



## شرایط تجربی مناسب برای اندازه‌گیری سطح مقطع دیفرانسیلی واکنش‌های گسیل پرتو گاما ذره - القایی در شتاب‌دهنده واندوگراف تهران

علیرضا جوکار<sup>\*</sup>، امیدرضا کاکویی، محمد لامعی رشتی

پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران-ایران  
\*Email: ajowkar@aeoi.org.ir

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۶/۲

### چکیده

هدف از این پژوهش، اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی مؤثر بر سطح مقطع دیفرانسیلی واکنش‌های گسیل پرتو گاما ذره - القایی در خط باریکه  $45^\circ$  راست شتاب‌دهنده واندوگراف است. ثابت مدرج‌سازی، ارتباط بین انرژی ذره و فرکانس NMR، با استفاده از واکنش‌های هسته‌ای مناسب تعیین شد. نمودار بازده مطلق آشکارساز HPGe در بازه ۶۰ تا ۱۰۸۰۰ keV با استفاده از پرتوهای گامای حاصل از چشمه‌های پرتوای استاندارد و پرتوهای گامای آبخاری حاصل از واکنش‌های گیراندازی پروتون به دست آمد. زاویه فضایی آشکارساز ذرات باردار با استفاده از دو روش متفاوت تعیین شد. با استفاده از طیف‌های ذرات پس‌پراکنده، جریان باریکه و تعداد هسته‌های هدف اندازه‌گیری شدند. هم‌چنین در مورد کاهش زمینه آزمایشگاه و شناسایی قله‌های مزاحم حاصل از واکنش‌های القایی با نوترون بحث شد. با ایجاد شرایط آزمایشگاهی مطلوب، عدم قطعیت سیستماتیک برای اندازه‌گیری سطح مقطع، کم‌تر از ۹٪ تخمین زده شد.

**کلیدواژه‌ها:** شتاب‌دهنده واندوگراف، واکنش‌های گسیل پرتو گاما ذره - القایی، سطح مقطع دیفرانسیلی

## Favorable experimental conditions for differential cross-section measurement of PIGE reactions using the van de graaff accelerator of Tehran

A. Jokat<sup>\*</sup>, O. Kakuee, M. Lamehi-Rachti

Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran

### Research Article

Received 18.4.2020, Accepted 23.8.2020

### Abstract

The present research aims to measure the physical parameters affecting the differential cross-sections of PIGE reactions in the  $45^\circ$ R beamline of the Van de Graaff accelerator. The calibration coefficient, the correlation between particle energy and NMR frequency, was determined using the relevant nuclear reactions. The absolute efficiency of the HPGe detector within the energy range of 60 to 10800 keV was obtained using the gamma rays of the standard radioactive sources and the cascade gamma rays due to the proton capture reactions. Two different techniques determined the solid angle of the charged particle detector. Using the backscattered particles' spectra, the beam current and the number of target nuclei were calculated. Also, the necessity for reducing the laboratory background and identifying the undesired peaks due to neutron-induced reactions was discussed. Under favorable experimental conditions, the systematic uncertainty for cross-section measurement was estimated to be less than 9%.

**Keywords:** Van de graaff accelerator, Particle induced gamma-ray emission, Differential cross section.



## ۱. مقدمه

دقیق‌تر و امکان آنالیز مطلق، دستیابی به مقادیر دقیق و قابل اعتماد داده‌های سطح مقطع الزامی می‌باشد. تعدادی از داده‌های سطح مقطع در گزارش‌ها و نشریه‌های فیزیک هسته‌ای و تعدادی دیگر در کتابخانه داده‌های پایه برای آنالیز با باریکه یونی IBANDL و کتابخانه داده تجربی واکنش‌های هسته‌ای EXFOR ارائه شده است [۵، ۶]. با این حال با توجه به پراکندگی و کافی نبودن داده‌ها برای بعضی عناصر، ضرورت اندازه‌گیری مقادیر جدید و دقیق‌تر سطح مقطع احساس می‌شود. سطح مقطع معیاری است که احتمال نسبی وقوع واکنش را نشان می‌دهد. هرگاه برای ثبت ذرات خروجی حاصل از واکنش هسته‌ای از یک آشکارساز در زاویه  $(\theta, \varphi)$  نسبت به راستای باریکه استفاده گردد، آشکارساز از دید هسته هدف با زاویه فضایی  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$  تعریف می‌شود. در این چیدمان آزمایش، که تنها کسر کوچکی از زاویه فضایی را در برمی‌گیرد، سطح مقطع اندازه‌گیری شده از نوع دیفرانسیلی خواهد بود.

پارامترهای فیزیکی مؤثر بر اندازه‌گیری سطح مقطع دیفرانسیلی واکنش‌های PIGE شامل انرژی باریکه، جریان باریکه، بهره مطلق آشکارساز پرتو گاما، زاویه فضایی آشکارساز ذرات و تعداد هسته‌های هدف می‌باشند. بجز جریان باریکه و بهره مطلق آشکارساز پرتو گاما، که هم‌زمان با آزمایش سطح مقطع تعیین می‌شوند، پارامترهای دیگر را باید قبل از شروع آزمایش و با دقت بالا اندازه‌گیری نمود.

هدف این پژوهش، تعیین پارامترهای مؤثر بر اندازه‌گیری سطح مقطع واکنش‌های PIGE با باریکه p یا d و ایجاد شرایط تجربی مناسب برای شروع آزمایش در خط باریکه  $45^\circ$  راست شتاب‌دهنده ۳ MV واندوگراف تهران است.

## ۲. چیدمان آزمایش

تمام اندازه‌گیری‌های سطح مقطع در خط باریکه  $45^\circ$  راست شتاب‌دهنده انجام شده است. شکل ۱ چیدمان به‌کار رفته برای این آزمایش را نشان می‌دهد. در این چیدمان، طیف‌های گاما و ذرات پس‌پراکنده به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری شده‌اند. برای جمع‌آوری طیف‌های گاما، از یک آشکارساز ژرمانیم فوق‌خالص نوع P استفاده شد. اندازه بلور این آشکارساز  $6.58\text{cm} \times 6.58\text{cm}$  و حجم فعال آن  $213\text{ cm}^3$  می‌باشد. آشکارساز در زاویه  $90^\circ$  نسبت به راستای باریکه فرودی و در فاصله  $5.19\text{ cm}$  از مرکز هدف با زاویه فضایی  $77.7\text{ msr}$  نصب شد. لازم به ذکر است که در زاویه  $90^\circ$ ، پهن‌شدگی داپلری قله‌های پرتو گاما به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد [۷].

روش‌های آنالیز با باریکه یونی به دلیل سرعت و حساسیت بالا، غیرمخرب بودن و توانایی در آنالیز هم‌زمان چند عنصر، برای طیف وسیعی از نمونه‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. در سال‌های اخیر با ظهور سیستم‌های آشکارسازی با بازده مناسب و نیز امکان استفاده از باریکه یونی با ذرات سنگین‌تر، دامنه استفاده از روش‌های مختلف آنالیز با باریکه یونی با رشد چشمگیری همراه بوده است. از متداول‌ترین این روش‌ها، که تقریباً در تمام آزمایشگاه‌های آنالیز با باریکه یونی مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توان به دو روش گسیل پرتو ایکس ذره-القایی (PIXE) و اسپکترومتری پس‌پراکندگی رادفورد (RBS) اشاره نمود. اگرچه این دو روش ابزار قدرتمندی برای آنالیز عنصری به‌شمار می‌روند، ولی برای آنالیز عناصر سبک با محدودیت همراه می‌باشند. در تکنیک RBS برای آنالیز عناصر سبک در نمونه‌های ضخیم حاوی عناصر سنگین، سیگنال‌های حاصل از ذرات پس‌پراکنده شده عنصر سنگین، سیگنال‌های حاصل از عناصر سبک‌تر را می‌پوشانند [۱]. روش PIXE به‌علت بازده کم آشکارساز Si(Li) برای پرتوهای ایکس حاصل از بمباران عناصر سبک‌تر از سیلیسیم و نیز اثر خودجذبی نمونه هدف برای پرتوهای ایکس مشخصه این عناصر، با خطای زیادی همراه است [۲]. برای اندازه‌گیری دقیق‌تر عناصر سبک، استفاده از واکنش‌های هسته‌ای توصیه می‌شود. در صورت آشکارسازی ذرات باردار حاصل از واکنش، آنالیز با واکنش هسته‌ای (NRA) [۳] و در صورت استفاده از پرتوی گاما، آنالیز به روش گسیل پرتو گاما ذره-القایی (PIGE) [۴] نامیده می‌شوند. یکی دیگر از ویژگی‌های برجسته این دو روش، حساسیت ایزوتوپی آن‌ها می‌باشد [۳].

در واکنش PIGE، با برهم‌کنش ذرات باردار با انرژی ۱ تا ۱۰ MeV با هسته‌های نزدیک به سطح هدف و آشکارسازی پرتوهای گامای آنی، می‌توان ترکیب و نمایه عمقی هدف‌های جامد را تا عمق  $50\text{ }\mu\text{m}$  اندازه‌گیری کرد [۴]. به دلیل وجود تشدیدهای تیز در بسیاری از سطح مقطع‌های این واکنش‌ها، آنالیز به روش PIGE تکنیک بسیار مناسبی برای تعیین نمایه عمقی تشدید با قدرت تفکیک بالا نیز به‌شمار می‌رود [۳]. در حال حاضر محدودیت عمده آنالیز به روش PIGE متکی بودن آن به مقایسه با نمونه استاندارد است. در این تکنیک به‌منظور تعیین غلظت عناصر، از مقایسه با نمونه استاندارد با ترکیب مشابه استفاده می‌شود. در صورتی که ترکیب نمونه استاندارد تفاوت زیادی با ترکیب نمونه مجهول داشته باشد، آنالیز با درصد خطای بالایی همراه خواهد شد. از این‌رو به‌منظور دستیابی به نتایج

1. Particle Induced X-ray Emission
2. Rutherford Backscattering Spectrometry
3. Nuclear Reaction Analysis
4. Particle Induced Gamma-ray Emission



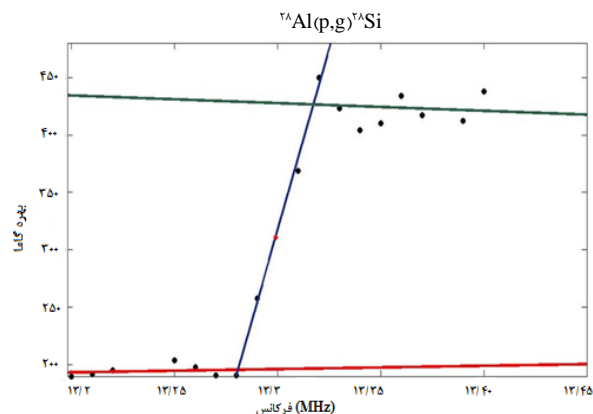
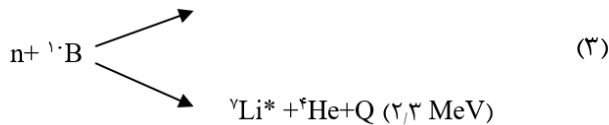
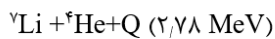
$80 \mu\text{m}$  و قرص  $\text{LiF}$  به عنوان نمونه‌های هدف استفاده شده است.

با کمک واکنش  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  و با رسم نمودار بهره گامای  $1779 \text{ keV}$  برحسب فرکانس NMR، می‌توان فرکانس مربوط به انرژی تشدید را در جایی که بهره گاما به  $50\%$  بیشینه خود می‌رسد، تعیین کرده و در نهایت با استفاده از رابطه ۱ ثابت مدرج‌سازی را به دست آورد.

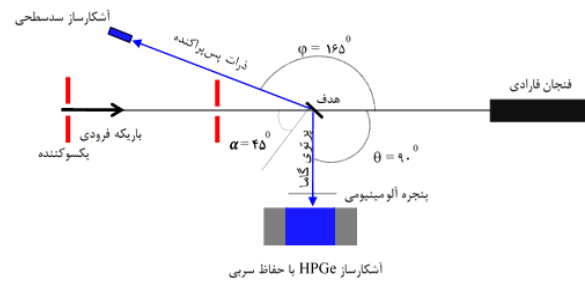
همان‌طور که در شکل ۲ می‌توان مشاهده نمود، مقدار فرکانس  $13.3 \text{ MHz}$  معادل با انرژی تشدید  $991.88 \text{ keV}$  به دست آمده است. با قراردادن مقادیر معلوم در رابطه ۱، ثابت مدرج‌سازی  $2 \text{ MHz}^2 \cdot \text{amu} / \text{e}^2 \cdot \text{MeV}$  حاصل شد.

نقطه دیگر استفاده شده برای مدرج‌کردن انرژی شتاب‌دهنده، انرژی آستانه  $1880.44 \text{ keV}$  واکنش  $^7\text{Li}(p,n)^6\text{Be}$  است. برای کندسازی نوترون‌های سریع حاصل از این واکنش، آجرهایی از جنس پارافین به ضخامت  $5 \text{ cm}$  بین هدف و آشکارساز قرار داده شد. برای شمارش نوترون‌ها از یک آشکارساز  $\text{BF}_3$  مدل LND-INC-202 به طول  $26 \text{ cm}$  و قطر  $2.5 \text{ cm}$ ، مستقر در پشت فنجان فرادی محافظه واکنش و در زاویه صفر درجه نسبت به باریکه فرودی، استفاده شد.

در این روش با بمباران هدف  $\text{LiF}$  با باریکه پروتون، نوترون تولید می‌شود (واکنش ۲) و نوترون‌های حاصل با تولید ذرات آلفا در آشکارساز (واکنش ۳) شمارش می‌شوند.



شکل ۲. نمودار بهره گاما برحسب فرکانس برای پرتوی گامای  $1779 \text{ keV}$  حاصل از واکنش  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ . دایره‌های توپر نشان‌دهنده بهره گاما در فرکانس‌های مختلف و خطوط سبز، قرمز و آبی خطوط برازش نقاط تجربی هستند.



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از چیدمان آزمایش (بدون مقیاس).

برای جمع‌آوری ذرات پس‌پراکنده، از یک آشکارساز سد سطحی سیلیسیمی با بیشینه عمق ناحیه تهی  $300 \mu\text{m}$ ، مساحت پنجره  $25 \text{ mm}^2$  و با قدرت تفکیک  $13 \text{ keV}$  استفاده شد. این آشکارساز در زاویه  $165^\circ$  نسبت به راستای باریکه فرودی نصب گردید.

### ۳. نتایج تجربی

#### ۳.۱. مدرج‌کردن انرژی باریکه شتاب‌دهنده و اندوگراف

مشخص بودن مقدار دقیق انرژی باریکه خروجی هر شتاب‌دهنده برای کاربردهای مختلف، از جمله اندازه‌گیری دقیق سطح مقطع واکنش‌های هسته‌ای، ضروری است. از این رو قبل از شروع آزمایش، لازم است که انرژی باریکه با یک روش مطمئن مدرج شود. روش‌های مختلفی برای مدرج کردن انرژی خطوط باریکه شتاب‌دهنده‌های خطی در نشریات علمی گزارش شده است [۹،۸]. دو روش متداول که معمولاً برای این منظور استفاده می‌شوند، انرژی آستانه واکنش‌های  $(p,n)$  و انرژی‌های تشدید واکنش‌های  $(p,p)$  و  $(p,\gamma)$  با پهنای تشدید خیلی کم و سطح مقطع نسبتاً زیاد هستند.

در شتاب‌دهنده و اندوگراف، انرژی یک خط باریکه مشخص با شدت میدان مغناطیسی آهنربای تحلیلگر واقع بر باریکه تنظیم می‌شود. شدت میدان مغناطیسی با فرکانس تشدید مغناطیس هسته (NMR) اتم هیدروژن اندازه‌گیری می‌شود. با انتخاب حداقل دو واکنش با انرژی مشخص، می‌توان فرکانس NMR،  $f$  را به انرژی باریکه،  $E$  با کمک رابطه زیر مرتبط نمود [۱۰]:

$$K = \frac{E}{f^2} \quad (1)$$

که در آن  $K$  ثابت مدرج‌سازی می‌باشد.

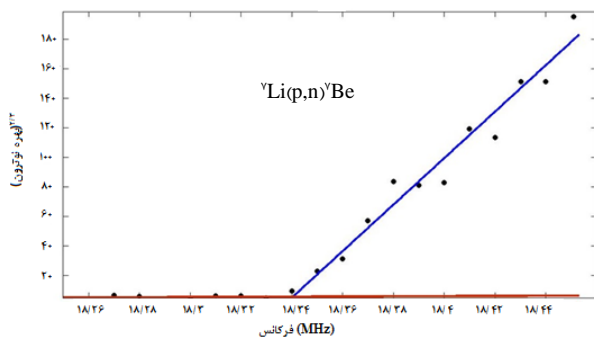
برای مدرج کردن انرژی خط باریکه  $45^\circ$  راست ماشین و اندوگراف از انرژی تشدید  $991.88 \text{ keV}$  واکنش هسته‌ای  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  و انرژی آستانه  $1880.44 \text{ keV}$  واکنش هسته‌ای  $^7\text{Li}(p,n)^6\text{Be}$  استفاده گردید [۱۲،۱۱]. برای این آزمایش، به ترتیب از فویل ضخیم و سیقل داده شده آلومینیم با ضخامت



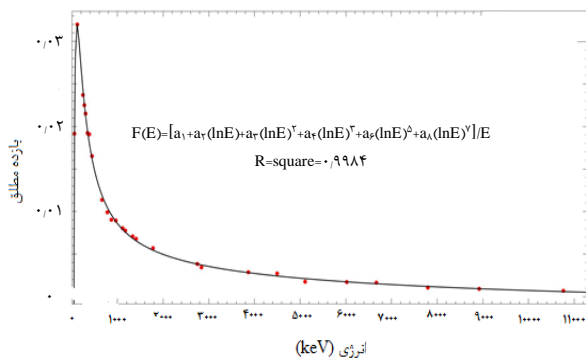
با اندازه‌گیری بازده پرتوهای گامای ناشی از چشمه‌ها و واکنش‌های هسته‌ای و در نهایت برازش نقاط تجربی به‌دست آمده با تابع ۴ [۱۵]، نمودار بازده مطلق آشکارساز به‌دست آمد. با درون‌یابی و برون‌یابی نمودار برازش‌شده، بازده مطلق آشکارساز برای هر نقطه تا انرژی ۱۱ MeV محاسبه شد. رابطه ۴ برای برازش نقاط تجربی به‌دست آمده مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sum_{i=1}^{n=A} a_i (Ln E)^{i-1} ; \quad i \neq 5, 7 \quad (4)$$

در این رابطه،  $E$  انرژی معادل با هر یک از پرتوهای گامای مورد استفاده می‌باشد. در شکل ۴ نمودار تجربی بازده مطلق آشکارساز گامای مورد استفاده ارائه شده است. عدم قطعیت سیستماتیک در مقادیر بازده مطلق آشکارساز مطابق با معادله انتشار خطاها [۱۶]، کم‌تر از ۵٪ تخمین زده شده است (مشروط بر این که چشمه‌ها در همان نقطه برخورد باریکه با هدف نصب شوند). این مقدار عدم قطعیت ناشی از عدم قطعیت‌ها در اکتیویته چشمه‌های رادیواکتیو استاندارد (۳٪)، طبق گزارش شرکت سازنده، تعیین سطح زیر قله‌های گاما (۳٪)، نسبت شاخه‌ای (کم‌تر از ۱٪) [۱۷] و برازش نقاط تجربی (کم‌تر از ۱٪) می‌باشد.



شکل ۳. نمودار بهره نوترون واکنش  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  برحسب فرکانس. دایره‌های توپر نشان‌دهنده بهره گاما در فرکانس‌های مختلف بوده و خطوط قرمز و آبی خطوط برازش نقاط تجربی هستند.



شکل ۴. نمودار تجربی بازده مطلق آشکارساز گاما در بازده ۶۰ تا ۱۰۸۰۰ keV.

${}^7\text{Li}$  با احتمال ۹۶٪ در حالت برانگیخته با انرژی ۰/۴۸ MeV و با احتمال ۴٪ در حالت پایه قرار دارد. از این‌رو دو گروه ذرات آلفا با انرژی ۱/۴۷ MeV و ۱/۷۷۶ MeV در آشکارساز ثبت می‌شوند. طیف حاصل نشان می‌دهد که قله حاصل از آلفاها با انرژی پایین‌تر بهره بیش‌تری دارند [۱۳].

برای رسم نمودار بهره، نمونه هدف ضخیم LiF با فرکانس شروع ۱۸/۲۷ MHz بمباران شد. سپس بهره ذرات آلفا معادل با فرکانس ثبت گردید. در مرحله بعد فرکانس را با گام‌های ۰/۰۱ kHz، که تقریباً معادل ۲ keV است، پایین آورده تا نهایتاً بهره صفر شد.

همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، محل تلاقی دو خط برازش شده، فرکانس ۱۸/۳۴ MHz معادل با انرژی آستانه ۱۸۸۰/۴۴ keV را به‌دست می‌دهد. با قرار دادن مقادیر معلوم در رابطه ۱، مقدار ثابت مدرج‌سازی  ${}^2\text{MHz} \cdot \text{amu}/\text{e}^2$  ۵/۵۹ MeV به‌دست آمد. اختلاف نسبی بین مقادیر فاکتور مدرج‌سازی حاصل از دو واکنش بالا کم‌تر از ۰/۳٪ می‌باشد.

### ۲.۲ نمودار تجربی بازده مطلق آشکارساز گاما

برای تعیین نمودار تجربی بازده مطلق آشکارساز گاما، ترکیبی از پرتوهای گامای حاصل از چشمه‌های رادیواکتیو استاندارد و پرتوهای گامای آبخاری حاصل از واکنش‌های گیراندازی پروتون‌های تشدیدی استفاده گردید. واکنش‌های گیراندازی  $(p,\gamma)$  به‌دلیل مقدار Q واکنش بالا، اغلب پرتوهای گاما با انرژی بالا تولید می‌کنند. هم‌چنین این واکنش‌ها در انرژی‌های تشدید بهره گامای بالایی دارند. از این‌رو این نوع واکنش‌ها برای مدرج‌سازی بازده آشکارسازهای گاما در بازده انرژی بالاتر، که امکان استفاده از چشمه‌های استاندارد وجود ندارد، مفید می‌باشند [۱۴].

برای پرتوهای گاما با انرژی کم‌تر از ۱۴۰۰ keV، از چشمه‌های رادیواکتیو استاندارد  ${}^{152}\text{Eu}$ ،  ${}^{133}\text{Ba}$ ،  ${}^{137}\text{Cs}$ ،  ${}^{60}\text{Co}$  و  ${}^{241}\text{Am}$  که در همان مکان برخورد باریکه با هدف نصب شدند، استفاده شد. نمودار بازده برای محدوده انرژی ۱۴۰۰ تا ۱۰۸۰۰ keV با استفاده از پرتوهای گامای حاصل از تشدیدهای  ${}^{27}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}\text{Si}$  ۹۹۲ keV و ۱۳۱۷ keV و واکنش  ${}^{23}\text{Na}(p,\gamma){}^{24}\text{Mg}$  ۱۳۹۵ keV و ۱۴۱۷ keV واکنش و برای تشدیدهای  ${}^{23}\text{Na}(p,\gamma){}^{24}\text{Mg}$  به‌دست آمد. در جدول ۱ انرژی پرتوهای گامای مورد استفاده حاصل از واکنش‌های گیراندازی پروتون‌های تشدید ارایه شده است. برای واکنش‌های فوق، از هدف‌های نازک  $\text{Na}_2\text{WO}_4$  به ضخامت تقریبی ۱۰۰ nm و Al به ضخامت ۱۴۹ nm استفاده شد.



پروتون‌های باریکه فرودی (۰.۳٪) و عدم‌قطبیت سطح‌مقطع رادرفورد نقره (۰.۱٪) بود.

### ۲.۳.۳ تعیین زاویه فضایی با روش هندسی

زاویه فضایی یک آشکارساز ذرات باردار با شعاع  $r$  و فاصله  $d$  از چشمه، با شرط  $r \gg d$  از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱۶]:

$$\Omega = \frac{\pi r^2}{d^2} \quad (۶)$$

با قراردادن مساحت موثر آشکارساز به مقدار  $25 \text{ mm}^2$  و فاصله آشکارساز ذرات باردار تا محل برخورد باریکه با هدف به اندازه  $183 \text{ mm}$  در رابطه ۶، مقدار زاویه فضایی برابر با  $0.75 \pm 0.2 \text{ msr}$  به‌دست آمد. نتایج حاصل از هر دو روش در جدول ۲ ارایه شده است.

### ۴.۳ اندازه‌گیری جریان باریکه فرودی

معمولاً یکی از چالش‌های اساسی آزمایش‌های مرتبط با باریکه یونی، اندازه‌گیری جریان باریکه فرودی بر هدف می‌باشد. در محفظه واکنش PIGE واقع بر خط باریکه  $45^\circ$  راست شتاب‌دهنده واندوگراف، دو امکان برای اندازه‌گیری جریان باریکه فرودی وجود دارد: (۱) استفاده از رقمی‌کننده جریان؛ این واحد برای اندازه‌گیری مستقیم تعداد ذرات فرودی بر هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش هدف و فنجان فارادی از طریق کابل به ورودی رقمی‌کننده جریان مدل ۴۳۹ شرکت اورتک متصل می‌شوند. به ازای هر  $10^{-10}$  کولن بار مثبت جمع‌آوری شده بر روی هدف و فنجان فارادی، یک علامت در رقمی‌کننده جریان تولید می‌شود. (۲) استفاده از طیف RBS: در این روش از یک عنصر سنگین مثل نقره یا طلا، که در بازه انرژی مورد استفاده دارای پراکندگی خالص رادرفورد هستند، به‌عنوان زیرلایه هدف اصلی استفاده می‌شود. با استفاده از طیف RBS ذرات پس‌پراکنده حاصل از بمباران لایه سنگین می‌توان جریان باریکه فرودی را با دقت خوبی به‌دست آورد. برای هدف ضخیم نیز از یک لایه نازک طلا روی هدف برای نرمالایز کردن بار استفاده می‌شود.

نتایج اندازه‌گیری بار بر هدف‌های نازک و ضخیم با این دو روش در جدول ۳ ارایه شده است. اختلاف بین دو اندازه‌گیری را می‌توان به کنده‌شدن الکترون‌های ثانویه از سطح هدف‌ها نسبت داد. جداسدن الکترون‌های ثانویه باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری بار در روش اندازه‌گیری مستقیم خواهد شد. برای جلوگیری از کنده شدن الکترون‌های ثانویه، اعمال یک ولتاژ بازدارنده منفی حدود  $200$  تا  $500 \text{ V}$  اطراف هدف مورد نیاز می‌باشد [۲۰].

جدول ۱. واکنش‌ها، انرژی تشدید و انرژی پرتوهای گامای مورد استفاده برای اندازه‌گیری بازده مطلق آشکارساز HPGe

واکنش	انرژی پروتون (keV)	انرژی گاما (keV)	نسبت شاخه‌ای (%)
$^{24}\text{Mg}(p,\gamma)^{24}\text{Na}$	۱۴۱۷	۱۳۶۹	۱۰۰
$^{28}\text{Si}(p,\gamma)^{28}\text{Al}$	۹۹۲	۱۷۷۹	۹۴.۸
$^{24}\text{Mg}(p,\gamma)^{24}\text{Na}$	۱۴۱۷	۲۷۵۰	۱۰۰
$^{28}\text{Si}(p,\gamma)^{28}\text{Al}$	۲۰۴۶	۲۸۳۹	۶۰.۶
$^{24}\text{Mg}(p,\gamma)^{24}\text{Na}$	۱۳۹۵	۳۸۶۶	۹۹
$^{28}\text{Si}(p,\gamma)^{28}\text{Al}$	۱۳۱۷	۴۴۹۷	۴۰
$^{28}\text{Si}(p,\gamma)^{28}\text{Al}$	۲۰۴۶	۵۱۱۰	۳۳.۳
$^{28}\text{Si}(p,\gamma)^{28}\text{Al}$	۹۹۲	۶۰۲۰	۶
$^{28}\text{Si}(p,\gamma)^{28}\text{Al}$	۲۰۴۶	۶۶۶۹	۳۰
$^{24}\text{Mg}(p,\gamma)^{24}\text{Na}$	۱۳۹۵	۷۷۹۵	۱۰۰
$^{24}\text{Mg}(p,\gamma)^{24}\text{Na}$	۱۴۱۷	۸۹۲۰	۱۰۰
$^{28}\text{Si}(p,\gamma)^{28}\text{Al}$	۹۹۲	۱۰۷۶۰	۷۶.۶

### ۳.۳ تعیین زاویه فضایی آشکارساز ذرات باردار

در پژوهش حاضر، زاویه فضایی آشکارساز ذرات به دو روش RBS و روش هندسی اندازه‌گیری شد. در ادامه نتایج به‌دست آمده با این دو روش با یکدیگر مقایسه شدند.

### ۱.۳.۳ تعیین زاویه فضایی با استفاده از طیف RBS

در این روش، از سه هدف نازک نقره با ضخامت‌های مختلف ( $10^{16} \text{ atom/cm}^2$ )، ۲۲، ۴۴ و ۵۸ که به روش لایه‌نشانی فیزیکی بخار بر روی یک زیرلایه ضخیم آلومینیم نشانده شده‌اند، استفاده شده است. ضخامت لایه‌های نقره با استفاده از طیف‌های RBS باریکه آلفا  $2 \text{ MeV}$  و برازش طیف‌های تجربی به‌دست آمده با نرم‌افزار SIMNRA [۱۸] تعیین شدند. در مرحله بعد، از باریکه پروتون  $2 \text{ MeV}$  برای بمباران هدف‌ها استفاده شد. با توجه به این‌که سطح‌مقطع پراکندگی نقره در این انرژی کاملاً رادرفورد است، می‌توان بار القا شده بر هدف یا همان تعداد پروتون‌های باریکه فرودی را تعیین نمود. سپس نمودار بهره نقره (سطح زیر قله نقره) نسبت به ضخامت‌ها رسم شده و شیب خط برازش شده به نقاط تجربی تعیین گردید. در نهایت زاویه فضایی با استفاده از رابطه زیر به‌دست آمد [۱۹]:

$$\Omega = \left( \frac{a}{N_p \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega}} \right) \quad (۵)$$

در این رابطه،  $a$  و  $Np$  و  $d\sigma/d\Omega$  به ترتیب نشان‌دهنده شیب خط برازش شده، تعداد پروتون‌های باریکه فرودی و سطح‌مقطع دیفرانسیلی رادرفورد نقره در زاویه  $165$  درجه هستند.

منابع عدم‌قطعیت تعیین زاویه فضایی با روش RBS، شامل عدم‌قطعیت برازش نقاط تجربی (۰.۷٪)، عدم‌قطعیت تعیین تعداد



۲. نمونه باید پایداری مکانیکی، شیمیایی و هدایت حرارتی مناسب داشته باشد؛ به طوری که در حین پرتودهی، به‌ویژه در جریان‌های زیاد و زمان‌های طولانی، تجزیه و تخریب نشود.

۳. هدف باید هدایت الکتریکی مناسب داشته باشد تا امکان

دستیابی به طیف دقیق‌تر ذرات پس‌پراکنده فراهم شود. برای اندازه‌گیری ضخامت هدف، از طیف پس‌پراکنده‌گی ذرات آلفا حاصل از بمباران با باریکه آلفا ۲ MeV استفاده گردید (شکل ۵). منابع خطاهای سیستماتیک برای اندازه‌گیری ضخامت هدف ناشی از عدم قطعیت اندازه‌گیری بار (۵٪)، سطح مقطع رادرفورد (۱٪) و زاویه فضایی آشکارساز ذرات (۳٪) بود. با تجمع عدم قطعیت‌های اشاره شده با معادله انتشار خطاها، عدم قطعیت کل در اندازه‌گیری ضخامت هدف در حدود ۶٪ برآورد شد.

۶.۳ کاهش تابش زمینه و بررسی اثرات همپوشانی با دیگر واکنش‌ها برای اندازه‌گیری سطح مقطع واکنش‌های PIGE، از بهره گاما (سطح زیرقله) به‌طور مستقیم استفاده می‌شود. بنابراین باید به اثرات تابش زمینه و همپوشانی احتمالی با دیگر واکنش‌ها توجه شود. تابش‌های زمینه بیش‌تر ناشی از منابع پرتوزای طبیعی در محیط و واکنش‌های هسته‌ای با عناصر مزاحم در نمونه هدف، جداره داخلی محفظه و درپچه‌های موجود در مسیر باریکه می‌باشد. شکل ۶ طیف گاما حاصل از تابش‌های زمینه در محیط آزمایشگاه واندوگراف را نشان می‌دهد. در این طیف انرژی و منابع ایزوتوپی قله‌ها مشخص شده است. مهم‌ترین این قله‌ها مربوط به  $^{208}\text{Tl}$  (۲۶۱۵ keV) و  $^{40}\text{K}$  (۱۴۶۱ keV) می‌باشند که تقریباً در بیش‌تر طیف‌های پرتو گاما وجود دارند و حتی ممکن است برای کالیبراسیون انرژی آشکارساز نیز استفاده شوند [۲۲]. برای کاهش تابش زمینه از حفاظ سربی استوانه‌ای شکل به ضخامت ۵ cm و طول ۱۳ cm در اطراف آشکارساز استفاده شد. برای حذف پرتو ایکس ناشی از سرب، جداره داخلی حفاظ سربی با پوششی از جنس مس به ضخامت ۳ mm پوشانده شد. با قراردادن حفاظ‌های سربی، آهنگ شمارش کل زمینه به نسبت حدود ۵ برابر کاهش یافت. با توجه به این‌که جنس محفظه واکنش مورد استفاده از آلومینیم با پوشش بیرونی آندایز شده می‌باشد، برای جلوگیری از تولید گامای ناخواسته در اثر واکنش پروتون‌های عبوری یا پراکنده شده از سطح هدف با جداره آلومینیمی داخل محفظه، سطح داخلی محفظه به‌وسیله آستری از جنس قلع کاملاً پوشیده شده است. لازم به ذکر است که به‌دلیل پر بودن آخرین تراز پروتون در هسته قلع، این هسته تمایلی به واکنش با پروتون ندارد.

واکنش‌های گسیل پرتو گاما ذره - القایی با دوترون<sup>۱</sup> (DIGE) معمولاً بخاطر ایجاد گاما‌های مزاحم در واکنش‌های

جدول ۲. مقادیر به‌دست آمده برای زاویه فضایی آشکارساز ذره باردار با استفاده از دو روش هندسی و RBS.

روش هندسی	طیف RBS	روش
$0.02 \pm 0.075$	$0.07 \pm 0.085$	زاویه فضایی (msr)

جدول ۳. مقایسه نتایج اندازه‌گیری بار بر هدف‌های نازک و ضخیم با دو روش رقمی‌کننده جریان و RBS.

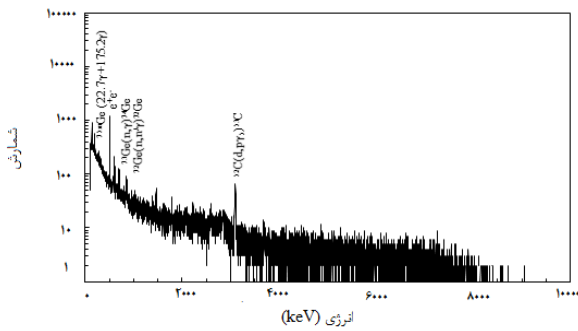
هدف	ضخامت ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	اندازه‌گیری RBS بار با ( $\mu\text{C}$ )	اندازه‌گیری مستقیم بار با رقمی‌کننده جریان ( $\mu\text{C}$ )	اختلاف نسبی بین دو اندازه‌گیری %
Al/Ag	۲۶۱	۵۱،۴	۸۰	۳۵،۸
Al/Au	ضخیم	۲۱،۶	۴۰	۴۵،۹
SiO/Ag	۵۲،۸	۵۵،۴	۸۰	۳۰،۷
Si/Au	ضخیم	۴،۸	۱۰	۵۳،۶

با توجه به دقت بالاتر روش RBS نسبت به روش اندازه‌گیری مستقیم، از این روش برای اندازه‌گیری بار استفاده شد. منابع خطاهای سیستماتیک مقادیر اندازه‌گیری شده با روش RBS ناشی از عدم قطعیت در توان توقف (۴٪)، سطح مقطع رادرفورد (۱٪) و زاویه فضایی آشکارساز ذرات (۳٪) است. با تجمع عدم قطعیت‌های فوق با معادله انتشار خطاها، عدم قطعیت کل در اندازه‌گیری ضخامت هدف کم‌تر از ۵٪ تخمین زده شد.

۵.۳ ساخت هدف مناسب و اندازه‌گیری دقیق ضخامت در آزمایشگاه‌های فیزیک هسته‌ای، واکنش‌های هسته‌ای از بمباران هدف‌های مناسب ایجاد می‌شوند. مشخصات هدف به ماهیت آزمایش و واکنش هسته‌ای تحت مطالعه بستگی دارد. به‌دلیل وجود تشدیدهای بسیار باریک در توابع تحریکی واکنش‌های PIGE، استفاده از هدف نازک و با دوام برای اندازه‌گیری دقیق سطح مقطع بسیار مهم و تعیین‌کننده می‌باشد. برای اندازه‌گیری سطح مقطع این نوع واکنش‌ها، شرایط اصلی یک هدف ایده‌آل به شرح زیر است:

۱. هدف باید همگن و به اندازه کافی نازک باشد، به طوری که افت انرژی ذرات در آن کم‌تر از پهنای تشدیدهای احتمالی در تابع تحریکی واکنش باشد. با رعایت این شرط می‌توان تشدیدهای متوالی و نزدیک به یکدیگر را بدون همپوشانی تمیز داد. نکته مهم‌تر این‌که اگر ضخامت هدف نازک نباشد، بهره پرتو گامای اندازه‌گیری شده بیش‌تر معادل با انتگرال سطح مقطع بر روی افت انرژی خواهد بود تا معادل با مقدار سطح مقطع واکنش. با توجه به این‌که معمولاً در توابع تحریکی واکنش‌های PIGE با پروتون تشدیدهای باریک و متوالی وجود دارد، ضخامت حدود  $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  برای هدف ایده‌آل پیشنهاد شده است [۲۱].





شکل ۷. طیف گاما حاصل از بمباران محفظه واکنش (بدون هدف) با باریکه دوترون ۲۰۰۰ keV، با حفاظ سربی استوانه‌ای شکل دور آشکارساز گاما، آجرهای سربی در نزدیکی دریاچه‌ها، آجرهای پارافینی ضخامت ۱۰ cm پشت آجرهای سربی و یک صفحه از جنس کادمیوم به ضخامت ۱ cm.

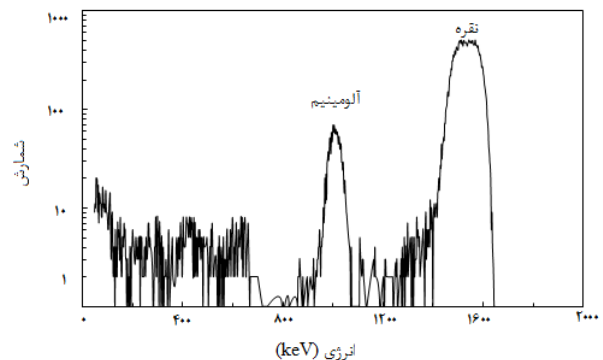
جدول ۴. قله‌های مزاحم در طیف گامای واکنش‌های DIGE [۲۳].

انرژی گاما (keV)	واکنش
۱۹۸	$^{71m}\text{Ge} (\gamma + 1752 \gamma) ^{71}\text{Ge}$
۵۶۹	$^{207}\text{Pb}(n, n'\gamma) ^{207}\text{Pb}, ^{74}\text{Ge}(n, n'\gamma) ^{74}\text{Ge}$
۵۹۶	$^{73}\text{Ge}(n, \gamma) ^{73}\text{Ge}, ^{72}\text{Ge}(n, n'\gamma) ^{72}\text{Ge}$
۶۰۹	$^{72}\text{Ge}(n, \gamma) ^{72}\text{Ge}$
۶۹۳	$^{72}\text{Ge}(n, n'\gamma) ^{72}\text{Ge}$
۸۴۴	$^{27}\text{Al}(n, n'\gamma) ^{27}\text{Al}$
۸۴۷	$^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma) ^{56}\text{Fe}$
۸۷۱	$^{16}\text{O}(d, p\gamma) ^{16}\text{O}$
۱۰۱۴	$^{27}\text{Al}(n, n'\gamma) ^{27}\text{Al}$
۱۰۳۹	$^{70}\text{Ge}(n, n'\gamma) ^{70}\text{Ge}$
۱۲۳۸	$^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma) ^{56}\text{Fe}$
۱۳۷۶	$^{16}\text{O}(d, p\gamma) ^{16}\text{O}$
۱۷۷۹	$^{27}\text{Al}(d, n\gamma) ^{28}\text{Si}$
۱۸۱۱	$^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma) ^{56}\text{Fe}$
۱۹۸۲	$^{16}\text{O}(n, n'\gamma) ^{16}\text{O}$
۲۲۱۰	$^{27}\text{Al}(n, n'\gamma) ^{27}\text{Al}$
۲۳۱۳	$^{12}\text{C}(d, p\gamma) ^{12}\text{C}$
۳۰۸۹	$^{12}\text{C}(d, p\gamma) ^{12}\text{C}$
۳۶۸۴	$^{12}\text{C}(d, p\gamma) ^{12}\text{C}$
۳۸۵۳	$^{12}\text{C}(d, p\gamma) ^{12}\text{C}$

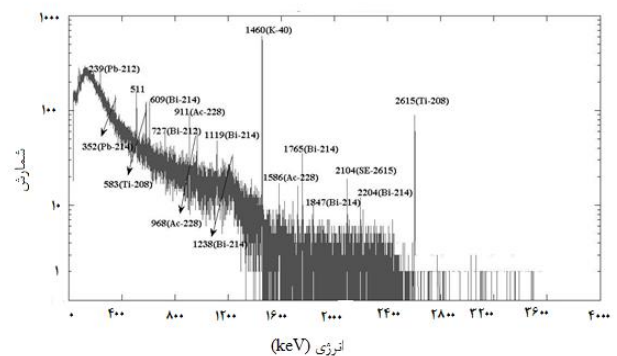
#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله شرایط تجربی مطلوب برای اندازه‌گیری سطح مقطع دیفرانسیلی واکنش‌های گسیل پرتو گاما القایی با پروتون/دوترون در شتاب‌دهنده واندوگراف تهران ارائه شد. با تعیین دقیق پارامترهای فیزیکی مؤثر مانند ثابت مدرج‌سازی انرژی خطوط باریکه، نمودار بازده مطلق آشکارساز HPGe تا انرژی ۱۰/۸ MeV، زاویه فضایی آشکارساز ذرات باردار، جریان باریکه و تعداد هسته‌های هدف، امکان اندازه‌گیری سطح مقطع دیفرانسیلی گاما‌های انرژی بالا از واکنش‌های هسته‌ای  $^{14}\text{N}(d, p\gamma_{\alpha-1})^{15}\text{N}$  ( $E_\gamma = 2297 \text{ keV}$ ) و  $^{14}\text{N}(d, p\gamma_{\beta-1})^{15}\text{N}$  ( $E_\gamma = 7299 \text{ keV}$ )،  $^{14}\text{N}(d, p\gamma_{\alpha-1})^{15}\text{N}$

$(n, \gamma)$  و  $(n, n'\gamma)$  با بلور ژرمانیم آشکارساز HPGe و نیز با آلومینیم و آهن که در ساخت خط باریکه، دریاچه‌ها و محفظه واکنش استفاده می‌شوند، طیف‌های گامای پرتراکم و شلوغ‌تری نسبت به واکنش‌های القایی با پروتون دارند. منبع تولید بیش‌تر این نوترون‌ها را می‌توان به واکنش  $(d, n)$  باریکه دوترون با آلودگی‌های سطحی کربن و اکسیژن روی سطح دریاچه‌ها و نیز به واکنش  $D(d, n)$  باریکه دوترون با دوترون‌های کاشته شده بر هدف در حین بمباران نسبت داد. این قله‌های گامای ناخواسته، که ممکن است در واکنش‌های DIGE ظاهر شده و باعث پیچیدگی و تراکم طیف شوند، در جدول ۴ ارایه شده است [۲۳]. برای کاهش این زمینه‌های مزاحم، علاوه بر حفاظ سربی استوانه‌ای شکل دور آشکارساز گاما، در نزدیکی دریاچه‌ها و فنجان‌فرادی از آجرهای سربی استفاده شد. پشت آجرهای سربی نزدیک دریاچه‌ها از آجرهای پارافینی به ضخامت ۱۰ cm برای کاندسازی نوترون‌ها و هم‌چنین یک صفحه از جنس کادمیم به ضخامت ۱ cm برای جذب نوترون‌های کاندشده استفاده گردید. با این چیدمان حفاظ، پس از بمباران محفظه واکنش (بدون هدف) با باریکه دوترون ۲۰۰۰ keV، قله‌های مزاحم القایی با نوترون‌ها و قله‌های حاصل از واکنش  $(d, p\gamma)$  تا حدود زیادی کاهش یافت (شکل ۷).



شکل ۵. طیف پس پراکندگی ذرات آلفا حاصل از بمباران هدف Al/Ag با باریکه هلیوم ۲ MeV و زاویه پراکندگی  $165^\circ$  برای اندازه‌گیری ضخامت و نسبت استوکیومتری آلومینیم به نقره.



شکل ۶. طیف گامای حاصل از تابش‌های زمینه در آزمایشگاه واندوگراف با حفاظ سربی اطراف آشکارساز.



13. W.M. Toney and A.W. Waltner. *An investigation of the  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}^*$ ,  $^7\text{Li}$  reaction branching ratio* *Nucl. Phys. A* **80**, 237 (1966).
14. B.P. Singh and H.C. Evans, *Relative efficiency of Ge(Li) gamma ray detector from 0.5 to 12 MeV*, *Nuclear Instruments and Methods*. **97**, 475 (1971).
15. G.L. Molnár, Zs. Révay and T. Belgya, *Wide energy range efficiency calibration method for Ge detector*, *Nucl. Instr. Meth. A* **489**, 140 (2002).
16. G.F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", 3rd Edition (John Wiley & Sons, USA, 1999).
17. "Update of X Ray and Gamma Ray Decay Data Standards for Detector Calibration and Other Applications", ref.STI/PUB/1287.
18. M.Mayer, SIMNRA, Report IPP 9/113 (Max Planck institute, Germany, 1997).
19. L. Csedreki, *Experimental conditions for cross section measurements for analytical purpose*, *Acta physica debrecina. xlvii*, **25**, 25 (2012).
20. C.E. Rolfs and W.S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos*, (University of Chicago Press, USA, 1988)
21. P. Dimitriou and A.P. Jesus, in *Summary Report of the 3rd RCM on "Development of a Reference Database for Particle-Induced Gamma-ray Emission (PIGE) Spectroscopy"*, 7-11 April 2014, Vienna.
22. Y. Wang and M. Nastasi (Eds.), *Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis, (Chapter 3)*, in: J. Räsänen, "Particle-Induced Gamma-ray Emission: PIGE", (IAEA, Vienna, 2009).
23. Z. Elekes et al., *Thick target  $\gamma$ -ray yields for light elements measured in the deuteron energy interval of 0.7-3.4 MeV*, *Nucl. Instr. Meth. B* **168**, 305 (2000).

$^{14}\text{N}(d, p\gamma_{\gamma-\dots})^{15}\text{N}$  ( $E_{\gamma} = 8310 \text{ keV}$ ) با عدم قطعیت سیستماتیک کم‌تر از ۹٪ فراهم شد.

### مراجع

1. V. Paneta et al., *Differential cross-section measurements of the  $d + ^{19}\text{F}$  reaction channels for NRA purposes*, *Nucl. Instr. Meth. B* **290**, 72 (2012).
2. A. Jokar et al, *Differential cross section measurements of  $^{27}\text{Al}(p, p'\gamma)^{27}\text{Al}$  and  $^{27}\text{Al}(p, \alpha\gamma)^{24}\text{Mg}$  reactions in the energy range of 1.6–3.0 MeV*, *Nucl. Instr. Meth. B* **362**, 138 (2015).
3. A. Jokar, O. Kakuee and M. Lamehi-Rachti, *Measurement of deuteron induced gamma-ray emission differential cross sections on  $^{nat}\text{Cl}$  from 1.0 to 2.0*, *Nucl. Instr. and Meth. B* **377**, 37 (2016).
4. D. Abriola and A.P. Jesus, "Development of Reference Database for Particle-Induced Gamma-ray Emission (PIGE) Spectroscopy", (IAEA, Vienna, 2011).
5. IBANDL, <http://www-nds.iaea.org/ibandl>.
6. EXFOR, <https://www-nds.iaea.org/exfor>.
7. A. Lagoyannis et al., *Study of the  $^{10}\text{B}(p, \alpha\gamma)^7\text{Be}$  and  $^{10}\text{B}(p, p'\gamma)^{10}\text{B}$  reactions for PIGE purposes*, *Nucl. Instr. Meth. B* **342**, 271 (2015).
8. J.B. Marion, "Accelerator Calibration Energies", *Rev. Mod. Phys.* **38**, 660 (1966).
9. J.R. Tesmer, *Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis*, (IAEA, Vienna, 1989).
10. J.B. Marion and F. C. Young, *Nuclear Reaction Analysis*, (Wiley, New York, 1967).
11. M.L. Roush, L. A. West, J. B. Marion. *Precision determinations of nuclear reaction calibration energies by velocity measurements* *Nucl. Phys. A* **147**, **235** (1970).
12. R.E White, P. H. Barker and D. M. J. Lovelock, *Measurement of Nuclear Reaction Q-values with High Accuracy:  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$* , *Metrologia*. **21**, 193 (1985).

### COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



### استناد به این مقاله

علیرضا جوکار، امیدرضا کاکویی، محمد لامعی رشتی (۱۴۰۰)، شرایط تجربی مناسب برای اندازه‌گیری سطح مقطع دیفرانسیلی واکنش‌های گسیل پرتو گاما ذره-القایی در شتاب‌دهنده و اندوگراف تهران، ۹۸، ۲۷-۳۴

DOI: 10.24200/nst.2021.1308

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1308.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1308.html)

