

## اندازه‌گیری فعالیت مطلق ورق طلا با استفاده از روش هم‌فرودی زمانی به منظور تعیین شار مطلق نوترون رآکتور صفر - قدرت

پروین کاویانی<sup>۱</sup>، نفیسه طهرانی<sup>۲\*</sup>

۱. پژوهشکده‌ی رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۹-۸۱۴۶۵، اصفهان - ایران

۲. پژوهشکده‌ی رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

### مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۳/۱۳

**چکیده:** در یک رآکتور صفر قدرت و به طور کلی در مجموعه‌های بحرانی برای انجام آزمایش‌ها، لازم است مقدار شار مطلق نوترون برای درجه‌بندی توان رآکتور مشخص باشد. اندازه‌گیری هم‌فرودی زمانی دو تابش  $\beta$  و  $\gamma$  ناشی از فعال‌سازی ورق طلا به‌عنوان یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری شار مطلق نوترون شناخته شده است. شار مطلق نوترون از فعالیت مطلق ورق طلا محاسبه می‌شود. پرتوهای بتا و گامای حاصل از نمونه‌ی طلای فعال شده در یک بازه‌ی زمانی کوتاه (حدود  $10^{-8}$  s) اندازه‌گیری می‌شوند. در این روش اندازه‌گیری شار، ورقه‌ی طلا در موقعیت موردنظر پرتودهی شده و سپس با اندازه‌گیری هم‌فرودی‌های زمانی تابش‌های بتا و گاما فعالیت مطلق ورقه‌ی طلا به‌دست می‌آید. گستره‌ی فعالیت قابل اندازه‌گیری نمونه  $10^2$ - $10^4$  Bq است. مزیت اصلی روش هم‌فرودی زمانی، وابستگی مستقیم بازده آشکارسازها به آهنگ شمارش‌ها است. با تغییر ولتاژ قوی آشکارساز بتا و در نتیجه تغییر بازده آن و اندازه‌گیری آهنگ‌های شمارش بتا، گاما و هم‌فرودی زمانی می‌توان نمودار تغییرات شمارش بتا را برحسب تغییرات بازده آشکارساز بتا رسم کرد. سپس با برون‌یابی بازده آشکارساز بتا به مقدار ۱، فعالیت مطلق ورق طلا محاسبه می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** شار مطلق نوترون، فعالیت مطلق، روش هم‌فرودی زمانی، ورق طلا

## Absolute activity of gold foil measurement using coincidence method to determine absolute neutron flux of zero power reactor

P. Kaviani<sup>1</sup>, N. Tehrani<sup>2\*</sup>

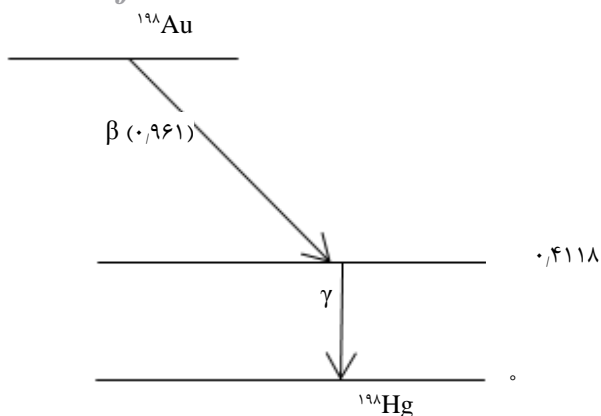
1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 81465-1589, Esfahan - Iran

2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

**Abstract:** To perform an effective experimental implementation in a zero- power reactor or more generally, critical assemblies, it is necessary to measure the total neutron flux to calibrate the reactor power. The  $4\pi\beta$ - $\gamma$  coincidence method via the activation of gold foil is a well known standard method for absolute neutron flux measurements. The absolute neutron flux is obtained by measuring the absolute activity of the irradiated gold foil, ranged in  $10^2$ - $10^4$  Bq. In this method, the gold foil is irradiated at the desired position. The beta, gamma, and the coincidence rates are by using the  $4\pi\beta$ - $\gamma$  coincidence system, and the absolute activity of gold foil is then obtained. The  $\beta$ - $\gamma$  rays emitted from the irradiated gold foil are recorded in a concise period of time (of the order  $10^{-8}$  seconds). The advantage of this method is that the efficiency of either detector is directly dependent on the counting rates. Changing the beta detector efficiency due to the high voltage change and then measuring the beta, gamma, and coincidence counting rates, the plot of beta counting rates against the beta detector efficiencies can be introduced. By extrapolating the efficiencies to a unit value, the absolute activity of the gold foil can be obtained.

**Keywords:** Absolute neutron flux, Absolute activity, Coincidence method, Gold foil

\*Email: nftehrani@aeoi.org.ir



شکل ۱. نمودار واپاشی طلا.

## ۱. مقدمه

کمیت اصلی در اندازه‌گیری شار مطلق نوترون، میزان واپاشی مطلق هسته‌ی پرتوزا است و چگالی شار نوترون در یک مکان، با اندازه‌گیری فعالیت ورق طلای پرتودهی شده در آن مکان به دست می‌آید. برای محاسبه‌ی فعالیت ورق طلا، از روش هم‌فرودی زمانی استفاده می‌شود. بدین منظور، ورق طلا در محلی که اندازه‌گیری شار مطلق در آن مورد نظر است، قرار گرفته و فعال می‌شود و سپس توسط سیستم هم‌فرودی زمانی  $\beta$ - $\gamma$ ، پرتوهای بتا، گاما و هم‌فرودی‌های ورق طلا شمارش می‌شوند. پس از شمارش و قبل از محاسبه‌ی فعالیت مطلق، لازم است تصحیح‌هایی بر روی شمارش‌ها انجام شود این تصحیح‌ها دو دسته‌اند [۱]:

۱. تصحیح‌های جزئی و قابل اغماض: اندازه‌ی چشمه، بستگی زاویه‌ای بین پرتوهای بتا و گاما، بازده آشکارساز گاما نسبت به پرتوهای بتا و اثر تابش ترمزی.
۲. تصحیح‌های قابل ملاحظه: زمان مرده، هم‌فرودی اتفاقی، بازده آشکارساز بتا نسبت به پرتوهای گاما، اثر تبدیل داخلی پرتو گاما و شمارش زمینه.

## ۲. تئوری

سیستم اندازه‌گیری فعالیت مطلق دارای دو شاخه‌ی مجزا برای اندازه‌گیری پرتو گاما و پرتوی بتای ورق فعال شده است. از آن‌جا که طلا نمودار واپاشی ساده‌ای دارد که در آن یک بتا و یک گامای تقریباً هم‌زمان گسیل می‌شود، برای اندازه‌گیری شار مطلق از ورق طلا استفاده می‌شود. هم‌چنین طلا ناخالصی کمی دارد و می‌توان آن را بسیار نازک ساخت. نمودار ساده‌شده‌ی واپاشی طلا مطابق شکل ۱ است. فعالیت هر میلی‌گرم از ورق بسیار نازک از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲، ۳]:

$$D_0 = N \hat{\sigma} \phi \quad (1)$$

که در آن،  $N$  تعداد اتم‌ها در یک میلی‌گرم از ورق طلا ( $N = \frac{m}{A} N_A$  که در آن  $N_A$  عدد آووگادو است)،  $\phi$  شار نوترون و  $\hat{\sigma}$  سطح مقطع مؤثر جذب نوترون ( $\hat{\sigma} = \sigma_0 (g + r\pi)$ ) است. در این‌جا  $\sigma_0$  سطح مقطع جذب نوترون گرمایی،  $g$  و  $s$  ضریب تصحیح انحراف از سطح مقطع جذب  $\frac{1}{v}$  در گستره‌ی انرژی به ترتیب، گرمایی و فوق‌گرمایی، و  $r$  شاخص فوق‌گرمایی است.

ورقی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت بسیار نازک نبود، بنابراین رابطه‌ی ۱ نیاز به تصحیح‌هایی برای ضخامت ورق دارد و باید اثر خود حفاظی و کاهش شار را نیز در نظر گرفت. بنابراین،

$$\phi = \frac{1}{F} \frac{(D_0 - D_{cd} F_{cd})}{N \hat{\sigma}} \frac{R}{R-1} \quad (2)$$

که در آن  $D_0$  فعالیت حاصل از کل نوترون‌ها،  $D_{cd}$  فعالیت حاصل از نوترون‌های فوق‌گرمایی،  $F$  عامل تصحیح کاهش شار و اثر خود حفاظی و  $F_{cd}$  عامل تصحیح تضعیف نوترون‌های تند در کادمیم، و  $R$  نسبت کادمیم است.

نسبت کادمیم ( $R$ ) با پرتودهی ورق طلا با پوشش کادمیم و بار دیگر با پوشش آلومینیم، قابل اندازه‌گیری است. با اندازه‌گیری  $R$  برای ورق طلا می‌توان  $r$  (شاخص فوق‌گرمایی) را نیز محاسبه نمود. مقادیر  $s$  و  $g$  را از جدول‌های سطح مقطع وستکات به دست آورده، با در دست داشتن ضخامت ورق طلا و ضخامت پوشش کادمیم استفاده شده نیز می‌توان  $F$  و  $F_{cd}$  را از جدول‌های مربوطه به دست آورد. برای ورق  $1/v$ ،  $s = 0$  و  $g = 1$  است و برای طیف ماکسولی  $r = 0$  است [۴]. به این ترتیب با اندازه‌گیری فعالیت ورق طلا توسط مدار هم‌فرودی و جای‌گذاری مقادیر آن در رابطه‌ی (۲) شار نوترون قابل محاسبه است. این مقاله به روش اندازه‌گیری فعالیت حاصل از شار کل نوترون‌ها می‌پردازد.

اگر  $D$  فعالیت مطلق،  $N_\beta$ ،  $N_\gamma$  و  $N_c$  تعداد شمارش در کانال بتا، کانال گاما و کانال هم‌فرودی زمانی پس از تصحیح

که در آن  $N_c^\circ = (N'_c - N_{cb})$  تعداد هم‌فرودی‌های ثبت شده است که هم‌فرودی‌های تصادفی را نیز در بر می‌گیرد،  $N_{cb}$ ،  $N_{\beta b}$  و  $N_{\gamma b}$  به ترتیب شمارش زمینه‌ی کانال هم‌فرودی، بتا و گاما،  $N'_c$ ،  $N'_{\beta}$  و  $N'_{\gamma}$  شمارش اصلی کانال هم‌فرودی، بتا و گاما،  $\tau_d$  و  $\tau_R$  زمان تفکیک و زمان مرده‌ی سیستم هستند. در موقع شمارش پرتوزایی ورق طلا، باید اثر تبدیل داخلی و نیز گاما‌های شمارش شده توسط آشکارساز بتا لحاظ شوند، در این شرایط  $\epsilon_\beta < 1$  است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داد شده است در اتم طلا پس از تابش بتا یک گاما هم‌گسیل می‌شود. با ملاحظه‌ی اثر تبدیل داخلی داریم:

$$N_\beta = D_0 \left[ \epsilon_\beta + \frac{\alpha \epsilon_{ce} + \epsilon_{\beta\gamma}}{1 + \alpha} (1 - \epsilon_\beta) \right] \quad (5)$$

$$N_\gamma = D_0 \frac{\epsilon_\gamma}{1 + \alpha} \quad (6)$$

$$N_c = D_0 \left[ \frac{\epsilon_\beta - \epsilon_\gamma}{1 + \alpha} + \frac{(1 - \epsilon_\beta) \epsilon_c}{1 + \alpha} \right] \quad (7)$$

در این جا  $\alpha = \lambda_e / \lambda_\gamma$  ضریب تبدیل داخلی کل،  $\epsilon_{ce}$  بازده آشکارساز  $\beta$  برای الکترون‌های تبدیل داخلی،  $\epsilon_{\beta\gamma}$  بازده آشکارساز  $\beta$  برای پرتو گاما و  $\epsilon_c$  بازده شمارش هم‌فرودی‌ها در شرایطی هستند که ذرات  $\beta$  اندازه‌گیری نشده‌اند. در رابطه‌ی (۵) جمله اول، شمارش  $\beta$ ، جمله‌ی دوم شمارش الکترون‌های تبدیل داخلی و جمله‌ی سوم شمارش پرتوهای گاما توسط آشکارساز  $\beta$  است. در صورتی که  $\epsilon_c$  خیلی کوچک در نظر گرفته شود، جمله‌ی دوم رابطه‌ی (۷) حذف می‌شود و با جای‌گذاری و ترکیب سه رابطه‌ی آخر داریم:

$$\frac{N_\beta \cdot N_\gamma}{N_c} = D [1 + K] \quad (8)$$

که در آن،  $K = m \left( \frac{1 - \epsilon_\beta}{\epsilon_\beta} \right)$  نسبت شمارش‌های گاما و تبدیل داخلی به شمارش‌های بتا در آشکارساز  $\beta$ ،  $m = \frac{\alpha \epsilon_{ce} + \epsilon_{\beta\gamma}}{1 + \alpha}$  شمارش گاما توسط آشکارساز  $\beta$  است.

زمینه، زمان مرده‌ی سیستم، نیم-عمر، هم‌فرودی تصادفی، و  $\epsilon_\beta$ ،  $\epsilon_\gamma$  بازده آشکارسازهای گاما و بتا باشند [۴، ۵]، آن‌گاه:

$$\begin{aligned} N_\beta &= D_0 \cdot \epsilon_\beta \\ N_\gamma &= D_0 \cdot \epsilon_\beta \cdot \epsilon_\gamma \\ N_c &= D_0 \cdot \epsilon_\beta \cdot \epsilon_\gamma \\ D &= \frac{N_\beta \cdot N_\gamma}{N_c} \end{aligned} \quad (3)$$

البته باید توجه داشت که این رابطه تنها برای آشکارساز  $\beta$  با بازده ۱۰۰٪ صحیح است. در این شرایط اکثر تصحیح‌ها، کوچک و قابل صرف‌نظر کردن هستند. اما بازده آشکارساز  $\beta$  عملاً کم‌تر از ۱۰۰٪ بوده و لازم است تصحیح‌های زیر اعمال شوند [۶]:

**زمان مرده‌ی سیستم:** برای این که بتوان دو رویداد متوالی را در سیستم شمارش به صورت مجزا ثبت نمود نیاز به حداقل بازه‌ی زمانی است که به آن زمان مرده‌ی سیستم گویند. هنگامی که رویداد اول ثبت می‌شود، در صورتی که رویداد دوم در این بازه‌ی زمانی (زمان مرده‌ی سیستم) اتفاق بیفتد، این رویداد ثبت نمی‌شود [۷].

**هم‌فرودی تصادفی:** به‌علت پهنای زمانی، تپ‌های ایجاد شده از هر آشکارساز در شمارگر مدار هم‌فرودی ثبت می‌شود. برای به دست آوردن هم‌فرودی‌های واقعی باید هم‌فرودی‌های تصادفی را از شمارش‌های ثبت شده در کانال هم‌فرودی کم نمود.

**شمارش زمینه:** شمارش زمینه در هر یک از آشکارسازها باعث می‌شود در شمارش مدار هم‌فرودی نیز شمارشی ثبت شود.

**اثر تبدیل داخلی:** این اثر شمارش آشکارساز گاما را کم و شمارش آشکارساز بتا را زیاد می‌کند و لازم است تصحیح شود. در صورتی که زمان مرده‌ی دو سیستم بتا و گاما یکسان در نظر گرفته شود و تأثیر تصحیح زمان مرده‌ی سیستم، هم‌فرودی‌های تصادفی و زمینه مورد توجه قرار گیرد، رابطه‌ی ۳ به رابطه‌ی زیر تبدیل می‌شود [۲، ۸]:

$$D = \frac{(N'_\beta - N_{\beta b}) (N'_\gamma - N_{\gamma b}) [1 - \tau_R (N'_\beta + N'_\gamma)]}{(N_c^\circ - \tau_R N'_\beta N'_\gamma) (1 - N_c \tau_d)} \quad (4)$$

تصحیح‌های لازم اعمال و با رسم منحنی تغییرات  $N_{\beta_i} \cdot N_{\gamma_i} / N_{ci}$  برحسب  $1 - \epsilon_{\beta} / \epsilon_{\beta}$ ، آهنگ واپاشی مطلق ورق طلا، و با استفاده از رابطه‌ی ۲ شار مطلق نوترون در محل قرارگیری ورق طلا محاسبه شده است [۴].

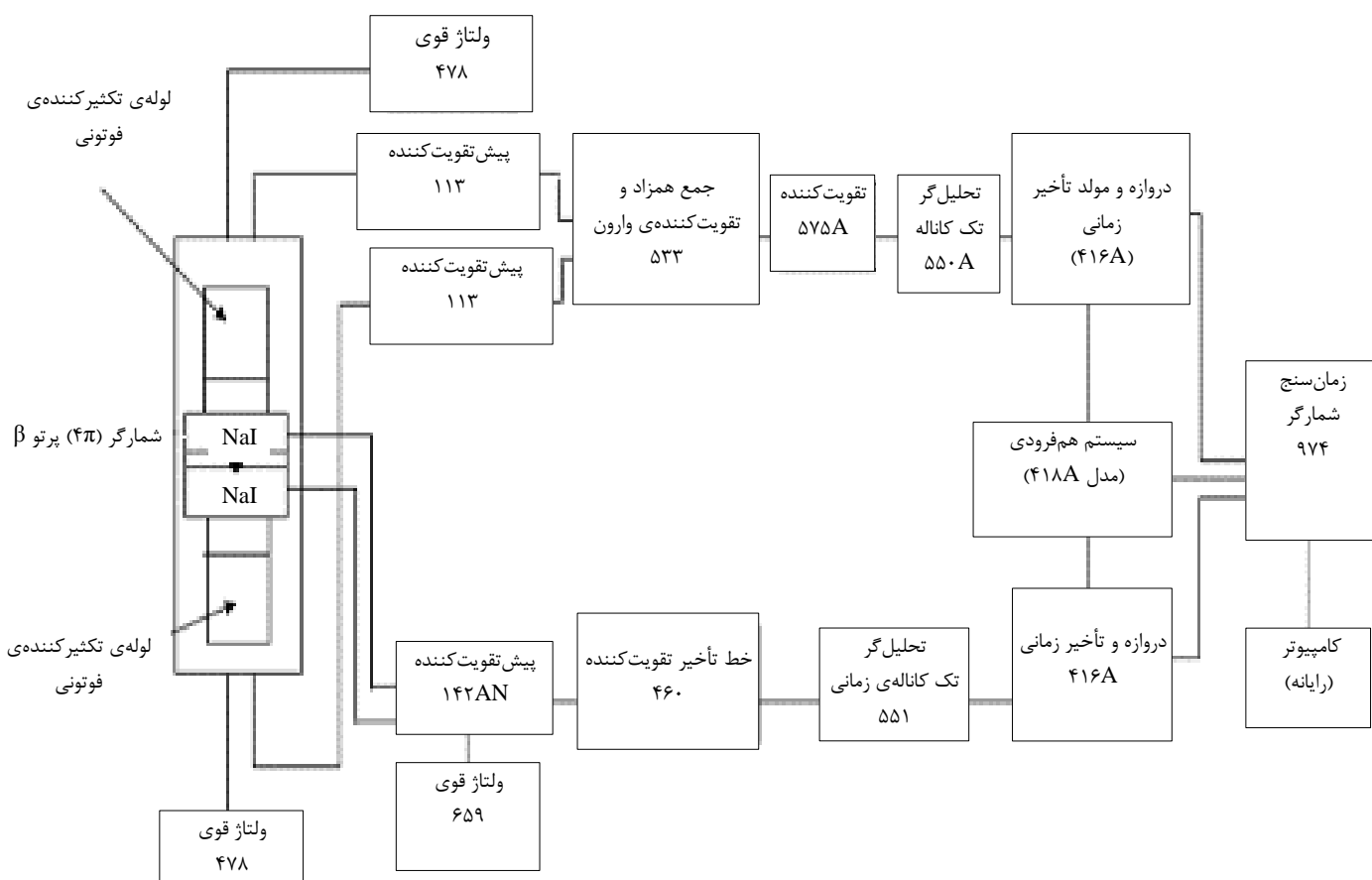
۱.۳ مدار هم‌فرودی زمانی

مدار هم‌فرودی زمانی  $\beta$ - $\gamma$  شامل یک آشکارساز بتای  $4\pi$  و دو آشکارساز گاما در دو طرف آن است. ورق طلای فعال شده، داخل آشکارساز بتا قرار می‌گیرد و تابش‌های بتای ناشی از آن توسط آشکارساز بتا و تابش‌های گامای آن هر یک جداگانه توسط آشکارسازهای گاما شمارش می‌شوند. با تنظیمات سیستم الکترونیکی که شرح آن در ادامه خواهد آمد، تابش‌های بتا و گامای هم‌زمان توسط مدار هم‌فرودی زمانی شمارش می‌شوند. شکل ۲ طرح‌واره‌ی مدار هم‌فرودی زمانی را نشان می‌دهد [۹].

اگر در رابطه‌ی (۸)،  $\epsilon_{\beta} = 1$  قرار داده شود، آن‌گاه  $N_{\beta} \cdot N_{\gamma} / N_c = D$  می‌شود و این به این معنا است که با برون‌یابی منحنی تغییرات  $N_{\beta} \cdot N_{\gamma} / N_c$  برحسب  $(1 - \epsilon_{\beta}) / \epsilon_{\beta}$  می‌توان مقدار D را تعیین کرد [۴، ۸].

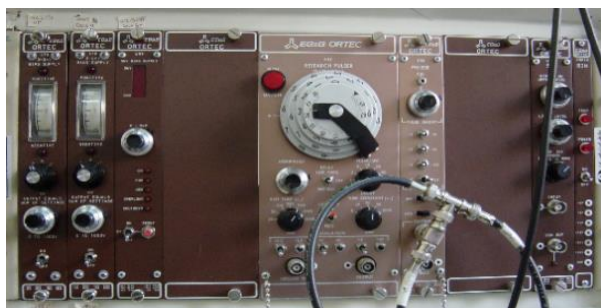
۳. روش انجام آزمایش

در این اندازه‌گیری که در سال‌های گذشته برای اندازه‌گیری شار مطلق نوترون در رآکتور صفر قدرت آب سنگین اصفهان انجام شده است، شمارش‌های بتا، گاما ناشی از ورق طلا با روش هم‌فرودی زمانی ثبت و سپس با جای‌گذاری زمان مرده‌ی سیستم، هم‌فرودی‌های تصادفی و شمارش زمینه در رابطه‌ی ۴ فعالیت ورق طلا با فرض بازده ۱۰۰٪ آشکارساز بتا محاسبه شده است. از آن‌جا که بازده آشکارساز بتا در عمل ۱۰۰٪ نیست پس از ثبت شمارش‌ها، زمان واپاشی ورق طلای فعال شده و



شکل ۲. طرح‌واره‌ی مدار هم‌فرودی زمانی.

هم‌فرودی زمانی، یک تپ در خروجی مشاهده می‌شود. بنابراین در صورت تنظیم بودن سیستم، در شرایطی که نمونه واپاشی می‌کند، یک علامت در مدار بتا و یک علامت در مدار گاما و یک علامت هم‌فرودی زمانی در خروجی سیستم هم‌فرودی خواهیم داشت. این سه علامت وارد زمان‌سنج و شمارگر می‌شوند. این شمارگر دارای سه ورودی است که علاوه بر نشان دادن شمارش‌های کانال بتا، کانال گاما و شمارش هم‌فرودی زمانی، زمان را تا دهم ثانیه نشان می‌دهد. شکل ۳ الف و ب سیستم الکترونیکی استفاده شده و شکل ۳ ج آشکارسازهای استفاده شده را نشان می‌دهند که داخل سرب هستند. از شمارش  $N_B$  و  $N_\gamma$  و  $N_c$  براساس رابطه‌های ذکر شده می‌توان فعالیت ورق طلا و نهایتاً شار مطلق نوترون در محل پرتودهی ورق طلا را به دست آورد [۱۰].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. مدار هم‌فرودی زمانی  $\beta$ - $\gamma$ .

**شاخه‌ی گاما:** در بالا و پایین آشکارساز بتا، دو آشکارساز گاما (یدور سدیم) قرار گرفته است. مقدار نوری که در سوسوزن تولید می‌شود بسیار اندک است و پیش از آن که بتوان آن را به صورت یک تپ یا هر روش دیگری نگاشت باید تقویت شود. تقویت یا تکثیر نور سوسوزن توسط لوله‌ی تکثیرکننده‌ی فوتونی<sup>۱</sup> (PMT) صورت می‌گیرد. هدف از به کار بردن پیش‌تقویت‌کننده در این مدار، ایجاد جفت‌شدگی بین خروجی آشکارساز و سایر قسمت‌های مدار است. پس از این که علامت‌های به دست آمده از آشکارسازهای گاما از پیش‌تقویت‌کننده عبور کرد وارد Dual Sum and invert Amplifier شده و با هم جمع می‌شوند و پس از تقویت علامت، وارد تحلیل‌گر تک کاناله<sup>۲</sup> (SCA) می‌شوند.

**شاخه‌ی بتا:** این بخش از مدار هم‌فرودی شامل یک آشکارساز بتای  $4\pi$  است. یعنی دو آشکارساز نیم استوانه‌ای تناسبی که بر روی هم قرار گرفته و نمونه در بین آن‌ها وارد می‌شود. برای این که مقدار گاز داخل آشکارساز ثابت بماند، گاز متان با فشار ثابت ۱۰ barn وارد آن شده و از سمت دیگر آن خارج می‌شود. علامت‌های تولید شده در آشکارساز بتا وارد پیش‌تقویت‌کننده می‌شود. نقش پیش‌تقویت‌کننده افزایش تطابق بین خروجی آشکارساز با سایر قسمت‌های مدار و کاهش نوفه است. علامت خروجی پیش‌تقویت‌کننده وارد تقویت‌کننده می‌شود. تقویت‌کننده به گونه‌ای طراحی شده است که می‌تواند تأخیر لازم برای علامت ورودی را ایجاد کند. واپاشی اتم (هسته‌ی) طلا با گسیل تقریباً هم‌زمان پرتوهای بتا و گاما همراه است. تفاوت طول کابل‌ها و سایر تجهیزها در مسیر علامت‌های گاما و بتا باعث می‌شود که این دو علامت به‌طور هم‌زمان ثبت نشوند. به منظور هم‌فرود کردن زمانی دو رویداد بتا و گاما، تأخیر زمانی توسط تقویت‌کننده‌ی مدل ۴۶۰ اعمال می‌شود. برای هم‌زمان کردن دو شاخه‌ی بتا و گاما، از یک تپ‌ساز استفاده می‌شود. سپس علامت بتا وارد تحلیل‌گر تک کاناله (SCA) می‌شود که دارای دو سطح بالا<sup>۳</sup> (U.L) و سطح پایین<sup>۴</sup> (L.L) است. با استفاده از این وسیله می‌توان تأخیری نیز در علامت ایجاد نمود. در صورت نیاز به تأخیر بیش‌تر باید از دروازه و مولد تأخیر<sup>۵</sup> استفاده نمود.

**هم‌فرودی زمانی:** پس از تقویت علامت‌های بتا و گاما و انتخاب تپ‌هایی با انرژی مناسب توسط تحلیل‌گر تک کاناله، علامت‌های بتا و گاما وارد سیستم هم‌فرودی می‌شوند. در صورت وقوع

4. Lower level  
5. Timing single channel analyzer

1. Photo Multiplier Tube  
2. Single Channel Analyzer  
3. Upper level

## ۲.۲ آزمایش

زمانی هر شاخه، شمارش کانال بتا، گاما و هم‌فرودی زمانی باید یکسان شود. برای اندازه‌گیری هم‌فرودی تصادفی، پس از هم‌فرود کردن علامت‌های ناشی از دو پرتو بتا و گاما، تأخیری در یکی از شاخه‌ها ایجاد شد تا هم‌فرودی واقعی وجود نداشته باشد، در این صورت شمارش‌های ثبت شده در مدار هم‌فرودی، شمارش‌های هم‌فرودی تصادفی هستند که باید از مقدار شمارش هم‌فرودی کل کم شوند. برای حذف علامت‌های اضافی، نظیر علامت تابش زمینه در شاخه‌ی گاما نیز، خروجی تقویت‌کننده‌ی ۴۶۰ در دو مسیر مجزا پس از عبور از تقویت‌کننده - خط تأخیر و تحلیل‌گر تک‌کاناله‌ی زمانی<sup>۱</sup> وارد کانال ۱ و کانال ۲ اسیلوسکوپ می‌شد. توسط تقویت‌کننده - خط تأخیر تأخیری در یک مسیر از مدار ایجاد می‌شد، سپس با تغییر سطح بالا و سطح پایین تحلیل‌گر تک‌کاناله انرژی‌ها و علامت‌های اضافی با مشاهده بر صفحه‌ی اسیلوسکوپ می‌توانستند حذف شود. برای تعیین زمینه لازم بود قبل از قرار گرفتن ورق در سیستم شمارش، زمینه‌ی هر یک از کانال‌های بتا، گاما و هم‌فرودی زمانی شمارش شود. به این ترتیب پارامترهایی که برای تصحیح شمارش‌ها لازم بود، اندازه‌گیری می‌شدند. آن‌گاه ورق طلای فعال شده، در داخل سیستم قرار گرفته، با تغییر ولتاژ قوی<sup>۲</sup> سیستم شمارنده‌ی بتا (تغییر بازده آشکارساز بتا)،  $N_\beta$ ،  $N_\gamma$  و  $N_c$  ثبت می‌شدند. سپس این مقادیر را در رابطه‌ی (۴) جای‌گزاری شده و فعالیت برای هر حالت محاسبه می‌شد. لازم به ذکر است که سایر پارامترها از جمله زمان مرده و شمارش زمینه در این رابطه در نظر گرفته می‌شدند.  $\epsilon_\beta = N_c / N_\gamma$  (نتیجه‌ی رابطه‌ی ۳) نیز محاسبه و  $(1 - \epsilon_\beta) / \epsilon_\beta$  به دست می‌آمد.

با تغییر بازده آشکارساز بتا، رابطه‌ی بین فعالیت و  $(1 - \epsilon_\beta) / \epsilon_\beta$  به دست آمد. در صورت نزدیک شدن  $\epsilon_\beta$  به مقدار واحد، فعالیت به سمت  $D_0$  یعنی فعالیت مطلق میل می‌کند و با روش برون‌یابی می‌توان  $D_0$  را محاسبه نمود. نمودار این تغییرات و هم‌چنین مناسب‌ترین تابع نمایی در شکل ۴ نشان داده شده است. به این ترتیب فعالیت مطلق ورق طلای پرتودهی

به‌منظور محاسبه‌ی فعالیت مطلق ورق طلایی که برای مدت زمان مشخصی در محل اندازه‌گیری شار نوترون پرتودهی شده، درجه‌بندی و تنظیمات هم‌فرودی زمانی (شکل‌های ۲ و ۳) انجام، و شمارش پرتوهای بتا، گاما و هم‌فرودی زمانی ناشی از ورق طلای فعال شده ثبت شد [۱۱].

برای تعیین زمان مرده‌ی کل سیستم، در مدار شکل ۲، خروجی تقویت‌کننده‌ی ۴۶۰ بر روی کانال اسیلوسکوپ مشاهده و با تغییر پتانسیومتر (تأخیر) بر روی تقویت‌کننده، تأخیر تپ خروجی نسبت به تپ ورودی مشاهده شد. تأخیر زمانی از کم‌ترین مقدار یعنی  $0.1 \mu s$  به تدریج افزایش یافته و در هر مرحله، شمارش مربوطه ثبت شد. از آن‌جا که هر آشکارساز و مدار الکترونیکی آن (تا قبل از تقویت‌کننده‌ی ۴۶۰) دارای زمان مرده‌ی متفاوتی است و در هر سیستم، همیشه زمان مرده‌ی بزرگ‌تر غالب است، تا زمانی‌که تأخیر زمانی، معادل با زمان مرده‌ی سیستم شود، شمارش‌ها ثابت است، یعنی افزایش تأخیر زمانی تأثیری بر شمارش ندارد. اما پس از آن با افزایش تأخیر زمانی، مقدار شمارش‌ها کاهش می‌یابد. اگر زمان مرده‌ی آشکارساز بیش‌تر از زمان مرده‌ی سیستم الکترونیکی باشد، زمان مرده‌ی کل سیستم، همان زمان مرده‌ی آشکارساز خواهد بود و افزایش تأخیر زمانی تأثیری بر شمارش‌ها نخواهد داشت. اما زمانی‌که تأخیر زمانی بزرگ‌تر از زمان مرده‌ی آشکارساز شود، زمان مرده‌ی کل سیستم، برابر با مقدار تأخیر زمانی است. برای سیستم شکل ۲، زمان مرده‌ی کل سیستم  $1.02 \mu s$  اندازه‌گیری شد [۱۰].

از آن‌جایی که مشخصه‌های اجزا و مدارهای الکترونیکی مورد استفاده در شاخه‌ی بتا و گاما متفاوت بود، علامت‌های هم‌فرود نیز با تأخیر زمانی کمی وارد مدار هم‌فرودی می‌شدند. به منظور جبران تأخیر زمانی در دو شاخه‌ی بتا و گاما، به جای خروجی آشکارسازها، خروجی یک تپ‌ساز به ورودی تقویت‌کننده‌های بتا و گاما متصل و ارتفاع تپ طوری تنظیم شد که در گستره‌ی انرژی موردنظر قرار گیرد. با ایجاد تغییر در تأخیر

2. High voltage

1. Timing single channel analyzer

#### ۴. نتیجه‌گیری

از داده‌های جدول ۱، مشاهده می‌شود که نتیجه‌های اندازه‌گیری با روش هم‌فرودی زمانی با تقریب خوبی با روش‌های تجربی مطابقت دارد. بنابراین روش اندازه‌گیری فعالیت مطلق ورق طلا قابل قبول و معتبر است. به این ترتیب با اندازه‌گیری فعالیت مطلق در موقعیتی که شار مطلق در آن مورد نظر است، همان‌طور که در قسمت تئوری در رابطه‌ی ۲ توضیح داده شد، شار مطلق قابل محاسبه است. برای محاسبه‌ی شار مطلق نوترون لازم است، نسبت کادمیم اندازه‌گیری و سایر پارامترها از جداول مربوطه استخراج شوند، که در حوصله‌ی این مقاله نمی‌گنجد.

#### مراجع

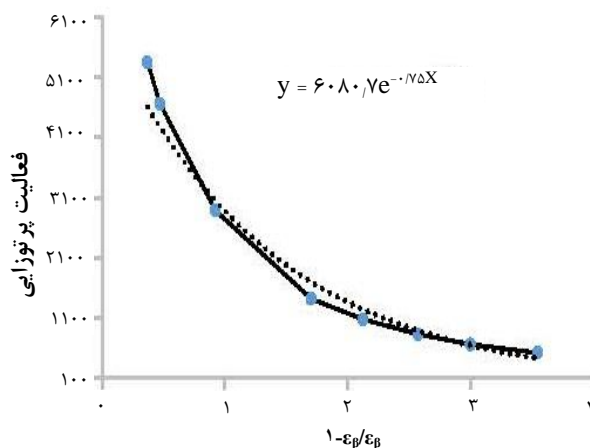
1. J.F. RAFFLE, DETERMINATION OF ABSOLUTE NEUTRON FLUX BY GOLD ACTIVATION, J. NUCL. ENERGY, Part A: Reactor Science. 10, 8 (1959).
2. P.J. CAMPION, The Standardisation of Radioisotopes by the Beta-Gamma Coincidence Method Using High Efficiency Detectors, (Nuclear Physics Branch Atomic Energy of Canada, 1958).
3. J. THOMAS, THEORETICAL ANALYSIS OF THE  $4\pi\beta\text{-}\gamma$  COINCIDENCE METHOD, PHYSICS LABORATORY I, TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK.
4. Y. Gao, D. Hu,  $4\mu\beta\text{-}\gamma$  coincidence equipment installation and commissioning program, (1993).
5. H. MENKE, ABSOLUTE COUNTING OF THICK SOURCES BY THE  $4\pi\beta\text{-}\gamma$  COINCIDENCE METHOD, (Mainz, Germany, 1960).
6. J. BARNOTHY, Coincidence Methods of Measuring Disintegration Rate of Radioactive Sources, The Review of Scientific Instruments. 2, 415 (1950).
7. J.P. PEROLAT, SOME SPECIAL PROBLEMS IN COINCIDENCE MEASUREMENT, NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS. 12, 143 (1973).
8. A.P. BAERG, THE EFFICIENCY EXTRAPOLATION METHOD IN COINCIDENCE CONTING, NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS. 12, 179 (1973).
9. Y. Gao, Absolute Neutron Flux Measurement Technique and Data Processing Code, TECHNICAL TRANSFER DOCUMENT, (1993).
10. P. Kaviani, N. Tehrani, M. Moubed, Basic of Absolute Activity Calculation by Coincidence Method, Esfahan Nuclear Technology Center, (1998).
11. Y. GAO,  $4\pi\beta\text{-}\gamma$  COINCIDENCE SYSTEM, OPERATION GUIDE, (China Institute of Atomic Energy, 1993).
12. P.J. CAMPION, Int. J. Appl. Rad. Isotopes. 4, 232 (1959).

شده محاسبه شد. برای اطمینان از صحت محاسبه‌ها، نتیجه‌های مقدارهای به دست آمده با بعضی از رابطه‌های تجربی، در جدول ۱ مقایسه شده است [۱۰]. دو رابطه‌ی تقریبی استفاده شده، عبارت‌اند از [۱۲]:

$$\frac{N_{\beta} \cdot N_{\gamma}}{N_c} = D_0 (1 - N_c \tau_D) \quad (9)$$

$$\frac{N_{\beta} \cdot N_{\gamma}}{N_c} = D_0 (1 - N_{\gamma} \tau_D) \quad (10)$$

در این آزمایش، بازده آشکارساز گاما برابر با ۰/۱۱ بود [۱۰].



شکل ۴. رابطه‌ی بین فعالیت و  $(1-\epsilon_{\beta})/\epsilon_{\beta}$ .

جدول ۱. مقایسه‌ی مقدارهای فعالیت مطلق حاصل از سه روش محاسبه [۱۰]

آهنگ شمارش زمینه‌ی بتا	آهنگ شمارش خالص بتا	$\epsilon_{\beta}$	$D_0$ تصحیح شده برای زمان واپاشی		
			رابطه‌ی ۴	رابطه‌ی ۹	رابطه‌ی ۱۰
۸	۴۳۲۸	۰/۷۳	۶۱۰۹/۳۹	۶۱۰۹/۱۹	۶۱۱۱/۱۱
۶	۴۰۴۹	۰/۶۸	۶۱۳۱/۵۴	۶۱۳۱/۲۶	۶۱۳۳/۵۳
۵	۳۲۷۸	۰/۵۲	۶۲۰۸/۲۳	۶۵۰۷/۸۵	۶۲۱۱/۲۳
۳	۲۲۶۰	۰/۳۷	۶۳۲۴/۲۹	۶۳۲۳/۹۱	۶۳۲۸/۴۸
۱	۱۹۷۹	۰/۳۲	۶۳۷۰/۳۱	۶۳۷۰/۱۴	۶۳۷۵/۰۹
۱	۱۷۳۸	۰/۲۸	۶۴۲۳/۲۴	۶۴۲۳/۸۴	۶۴۲۸/۱۲
۰	۱۵۵۶	۰/۲۵	۶۴۶۱/۲۵	۶۴۶۰/۶۱	۶۴۶۶/۱۲
۰	۱۳۸۷	۰/۲۲	۶۵۲۰/۶۶	۶۵۲۰/۱۵	۶۵۲۵/۹۳
			۶۰۸۰/۶۷	۶۰۸۰/۴۶	۶۰۸۲/۴۳

اختلاف نتیجه‌ها در این جدول کم‌تر از ۴٪ است.