^۳ در اتحاد جماهیر شوروی سابق [۱] و مدر^۴ در ایالات متحده آمریکا اختراع گردید [۲]. شکل ۱ نمای ساده‌ای از این دو طراحی را نشان می‌دهد. اختلاف عمده این دو طراحی در رابطه با نسبت منظر^۵ (HARP) (نسبت طول به قطر آند) می‌باشد.

۱. Nuclear fusion

۲. Plasma Focus

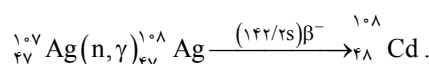
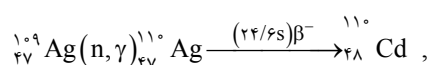
۳. Fillippov

۴. Mather

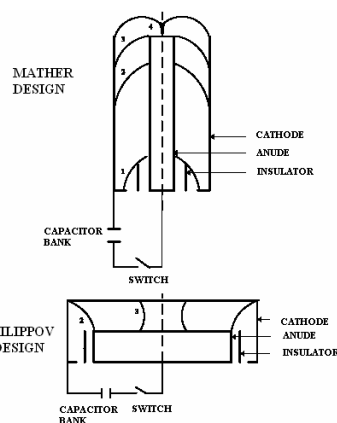
۵. High Aspect Ratio Pinches

۶. Relativistic Electron Beams

واکنش‌هایی با نیمه عمر پایین و سطح مقطع نسبتاً بالا، نوع واپاشی خاص هسته دختر (بتا، گاما، و ذرات دیگر) و ذره تولیدی از اهمیت زیادی برخوردار است. واکنش‌های (n, γ) در ایزوتوپ‌های ^{107}Ag و ^{109}Ag (که در نقره طبیعی به ترتیب با نسبت $51/8\%$ و $48/2\%$ وجود دارند) با داشتن مشخصات فوق، برای شمارش نوترون‌های حرارتی در مدت زمان نسبتاً کوتاه از مرتبه ثانیه و دقیقه مورد استفاده قرار می‌گیرند. ایزوتوپ‌های ^{107}Ag و ^{109}Ag پس از واکنش (n, γ) مطابق الگوی زیر یک واحد به عدد جرمی آنها اضافه شده و به ایزوتوپ‌های ^{108}Ag و ^{110}Ag تبدیل می‌شوند [۱۲].



ایزوتوپ‌های ^{107}Ag و ^{110}Ag با نیمه عمرهای به ترتیب $142/2$ و $24/6$ sec واپاشی β^- انجام می‌دهند. برای عبور این بتاها ورقه نازکی از نقره به ضخامت $0/3$ mm را انتخاب کرده و آن را دور آشکارساز حساس به ذرات بتا با دیواره‌های خیلی نازک می‌پوشانند. بتای تولیدی در هر ضخامت نقره لازم است که ضخامت باقی مانده لایه نقره و ضخامت نازک دیواره تیوب گایگر را طی کند تا آشکار شود. بنابراین استفاده از ضخامت بیشتر باعث می‌شود ذرات بتا از نقره خارج نشوند و در آن جذب شوند. برای شمارش ذرات یونیزه کننده با برد نسبتاً زیاد (مانند β و γ) از تیوب گایگر-مولر استفاده می‌شود. به دلیل این‌که در این آزمایش‌ها هدف شمارش ذرات بتا است آشکارساز با دیواره‌های نازک مورد استفاده قرار گرفته است. بسته به موقعیت آزمایش، از یک مد واپاشی یا هر دو مد واپاشی برای تخمین میدان نوترونی استفاده می‌شود. از نیمه عمر کوتاه برای زمان‌های کوتاه شمارش و از نیمه عمر بلند برای زمان‌های نسبتاً بلند شمارش (چند دقیقه) استفاده می‌شود. در ادامه نحوه طراحی شمارنده فعال‌سازی، محاسبه ثابت کالیبراسیون به صورت نظری، اندازه‌گیری ثابت کالیبراسیون و مقایسه آنها با هم ارائه شده است. ثابت کالیبراسیون، ضریبی است که در میزان شمارش آشکارساز ضرب می‌شود تا تعداد کل نوترون‌های تولید شده در آن پالس به دست آید.

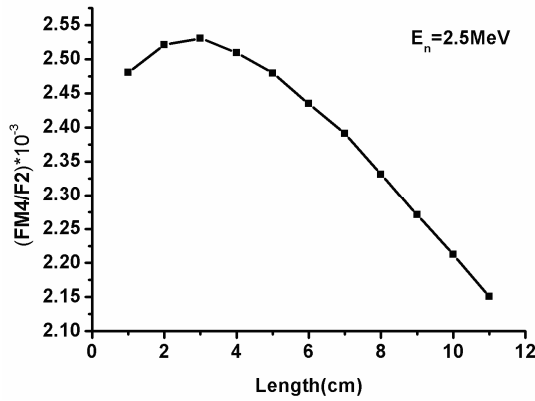


شکل ۱. نمای ساده‌ای از دو طراحی پلاسمای کانونی نوع مدر و فیلیپوف.

سریع با انرژی حدود $2/5$ MeV نیز تولید می‌شوند [۹-۱].

زمان تولید نوترون در هر پالس در دستگاه پلاسمای کانونی معمولاً $50-500$ ns طول می‌کشد. از آن‌جا که شمارنده‌های نوترونی مانند شمارنده BF_3 ، شمارنده ^3He و شمارنده‌های لیتیومی دارای زمان مرده طولانی (چند صد میکروثانیه تا چند میلی ثانیه) می‌باشند، قادر به اندازه‌گیری نوترون‌های پالسی نیستند [۱۰]. زیرا مدت زمان تولید نوترون در دستگاه از زمان مرده آشکارسازها کمتر است. در دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی در حدود کیلوژول از مرتبه 10^6 n/pulse تولید می‌شود. در این مقاله به روشی برای اندازه‌گیری نوترون پالسی با استفاده از فعال‌سازی با نوترون پرداخته می‌شود.

یکی از روش‌های مهم در اندازه‌گیری شار نوترون پالسی روش فعال‌سازی با نوترون می‌باشد. ایزوتوپ‌های بعضی از عناصر با نوترون واکنش‌های مختلفی انجام می‌دهند که برخی از این واکنش‌ها دارای سطح مقطع بالا در انرژی‌های حرارتی نوترون می‌باشند که به واکنش‌های بدون آستانه و یا حرارتی معروف‌اند. برخی از این عناصر طلا، نقره، بور، لیتیوم و ایندیوم می‌باشند که به دلیل سطح مقطع بالا، ایزوتوپ‌های مناسبی برای واکنش با نوترون‌های حرارتی هستند [۱۱]. با توجه به اینکه دست‌یابی به شمارش نوترون‌ها در مدت زمان کوتاه و همچنین بازده بالا دارای اهمیت است، داشتن



شکل ۴. نتیجه حاصل از محاسبات کد MCNP۴C جهت به دست آوردن ضخامت بهینه پلی اتیلن جلوی آشکارساز گایگر- مولر.

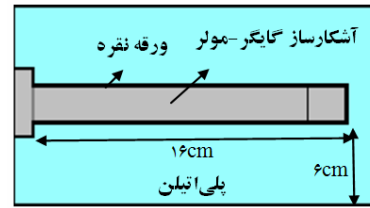
نسبت این دو مقدار، کمیت مناسبی برای محاسبه ضخامت بهینه پلی اتیلن اطراف و جلوی آشکارساز می باشد که نتیجه آن در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها ضخامت بهینه ۶ cm برای پلی اتیلن جانبی و ۳ cm برای پلی اتیلن جلوی آشکارساز در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است در تمام محاسبات خطا کمتر از ۱/۰٪ می باشد.

بازدهی نوترون در دستگاه پلاسمای کانونی از بستگی تعداد شمارش های ذرات بتا در آشکارساز در یک بازه زمانی مانند T_1 تا T_2 بعد از تخلیه دستگاه پلاسمای کانونی به دست می آید. اگر K ثابت کالیبراسیون و G_{12} شمارش آشکارساز در بازه زمانی T_1 تا T_2 ثانیه بعد از تخلیه و Y (neutron/shot) بازدهی نوترون در هر تخلیه دستگاه باشد، رابطه (۱) برقرار است:

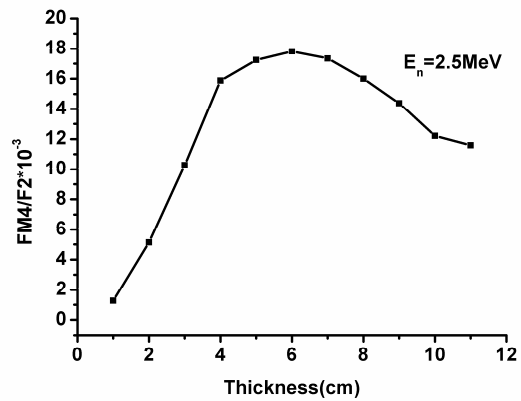
$$Y = K \times G_{12} \quad (1)$$

برای اندازه گیری ثابت کالیبراسیون چهار روش به وسیله جنتیلینی و همکارانش [۱۴] ارائه شده است. این چهار روش به شرح زیر هستند:

۱. استفاده از یک ورقه ایندیومی.
۲. استفاده از صفحات امولسیون هسته ای.
۳. اندازه گیری آهنگ شمارش در اشباع.



شکل ۲. نحوه طراحی شمارنده فعالیت با پوشش نقره‌ای.



شکل ۳. نتیجه حاصل از محاسبات کد MCNP۴C جهت به دست آوردن ضخامت بهینه پلی اتیلن اطراف آشکارساز گایگر- مولر.

شمارنده فعالیت طراحی شده (شکل ۲) شامل یک آشکارساز گایگر- مولر دیواره نازک حساس به بتا (مدل LND ۷۲۵۱۴) و پلی اتیلن جهت کند کردن نوترون های سریع و ورقه نقره ای به ضخامت ۰/۳ میلی متر می باشد. بیشینه طول و قطر این تیوب به ترتیب ۲۰/۳۲ و ۳/۴۳ سانتی متر است. گاز داخل آن نئون- هالوژن و بازه ولتاژ کار آن ۶۰۰-۸۰۰ ولت است.

برای حرارتی کردن نوترون ها بایستی پلی اتیلن جانبی دارای ابعاد مناسبی باشد. برای این منظور این شمارنده، مطابق شکل ۲، با استفاده از کد [۱۳] MCNP۴C شبیه سازی شد. همچنین چشمه نوترونی با انرژی ۲/۵ MeV و به صورت همگن در فاصله ۵۰ cm از محور مرکزی شمارنده فعال سازی تعریف شد. با استفاده از تالی ^4Fm و ^2F در کد MCNP۴C به ترتیب میزان واکنش های (n, γ) در ورقه نقره و شار نوترون رسیده به سطح جانبی، برای ضخامت های مختلف پلی اتیلن، محاسبه گردید.

۲. Nuclear emulsion plate

۳. Measurement of the saturation count rate

۱. Tally

چشمه نوترون با شدت (ثانیه/نوترون) I_0 را به جای چشمه پالسی می‌گذاریم و در حدود ۱۰۰۰ ثانیه صبر می‌کنیم تا ورقه نقره بر اثر تابش به حالت اشباع برسد.

فعالیت در اشباع و آهنگ شمارش در اشباع از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۱]:

$$A_{sat,i} = \lambda_i n_{si}(\infty) = h_i \gamma I_0, \quad (7)$$

$$R_{sat} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i A_{sat,i} = \gamma I_0 \sum_{i=1}^n \varepsilon_i h_i. \quad (8)$$

از سوی دیگر آهنگ شمارش در اشباع را می‌توان مطابق رابطه زیر اندازه گرفت:

$$R_{sat} = N_{cs} / T_{cs}, \quad (9)$$

که در آن N_{cs} تعداد بتاهای شمارش شده در مدت زمان دلخواه T_{cs} در حالت اشباع می‌باشد.

با به کارگیری رابطه‌های (۸) و (۹) می‌توانیم γ را محاسبه کنیم:

$$\gamma = N_{cs} / T_{cs} I_0 \sum_{i=1}^n \varepsilon_i h_i \quad (10)$$

از قرار دادن نتیجه رابطه (۱۰) در رابطه (۶) نتیجه می‌شود:

$$K = \frac{T_{cs} I_0}{N_{cs}} \times \frac{1 + \alpha}{e^{-\lambda_1 T_1} - e^{-\lambda_1 T_2} + \alpha(e^{-\lambda_4 T_1} - e^{-\lambda_4 T_2})} \quad (11)$$

در رابطه فوق α برابر $\frac{\varepsilon_4 h_4}{\varepsilon_1 h_1}$ است. از آنجا که h_i و ε_i مشخص نیستند، برای حذف آنها از محاسبه α از یک اندازه‌گیری اضافی استفاده می‌کنیم. این شمارش G_{34} می‌باشد که در زمان t_3 تا t_4 ثبت می‌شود. از آنجایی که $t_E \ll t_i (i = 1 \sim 4)$ است در نتیجه $T_i \approx t_i$ می‌باشد و الگوی زمانی زیر را برای محاسبات به کار می‌بریم. نکته‌های مهم در الگوی معرفی شده این است که الف) با قرار دادن $T_1 = 0/2 \text{ sec}$ ، درست بعد از تخلیه دستگاه، یک وقفه در شروع شمارش‌ها ایجاد می‌کنیم تا رادیوایزوتوپ‌های با نیمه عمر بسیار کوتاه واپاشی کنند و از طرف دیگر نویز حاصل از امواج الکترومغناطیس دستگاه در حین تخلیه در شمارش‌ها خطایی وارد نکند. ب) با انتخاب مناسب T_i ها می‌توان در حداقل زمان بعد از تخلیه شار نوترون‌ها را به دست آورد.

۴. شمارش پس از دور کردن چشمه نوترون از کنار آشکارساز. به دلیل دسترسی به چشمه نوترون Am-Be و دقت و سادگی بیشتر، روش شمارش در اشباع انتخاب گردید.

فرض کنید که یک پالس نوترونی در زمان t_0 آغاز شده و در $t_E = t_0 + T_S$ خاتمه می‌یابد (T_S مدت زمان پالس نوترونی است که از مرتبه چند صد نانوثانیه می‌باشد) تغییرات n_i (تعداد هسته‌های رادیوایزوتوپ i ام) برحسب زمان، که به وسیله نوترون‌های حرارتی در ورقه نقره تولید می‌شوند، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{dn_i}{dt} = P_i - \lambda_i n_i(t) \quad t \in T_S, i = 1, 2 \quad (2)$$

$$P_i = h_i \phi_{th} = h_i (\gamma Y / T_S), \quad (3)$$

که در آن P_i آهنگ تولید، λ_i ثابت واپاشی، ϕ_{th} شار نوترون حرارتی، γ میزان شار نوترون حرارتی بر واحد نوترون چشمه، Y (neutron/shot) بازده نوترونی یا نوترون‌های تولید شده در هر تخلیه دستگاه و h_i تعداد رادیونوکلید تولید شده از نوع i در واحد زمان توسط واحد شار نوترون حرارتی است. با فرض صفر بودن فعالیت در زمان t_0 و با توجه به این‌که $\lambda_i T_S \ll 1$ است، خواهیم داشت:

$$A_i(t_E) = \lambda_i n_i(t_E) = \gamma h_i \frac{T}{T_S} (1 - e^{-\lambda_i T_S}) \approx \gamma h_i Y \lambda_i, \quad (4)$$

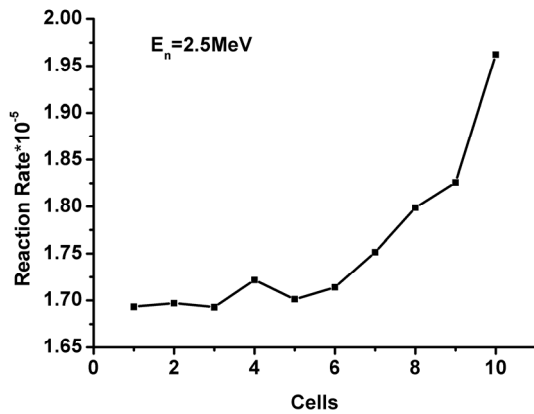
حال اگر از زمان $t = t_1$ تا زمان $t = t_2$ شمارش را انجام دهیم خواهیم داشت:

$$G_{12} = \gamma Y \sum_{i=1}^n \varepsilon_i h_i [e^{-\lambda_i T_1} - e^{-\lambda_i T_2}], \quad (5)$$

که در آن: $T_1 = t_1 - t_E$, $T_2 = t_2 - t_E$ و ε_i بازده آشکارسازی شمارنده برای ذرات بتای گسیل شده از رادیوایزوتوپ i ام است. ثابت کالیبراسیون برابر است با:

$$K = Y / (G_{12}) = 1 / \gamma \sum_{i=1}^n \varepsilon_i h_i [e^{-\lambda_i T_1} - e^{-\lambda_i T_2}], \quad (6)$$

در رابطه فوق γ ، ε_i و h_i نامعلومند و با استفاده از روش اندازه‌گیری آهنگ شمارش در اشباع آنها را حذف می‌کنیم. در اندازه‌گیری به روش شمارش در اشباع، در لحظه $t = t_0$



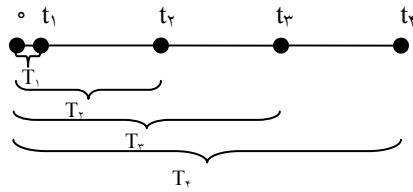
شکل ۶. میزان واکنش (n, γ) برای یک نوترون تابش شده از چشمه در لایه های مختلف نقره که به ده سلول برابر تقسیم شده است. (سلول ۱۰ بیرونی ترین و سلول ۱ داخلی ترین سلول نسبت به تیوب گایگر-مولر می باشند).

MCNP C

به دلیل اینکه کد MCNP4C قابلیت تولید ذرات بتای ناشی از واپاشی هسته ها را ندارد، شبیه سازی در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول ورقه نقره به ده سلول مساوی تقسیم شد و میزان واکنش (n, γ) که معادل هسته های اولیه (لحظه $t=0$) برای چشمه بتا می باشند در هر سلول محاسبه گردید. در مرحله بعد این توزیع به عنوان چشمه الکترون در MCNP4C با توزیع زاویه ای یکنواخت تعریف شد که این توزیع در شکل ۶ نشان داده شده است.

در مرحله دوم میزان تضعیف ذرات الکترون در ورقه نقره و لایه استیل آشکارساز گایگر-مولر و همچنین درصد الکترون هایی که وارد حجم حساس آشکارساز شده اند محاسبه گردید. برای محاسبه ثابت کالیبراسیون مشابه آنچه در عمل انجام می گیرد و در بخش ۴ توضیح داده شد، لازم است پرتوهای بتایی که از واپاشی هسته های ^{108}Ag و ^{110}Ag تولید می شوند و وارد حجم آشکارساز گایگر می شوند در یک بازه زمانی T_1 تا T_2 مطابق الگوی شکل ۵ شمارش شوند. برای انجام شبیه سازی مراحل زیر طی شد:

۱. فراوانی طبیعی (ω_i) هر کدام از ایزوتوپ های ^{107}Ag و ^{109}Ag در نقره طبیعی به ترتیب با نسبت $\omega_1 = 51/8$ و $\omega_2 = 48/8$ می باشد.



شکل ۵. الگوی زمانی شمارش برای محاسبات.

شمارش $G_{\gamma\gamma}$ از رابطه زیر به دست می آید.

$$G_{\gamma\gamma} = \gamma Y \sum_{i=1}^n \varepsilon_i h_i \left[e^{-\lambda_i T_r} - e^{-\lambda_i T_f} \right]. \quad (12)$$

به کمک دو شمارش G_{12} و G_{34} ، ضریب A_C به صورت $A_G = \frac{G_{34}}{G_{12}}$ تعریف می شود. با استفاده از تعریف A_C و

به کارگیری رابطه های (۵) و (۱۲)، رابطه زیر به دست می آید:

$$\alpha = \frac{e^{-\lambda_1 T_r} - e^{-\lambda_1 T_f} - A_C (e^{-\lambda_1 T_1} - e^{-\lambda_1 T_2})}{A_C (e^{-\lambda_1 T_1} - e^{-\lambda_1 T_2}) - (e^{-\lambda_1 T_3} - e^{-\lambda_1 T_4})} \quad (13)$$

بنابراین برای اندازه گیری ثابت کالیبراسیون مراحل زیر را انجام می دهیم:

۱. قرار دادن چشمه نوترون Am-Be در محل تشکیل پلاسما در دستگاه پلاسما کانونی. لازم به ذکر است، برای حذف شمارش گاماها چشمه Am-Be و اندازه گیری شمارش خالص نوترون لازم است یکبار شمارش با ورقه نقره و یکبار بدون ورقه نقره و با ورقه آلومینیوم انجام گیرد و از شمارش با ورقه نقره کم شود. علت استفاده از آلومینیوم آن است که اولاً هندسه آشکارساز و اثر جذب ذرات بتا در لایه نازک را لحاظ کنیم و ثانیاً به دلیل این که سطح مقطع واکنش آن با نوترون حرارتی بسیار کمتر از نقره است فقط گاماها تابش شده از چشمه را شمارش خواهیم کرد.

۲. اندازه گیری شمارش در اشباع آشکارساز فعالیت با پوشش نقره ای N_{CS} در مدت زمان دلخواه T_{CS}

۳. تخلیه دستگاه و ثبت شمارش های G_{12} و G_{34} در دو بازه زمانی T_1 تا T_2 و T_3 تا T_4 مطابق الگوی شکل (۵).

۴. استفاده از رابطه (۱۳) برای محاسبه α .

۵. استفاده از رابطه (۱۱) و محاسبه K یا همان ثابت کالیبراسیون.

برابر است با:

$$N_{\beta} = \sum_{i=1}^2 N_{\beta i} (e^{-\lambda_i T_1} - e^{-\lambda_i T_2}) \quad (15)$$

که در آن N_{β} تعداد اولیه کل رادیوایزوتوپ‌های ^{108}Ag و ^{110}Ag می‌باشد.

۸. با استفاده از رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) ارتباط N_{β} در ورقه نقره با نوترون‌های چشمه و با به‌کارگیری ضرایب تعریف شده، رابطه زیر برای محاسبه قدرت چشمه نوترون با شمارش ذرات بتا در بازه زمانی $\Delta t = T_2 - T_1$ به دست می‌آید:

$$N_n = \sum_{i=1}^n \frac{N_c \times P_{\beta i}}{P_{(n,\gamma)} \times \omega_{\beta i} \times P_{\beta}} \times \frac{1}{e^{-\lambda_i T_1} - e^{-\lambda_i T_2}} \quad (16)$$

که در آن: N_n تعداد کل نوترون‌های تابش شده از دستگاه پلاسمای کانونی می‌باشد. N_c : تعداد ذرات بتای شمارش شده در آشکارساز گایگر-مولر در بازه زمانی $\Delta t = T_2 - T_1$ بعد از تخلیه دستگاه می‌باشد.

اگر در رابطه قبل $T_1 = 0/2$ s، $T_2 = 40/2$ s، $\lambda_1 = 4/94 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ و $\lambda_2 = 2/821 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ قرار داده شود [۱۲]، ثابت کالیبراسیون شمارنده فعالیت از رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$N_n = N_c \times 7/84 \times 10^5 \text{ n/pulse} \quad (17)$$

یعنی ثابت کالیبراسیون حاصل از این محاسبه برابر است با: $K = 7/84 \times 10^5$. پس از انجام محاسبات تئوری، ثابت کالیبراسیون به صورت تجربی نیز به دست آورده شد که در بخش بعدی به آن پرداخته شده است.

چشمه نوترون Am-Be استفاده شده دارای شدت تولید نوترون 10^6 n/s ($8/28 \pm 1/7$) می‌باشد. لازم به ذکر است برای حذف شمارش پرتوهای گامای چشمه Am-Be و اندازه‌گیری شمارش خالص نوترون لازم است یکبار شمارش با ورقه نقره و یکبار بدون آن و با ورقه آلومینیوم انجام گیرد. ورقه آلومینیوم به این دلیل استفاده می‌شود که اندرکنش آن در این ضخامت با نوترون بسیار ناچیز است و از طرفی هندسه طراحی را ثابت نگه می‌دارد. با انجام آزمایش فوق شمارش خالص نوترون در اشباع

۲. احتمال واپاشی بتازای ^{108}Ag برابر $\omega_{\beta 1} = 97/15$ و با انرژی متوسط $0/624 \text{ MeV}$ می‌باشد که از متوسط‌گیری انرژی بیشینه روی مدهای مختلف واپاشی β^- از مرجع [۱۲] به دست آمده است.

۳. احتمال واپاشی بتازای ^{110}Ag برابر $\omega_{\beta 2} = 99/7$ و با انرژی متوسط $1/18 \text{ MeV}$ می‌باشد که از متوسط‌گیری انرژی بیشینه روی مدهای مختلف واپاشی β^- از مرجع [۱۲] به دست آمده است.

در نظر گرفتن انرژی بیشینه برای متوسط‌گیری به جای طیف انرژی ذرات بتا در بندهای ۲ و ۳ حدود ۵٪ خطا در محاسبات بند ۵ ایجاد می‌کند. منشاء خطا در این است که بخشی از بتاهای کم انرژی از ضخامت باقیمانده لایه نقره عبور نمی‌کنند.

۴. محاسبات MCNP نشان می‌دهد که به ازای یک نوترون $P = 1/77 \times 10^{-4}$ واکنش (n,γ) در پوشش نقره رخ می‌دهد.

۵. با توجه به محاسبات MCNP احتمال اینکه یک ذره بتا در نهایت از نقره و استیل عبور کند و وارد حجم حساس گایگر-مولر شود (P_{β}) مقدار $1/79 \times 10^{-2}$ به دست آمد. از این مقدار $P_{\beta 1} = 22/52$ آن مربوط به بتاهای با انرژی $0/624 \text{ MeV}$ و $P_{\beta 2} = 77/48$ آن مربوط به بتاهای با انرژی $1/18 \text{ MeV}$ است.

۶. حال فرض می‌کنیم که شمارنده N_c شمارش را در زمان $\Delta t = T_2 - T_1$ ثانیه انجام داده است. بنابراین با توجه به توضیحات بالا تعداد پرتوهای بتا که پیش از وارد شدن به حجم حساس آشکارساز گایگر-مولر وجود داشته‌اند (N_{β}) برابر است با:

$$N_{\beta} = \sum_{i=1}^2 N_{\beta i} \quad (14)$$

$$N_{\beta i} = \frac{N_c}{0/179} P_{\beta i}$$

که در آن $N_{\beta i}$ تعداد بتاهای ایزوتوپ i ام است که در ورقه نقره تولید شده‌اند و از این تعداد N_c پرتو بتا به داخل آشکارساز گایگر-مولر نفوذ کرده و شمارش شده است.

۷. از آنجا که رادیوایزوتوپ‌های ^{108}Ag و ^{110}Ag در حال واپاشی هستند. تعداد واپاشی آنها در بازه زمانی T_1 تا T_2

است که این مقدار، انرژی نوترون‌های همجوشی هسته‌ای است. در صورتی که در اندازه‌گیری ثابت کالیبراسیون از چشمه Am-Be که طیف آن از ۱۱ MeV-۱۰ KeV گسترش دارد استفاده شده است. در مرجع [۱۴] به روش شمارش در اشباع با چشمه Am-Be و Am-B به ترتیب: $K = (3/4 \pm 0/85) \times 10^7$ n/shout count و $K = (3/89 \pm 1/00) \times 10^7$ n/shout count به دست آمده است. چشمه مناسب، چشمه‌ای است که طیف نوترون‌های آن نزدیک به طیف انرژی نوترون‌ها در همجوشی هسته‌ای باشد.

۲. خطای حدود ۲۰٪ در قدرت چشمه Am-Be استفاده شده به‌طور مستقیم در ثابت کالیبراسیون تأثیر دارد.

۳. بین ضرایب کالیبراسیون که از روش‌های مختلف اندازه‌گیری به دست می‌آید اختلاف وجود دارد. به‌طوری‌که در مرجع [۱۴] با روش فعال‌سازی ورقه ایندیوم $K = (3/3 \pm 0/6) \times 10^7$ n/shout count و با روش شمارش پس از دور کردن چشمه $K = (5/3 \pm 2/00) \times 10^7$ n/shout count به دست آمده است. بنابراین یکی از عوامل، خطای روش اندازه‌گیری است.

۴. وجود ناخالصی در پلی‌اتیلن و نقره‌ای که در آزمایش‌ها استفاده شده‌اند.

۵. عناصر پراکنده کننده نظیر دیوارها، هوا و سایر اجزای آزمایشگاه در محاسبات در نظر گرفته نشده است.

۶. در نظر نگرفتن اثر محافظه دستگاه پلاسمای کانونی بر روی انرژی نوترون‌های گسیل شده.

بنابراین اختلاف حدود ۹٪ بین نتایج محاسبه و تجربه با تمام تقریب‌های به کار رفته و نکات اشاره شده در فوق قابل پذیرش می‌باشد.

اگر بتوان با کدهای شبیه‌ساز دیگری مانند Geant4 یا FLUKA که امکان شبیه‌سازی واپاشی هسته‌های فعال تولید شده را دارند این شبیه‌سازی را انجام داد، نتایج بهتری به دست خواهد آمد. محاسبه ثابت کالیبراسیون یا به طور کلی شبیه‌سازی واکنش فعال‌سازی در بهینه‌سازی طراحی آشکارساز، هندسه

برای مدت $T_{CS} = 1000$ s برابر $N_{CS} = 24750 \pm 910$ به دست آمد. همچنین با انجام شمارش‌های G_{12} و G_{34} در بازه‌های زمانی ($T_{34} = T_4 - T_3$ ($T_3 = 140/2$ s و $T_4 = 380/2$ s و

$$T_{12} = T_2 - T_1 \quad (T_1 = 0/2 \text{ و } T_2 = 40/2 \text{ s})$$

مقدار $A_0 = 0/297 \pm 0/014$ اندازه‌گیری شد که با وارد کردن این اعداد در معادله (۱۳) به همراه $\lambda_1 = 4/794 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ و $\lambda_2 = 2/821 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ مقدار $\alpha = 0/691 \pm 0/062$ به دست می‌آید. در نهایت از رابطه (۱۱) ثابت کالیبراسیون به دست آمد: ثابت کالیبراسیون اندازه‌گیری شده عبارت است از:

$$K = (7/13 \pm 1/7) \times 10^5.$$

برای شبیه‌سازی شمارنده فعال‌سازی با پوشش نقره‌ای نیاز است که کد شبیه‌ساز مورد نظر امکان ترابرد نوترون‌های سریع و حرارتی، شبیه‌سازی واکنش (n, γ) در ورقه نقره، تولید و واپاشی ایزوتوپ‌های فعال ^{108}Ag و ^{110}Ag و تولید و ترابرد ذرات ثانویه بتا را داشته باشد. کد MCNP4C امکان شبیه‌سازی نوترون و واکنش (n, γ) را دارد اما شبیه‌سازی تولید و واپاشی ایزوتوپ‌های فعال را انجام نمی‌دهد. همچنین این کد ذرات بتا را ترابرد می‌کند. بنابراین برای استفاده از این کد در چنین محاسباتی لازم است که میزان تولید و مصرف ایزوتوپ‌های فعال برنامه‌ای جداگانه محاسبه و در ادامه وارد کد MCNP4C شود تا ترابرد ذرات بتا در آن انجام شود. در این مقاله با این رویکرد به محاسبه ثابت کالیبراسیون شمارنده فعال‌سازی با پوشش نقره‌ای پرداخته شد.

همان‌طور که اشاره شد ثابت کالیبراسیون برای شمارنده فعال‌سازی از دو طریق محاسبه با کد MCNP4C و اندازه‌گیری به روش شمارش در اشباع با چشمه نوترون Am-Be به ترتیب برابر با $7/84 \times 10^5$ و $7/13 \times 10^5$ به دست آمد که این اختلاف به دلیل‌های زیر قابل قبول است:

۱. طیف چشمه استفاده شده در اندازه‌گیری ثابت کالیبراسیون اهمیت به‌سزایی دارد. در محاسبه کالیبراسیون از چشمه تک انرژی ۲/۵ MeV استفاده شده

آزمایش و محاسبه پارامترهای مورد نیاز بدون انجام آزمایش‌های عملی، که هزینه‌بر و دارای مخاطرات پرتوگیری است، کمک بسیاری می‌نماید.

9. A Bernard, et al., *J. Moscow Phys. Soc.* **8** (1998) 93.
10. F G Knoll, *Radiation Detection and Mesurement*, John wiley and sons Inc., New York (2000).
11. Nicholas Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, Taylor & Francis, Washington (1983).
12. B Firestone Richard, *Table of Isotopes CD ROM Edition*, Version 1.0, Wiley Interscience, March (1996).
13. J F Briesmeister, *MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*, Version 4C, LA-13709M.
14. Gentilini Achille, et al., *Nucl. Inst. and Meth*, **172** (1980) 541.
1. N V Filippov, T I Filippova and V P Vinogradov, *Nuclear fusion suppl.* **2** (1962) 577.
2. J W Mather, *Phys. Fluid suppl.* **7** (1964) 5.
3. L Bertalot, et al., *Phys. Lett.* **79A** (1980) 389.
4. W Neff, et al., *Phys. Lett.* **79A** (1980) 165.
5. P Choi, C Deeney, H Herold, C S Wong, *Laser Part. Beams* **8** (1990) 469.
6. M Sadowski, in *Beams Proc. of 11th Int. Conf. on High Power Particle Beams*, Prague, **1** (1996) 170.
7. G D ecker, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **5** (1996) 112.
8. L Jakubowski, M Sadowski, E O Baronova, in *ICPP, Proc. of Int. Conf. Nagoya*, **2** (1996) 1326.