

## اندازه‌گیری بهره پرتو گامای هدف ضخیم واکنش $^{19}\text{F}(\alpha, p\gamma_1)^{22}\text{Ne}$ برای آنالیز فلئور

علیرضا جوکار\*، حسین رفیع‌خیری

پژوهشکده‌ی فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران-ایران

### چکیده:

با هدف تهیه داده‌های پایه‌ی واکنش‌های گسیل پرتو گامای آلفا-القایی (AIGE) برای آنالیز فلئور، تابع تحریکی بهره پرتوی گامای هدف ضخیم واکنش  $^{19}\text{F}(\alpha, p\gamma_1)^{22}\text{Ne}$  (پرتو گامای ۱۲۷۵ keV) در بازه ۱۵۰۰-۲۸۰۰ keV با گام‌های ۱۰۰ keV در زاویه آشکارسازی  $90^\circ$  آزمایشگاهی نسبت به راستای باریکه اندازه‌گیری شد. مقادیر بهره با استفاده از یک هدف ضخیم LiF بدست آمدند. این آزمایش با استفاده از باریکه هلیوم شتابگر الکترواستاتیک ۳ MV و اندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شد. مزیت عمده روش AIGE، حساسیت خوب روش برای آشکارسازی حد ppm فلئور در نمونه‌های حاوی غلظت‌های بالا دیگر عناصر سبک مانند سدیم، منیزیم، آلومینیوم و فسفر است که چنین اندازه‌گیری‌هایی با PIGE امکان‌پذیر نیست. تعدادی دیگر از مزیت‌های روش AIGE نسبت به روش PIGE شامل توانایی آنالیز فلئور در نواحی نزدیک‌تر سطح هدف، بهره تولید نوترون بسیار کمتر، طیف گاما با زمینه پایین‌تر و امکان آشکارسازی پرتوهای گاما با آشکارساز NaI می‌باشند. عدم قطعیت سیستماتیک برای مقادیر اندازه‌گیری شده بهتر از ۸ درصد تخمین زده شد. نتیجه بدست آمده در این مطالعه با تنها داده تجربی موجود در نشریه‌ها مقایسه شد.

**کلیدواژه‌ها:** شتابگر و اندوگراف، بهره پرتو گامای هدف ضخیم، گسیل پرتو گامای آلفا-القایی، فلئور

## Measurement of thick target gamma-ray yield of the $^{19}\text{F}(\alpha, p\gamma_1)^{22}\text{Ne}$ reaction for fluorine analysis

Alireza Jokar\*, Hossin Rafi-kheiri

Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box:11365-3486, Tehran-Iran

### Abstract:

With the aim of providing basic data for Alpha-Induced Gamma-ray Emission (AIGE) reactions for fluorine analysis, the excitation function of thick-target gamma-ray yield of the  $^{19}\text{F}(\alpha, p\gamma_1)^{22}\text{Ne}$  ( $E_\gamma=1275$  keV) reaction was measured at the energy interval  $E_\alpha=1.5-2.8$  MeV, with 1000 keV steps at the laboratory angle of  $90^\circ$  with respect to the beam direction. Yield values were obtained by using a thick LiF target. This experiment was conducted using the  $^4\text{He}^+$  beam of the 3 MV Van de Graaff electrostatic accelerator of Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI). The important advantage of the AIGE method is its good sensitivity of the detection of fluorine on the ppm level in samples containing high concentration of other light elements like sodium, magnesium, aluminum and phosphorus, which such measurements are not possible with PIGE. There are many other advantage of AIGE in comparison with the PIGE including capability to analyze fluorine in the near-surface region of target, the lower neutron production yield, the lower background for gamma-ray spectrum, and the possibility of detection of the gamma-rays with NaI detector. The overall systematic uncertainty of the measured data was estimated to be better than 8%. The values obtained in this work are in very good with the available data in the in the literature. The obtained result was compared with the previously only measured data in the literature.

**Keywords:** Van de Graaff accelerator, Thick target gamma-ray yield, Alpha-Induced Gamma-ray Emission (AIGE), Fluorine

\* Email: ajowkar@aeoi.org.ir

## ۱. مقدمه

روش‌های آنالیز با باریکه یونی بدلیل سرعت و حساسیت بالا، غیر مخرب بودن و توانایی در آنالیز همزمان چند عنصر، برای طیف وسیعی از نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیشرفت در فناوری و بکارگیری سیستم‌های آشکارسازی با بازده مناسب سبب شده تا دامنه استفاده از روش‌های مختلف آنالیز با باریکه یونی با رشد چشمگیری همراه شود. در سال‌های اخیر آنالیز به روش گسیل پرتو گاما پروتون-القایی<sup>۱</sup> (PIGE) برای آنالیز ایزوتوپ‌های عناصر سبک ( $Z \leq 17$ ) مورد توجه قرار گرفته است [۱].

در روش PIGE با برهم‌کنش پروتون با انرژی  $1-10 \text{ MeV}$  با هسته‌های نزدیک به سطح هدف و آشکارسازی پرتوهای گامای آنی تولید شده می‌توان ترکیب و نمایه عمقی<sup>۲</sup> هدف‌های جامد را تا عمق  $50 \mu\text{m}$  اندازه‌گیری نمود. به دلیل وجود تشدیدهای تیز در بسیاری از توابع تحریکی این واکنش‌ها، PIGE روش بسیار مناسبی برای تعیین نمایه عمقی به روش تشدید<sup>۳</sup> است [۲].

مزیت‌های مهم روش PIGE عبارتند از: غیرمخرب بودن، سرعت بالا، حساسیت ایزوتوپی، امکان اندازه‌گیری همزمان چند ایزوتوپ، تابش زمینه کم، حد آشکارسازی بسیار خوب برای عناصر سبک و امکان تعیین غلظت نمایه عمقی با قدرت تفکیک مناسب‌تر از سایر روش‌های آنالیز با باریکه یونی می‌باشند [۳]. در این تکنیک به منظور تعیین غلظت نامعلوم عنصر در هدف ضخیم، از مقایسه با بهره پرتوی گامای هدف ضخیم خالص عنصر استفاده می‌شود. خطای این روش حدود ۲۰-۱۰ درصد گزارش شده است [۲]. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، داشتن مقادیر دقیق و قابل اعتماد داده‌های سطح مقطع ضروری می‌باشد. تعدادی محدودی از داده‌های سطح مقطع در گزارش‌ها، نشریه‌ها فیزیک هسته‌ای و در کتابخانه داده‌های پایه EXFOR و IBANDL ارائه شده است.

سطح مقطع‌های واکنش هسته‌ای  $^{19}\text{F}(p, p\gamma_2)^{19}\text{F}(E_\gamma=197 \text{ keV})$  در بازه  $824-2709 \text{ keV}$  در زاویه آشکارسازی  $90^\circ$  اندازه‌گیری و گزارش شده است [۴]. با وجود مقادیر بالای سطح مقطع‌های این واکنش، آنالیز فلوتور در بستر دیگر عناصر سبک مانند  $\text{Li}$ ،  $\text{B}$ ،  $\text{Na}$ ،  $\text{Mg}$ ،  $\text{Al}$  و  $\text{Si}$  با افت شدید حساسیت مواجه خواهد شد. در این شرایط استفاده از باریکه هلیوم ( $^4\text{He}^+$ ) و روش گسیل پرتو گاما آلفا-القایی<sup>۴</sup> (AIGE) پیشنهاد می‌شود. همانطور که جدول ۱ نشان می‌دهد، حساسیت روش AIGE برای آشکارسازی ایزوتوپ‌های  $^7\text{Li}$ ،  $^9\text{Be}$  و  $^{10}\text{B}$  از طریق واکنش‌های  $(\alpha, \alpha\gamma)$  یا  $(\alpha, p\gamma)$  بالا است [۵]. از طرفی حساسیت AIGE برای آشکارسازی C بسیار ناچیز و برای عناصر O، N، Na، Mg، Al و Si در انرژی پایین، کم است. آنچه که در مورد AIGE اهمیت دارد این است که حساسیت این روش برای آشکارسازی ایزوتوپ‌های  $^7\text{Li}$ ،  $^9\text{Be}$  و  $^{10}\text{B}$  در حدی است که در طیف گامای حاصل از بمباران بسترهای خالص Na، Mg، Al و Si می‌توان پیک‌های گامای مقادیر ناچیز  $^7\text{Li}$ ،  $^9\text{Be}$  و  $^{10}\text{B}$  را آشکارسازی و آنالیز نمود. در صورتی که آنالیز چنین نمونه‌هایی با استفاده از روش PIGE امکان‌پذیر نیست [۵]. از مزیت‌های دیگر روش AIGE نسبت به روش PIGE می‌توان به امکان آنالیز نمونه در نواحی نزدیک‌تر سطح، بهره تولید نوترون بسیار کم‌تر، آنالیز مقادیر ناچیز  $^7\text{Li}$ ،  $^9\text{Be}$  و  $^{10}\text{B}$  در بستر C، N و O، طیف گاما با زمینه پایین‌تر و ساده‌تر و امکان آشکارسازی بسیار کم هزینه‌تر پرتوهای گاما با آشکارساز NaI (در مقایسه با آشکارسازی با HPGGe) بویژه برای آنالیز برلیوم و لیتیم اشاره نمود. محدودیت عمده آنالیز با روش AIGE در دسترس نبودن داده‌های سطح مقطع واکنش‌ها می‌باشد. در حقیقت سطح مقطع‌های واکنش‌ها AIGE مناسب برای اهداف آنالیز در انرژی‌های کمتر از  $3000 \text{ keV}$  تاکنون اندازه‌گیری نشده است.

هدف از این کار پژوهشی اندازه‌گیری بهره پرتوی گامای هدف ضخیم واکنش هسته‌ای  $^{19}\text{F}(\alpha, p\gamma_1)^{22}\text{Ne}(E_\gamma=1275 \text{ keV})$  در بازه  $2800-1500 \text{ keV}$  و زاویه آشکارسازی  $90^\circ$  برای آنالیز فلوتور می‌باشد.

<sup>1</sup> Proton Induced Gamma-ray Emission

<sup>2</sup> Depth Profiling

<sup>3</sup> Resonance depth profiling

<sup>4</sup> Alpha Induced Gamma-ray Emission

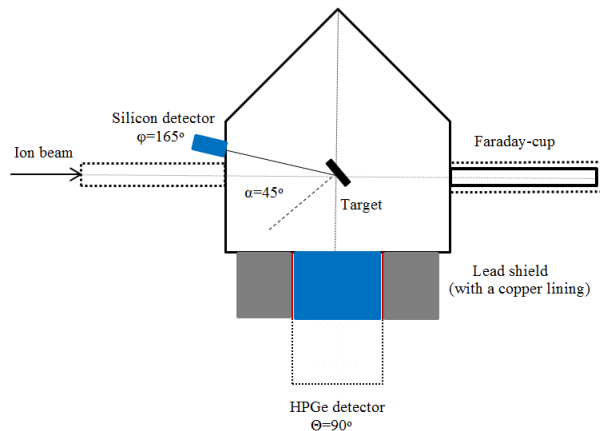
جدول ۱. حساسیت آنالیز AIGE برای عناصر سبک موجود در نمونه سنگ آتشفشانی با  $E_{\alpha} = 2/4 \text{ MeV}$  [۵].

عناصر	واکنش	انرژی گاما (keV)	حساسیت
Li	${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha\gamma){}^7\text{Li}$	۴۷۸	۰/۴۵ ppm
Be	${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$	۴۴۳۹	۰/۴۲ ppm
B	${}^{10}\text{B}(\alpha, p\gamma){}^{13}\text{C}$	۱۷۰	
		۳۰۸۸	
		۳۶۸۴	
		۳۸۵۴	۱۰ ppm
C	گامایی مشاهده نشد	-	-
N	${}^{14}\text{N}(\alpha, \gamma){}^{18}\text{F}$	۹۳۷	
		۱۰۴۱	
		۱۰۸۰	
		۲۱۲۵	
		۲۴۷۱	
		۲۵۴۲	
		۴۵۲۵	٪ ۱/۱
O	${}^{18}\text{O}(\alpha, n\gamma){}^{21}\text{Ne}$	۳۵۱	٪ ۲
	${}^{17}\text{O}(\alpha, n\gamma){}^{20}\text{Ne}$	۱۶۳۴	
F	${}^{19}\text{F}(\alpha, \alpha\gamma){}^{19}\text{F}$	۱۱۰	
	${}^{19}\text{F}(\alpha, \alpha\gamma){}^{19}\text{F}$	۱۹۷	۲۲ ppm
	${}^{19}\text{F}(\alpha, p\gamma){}^{22}\text{Ne}$	۱۲۷۵	
Na	${}^{23}\text{Na}(\alpha, \alpha\gamma){}^{23}\text{Na}$	۴۴۰	۲۶۰ ppm
	${}^{23}\text{Na}(\alpha, p\gamma){}^{26}\text{Mg}$	۱۱۳۰	
	${}^{23}\text{Na}(\alpha, p\gamma){}^{26}\text{Mg}$	۱۸۰۹	
Mg	${}^{26}\text{Mg}(\alpha, n\gamma){}^{29}\text{Si}$	۱۲۷۳	
	${}^{25}\text{Mg}(\alpha, n\gamma){}^{28}\text{Si}$	۱۷۷۹	٪ ۱/۳
		۲۸۳۹	
Al	${}^{27}\text{Al}(\alpha, p\gamma){}^{30}\text{Si}$	۲۲۳۵	٪ ۳/۲
Si	${}^{28}\text{Si}(\alpha, \gamma){}^{32}\text{S}$	۲۲۳۰	٪ ۶۵

## ۲. روش کار

تمام اندازه‌گیری‌ها در خط  $45^\circ$  راست شتابگر ۳ MV واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شد. کالیبراسیون انرژی شتابگر با استفاده از انرژی آستانه ۱۸۸۰ keV واکنش  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  و انرژی تشدید ۹۹۲ keV پروتون واکنش  ${}^{27}\text{Al}(p, \gamma){}^{28}\text{Si}$  صورت گرفت. بعد از کالیبراسیون خطا در انرژی شتاب‌دهنده از مرتبه ۰/۱ درصد تعیین شد. باریکه هلیوم پس از عبور از دو شکاف موازی ساز به قطر ۳ mm که به ترتیب در فاصله‌های ۸۷ cm و ۲۵۰ cm از مرکز محفظه قرار دارند به هدف برخورد می‌کنند. قطر باریکه فرودی در تمامی مراحل آزمایش در حد ۳/۵ mm ثابت نگه داشته شد. خلاء مسیر عبور باریکه و محفظه برهمکنش در تمامی مراحل آزمایش با استفاده همزمان از دو جفت پمپ خلاء روتاری و توربو به کمتر از  $10^{-5}$  mbar رسانده شد. برای هدف ضخیم از قرص پرس‌شده پودر خالص LiF استفاده شد. پرتوهای گاما توسط یک آشکارساز ژرمانیوم فوق خالص از نوع p با اندازه بلور  $6/58 \text{ cm} \times 6/58 \text{ cm}$  و حجم فعال  $213 \text{ cm}^3$  که در زاویه  $90^\circ$  نسبت به راستای باریکه و به فاصله ۵/۱۹ cm از مرکز هدف نصب شده آشکارسازی می‌شوند. زاویه فضایی آشکارساز به کمک اندازه‌گیری هندسی  $77/7 \text{ msr}$  بدست آمد. بهره نسبی و قدرت تفکیک انرژی آشکارساز در انرژی  $1/33 \text{ MeV}$  به ترتیب ۵۰٪ و  $1/95 \text{ keV}$  است. طیف‌های ذرات آلفای پس‌پراکنده شده از هدف نیز توسط

یک آشکارساز سدسطحی سیلیکونی به مساحت  $25 \text{ mm}^2$  و ضخامت  $300 \mu\text{m}$  که در فاصله  $183 \text{ mm}$  از مرکز هدف قرار دارد ثبت شدند. این آشکارساز با قدرت تفکیک  $13 \text{ keV}$  در زاویه  $165^\circ$  نسبت به راستای باریکه نصب شده و زاویه فضای  $10^{-4} \times 468 \text{ sr}$  را پوشش می‌دهد. شکل ۱ چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. در طول زمان اندازه‌گیری‌ها، جریان باریکه فرودی وابسته به میزان انرژی در بازه  $5 - 50 \text{ nA}$  انتخاب شد به گونه‌ای که نرخ شمارش برای آشکارساز ژرمانیوم فوق خالص حدود  $1000$  شمارش بر ثانیه، اثر انباشت ناچیز و تصحیح زمان مرگ برای آشکارساز گاما کمتر  $10$  درصد و برای آشکارساز سطحی کمتر از  $1$  درصد شد.



شکل ۱. چیدمان آزمایش (بدون مقیاس)

### ۳. نتایج

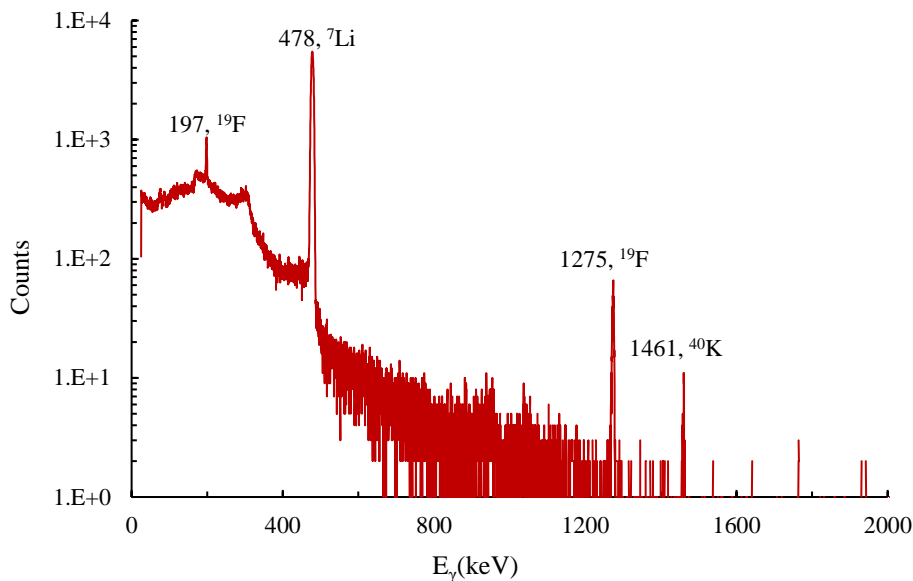
بهره مطلق هدف ضخیم تجربی  $Y_\gamma(E, \theta)$  تابعی از انرژی  $E$  و زاویه آشکارسازی  $\theta$  با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید [۶]:

$$Y_\gamma(E, \theta) = \frac{N_\gamma(E, \theta) \cdot k(E)}{4\pi \cdot \varepsilon_{abs}(E_\gamma) \cdot Q}$$

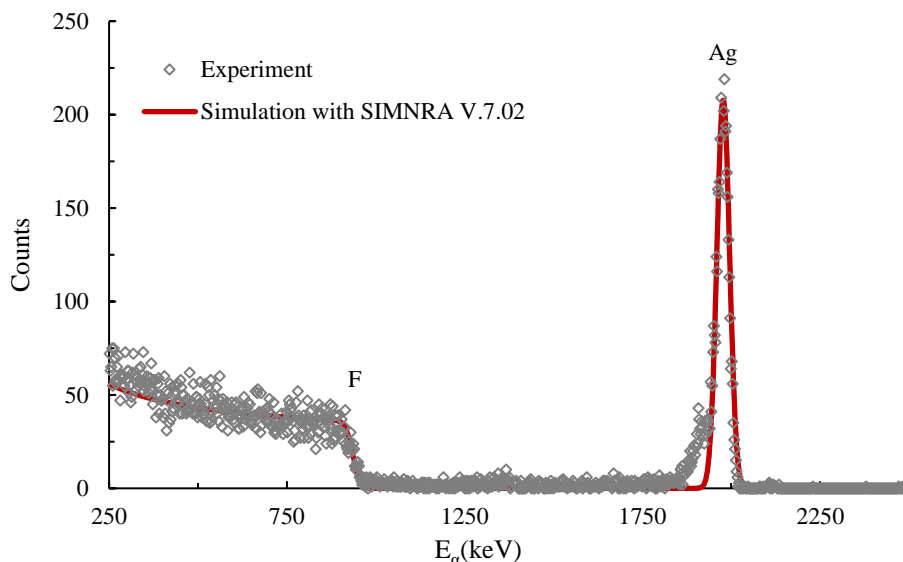
که  $N_\gamma(E, \theta)$  مساحت زیر قله انرژی مورد نظر در طیف گاما،  $\varepsilon_{abs}(E_\gamma)$  بازده مطلق آشکارساز HPGe برای گامای مورد نظر،  $Q$  بار باریکه فرودی و  $k(E)$  ضریب تصحیح ماتریس نمونه برای تبدیل بهره نمونه ضخیم ترکیب LiF به بهره خالص F می‌باشد [۷]. با توجه به نارسانا بودن پودر LiF، یک لایه نازک طلا به ضخامت حدود  $80 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^2$  برای جلوگیری از تخلیه الکتریکی در هنگام برخورد باریکه با هدف و نیز به منظور نرمالایز کردن بار بر روی سطح قرص به روش PVD<sup>5</sup> نشانده شد. ضخامت فیلم طلا با استفاده از طیف RBS حاصل از باریکه هلیوم  $2/4 \text{ MeV}$  و شبیه‌سازی طیف‌های حاصل با نرم افزار SIMNRA [۸] تعیین شد. در هر انرژی، سطح زیر قله پرتو گاما و بار باریکه فرودی به ترتیب از ثبت همزمان طیف‌های پرتوی گاما و پس‌پراکندگی ذرات آلفا بدست می‌آیند. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب طیف‌های همزمان گاما و پس‌پراکندگی ذرات آلفا حاصل از بمباران هدف ضخیم LiF/Au با باریکه هلیوم  $2/4 \text{ MeV}$  را نشان می‌دهند.

برای رسم نمودار کالیبراسیون بازده مطلق آشکارساز گاما از چشمه‌های استاندارد  $^{152}\text{Eu}$ ،  $^{133}\text{Ba}$ ،  $^{60}\text{Co}$ ،  $^{137}\text{Cs}$ ،  $^{241}\text{Am}$  در همان مکان هدف استفاده شد. با درون‌یابی نمودار کالیبراسیون، بازده آشکارساز HPGe در انرژی  $1275 \text{ keV}$ ،  $0.87$  درصد بدست آمد.

<sup>5</sup> Physical Vapor Deposition



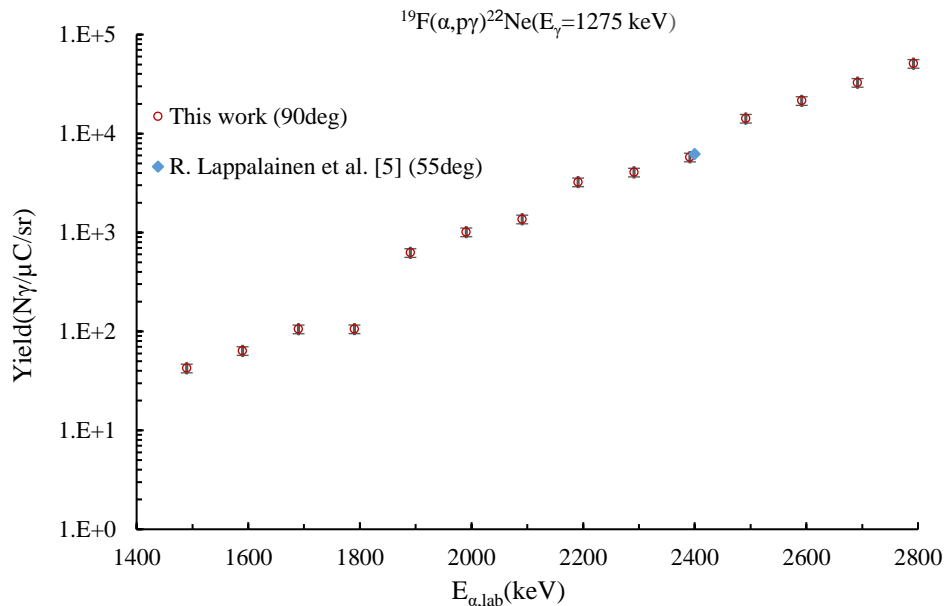
شکل ۲. طیف گاما حاصل از بمباران هدف ضخیم LiF/Ag با باریکه هلیوم ۲/۴ MeV



شکل ۳. طیف ذرات آلفا پس‌پراکنده حاصل از بمباران هدف ضخیم LiF/Ag با باریکه هلیوم ۲/۴ MeV

در این پژوهش بهره پرتو گامای هدف ضخیم فلئوئور خالص در بازه  $2800 - 1500$  keV با گام‌های  $100$  keV اندازه‌گیری شد. شکل ۴ تابع تحریکی بهره پرتو گامای هدف ضخیم واکنش هسته‌ای  $^{19}\text{F}(\alpha, p\gamma)^{22}\text{Ne}(E_\gamma=1275 \text{ keV})$  را نشان می‌دهد. در این شکل برای مقایسه نتایج، تنها داده تجربی موجود در نشریه‌ها در انرژی  $2400$  keV و زاویه  $55^\circ$  نیز ارائه شده است [۵]. همانطور که مشاهده می‌شود، سازگاری بسیار خوبی بین بهره اندازه‌گیری شده در این کار با مقدار تجربی گزارش شده وجود دارد. در این نقطه اختلاف نسبی بین دو داده حدود  $10$  درصد است که در محدوده عدم قطعیت  $20$  درصد ذکر شده در مرجع [۵] می‌باشد.

با تجمیع عدم قطعیت‌های مربوط به تعیین بازده مطلق آشکارساز گاما (۵ درصد)، نرمالایز کردن بار (۴ درصد)، توان توقف ذرات آلفا (۴ درصد)، تعیین سطح زیر قله گاما (۲ درصد) و ضریب تصحیح ماتریس k (۲ درصد) با معادله انتشار خطا، عدم قطعیت کل سیستماتیک نتایج بدست آمده حدود ۸ درصد برآورد شده است. همچنین خطاهای آماری مربوط به شمارش زیر قله ۱۲۷۵ keV در بازه ۲-۳ درصد می‌باشد.



شکل ۴. تابع تحریکی بهره پرتو گامای هدف ضخیم واکنش هسته‌ای  $^{19}\text{F}(\alpha, p\gamma)^{22}\text{Ne}(E_{\gamma}=1275 \text{ keV})$

#### ۴. نتیجه‌گیری:

در این کار پژوهشی مقادیر مطلق بهره پرتو گامای هدف ضخیم واکنش هسته‌ای  $^{19}\text{F}(\alpha, p\gamma_1)^{22}\text{Ne}$  (پرتو گامای ۱۲۷۵ keV) در بازه ۱۵۰۰ - ۲۸۰۰ keV با گام‌های ۱۰۰ keV اندازه‌گیری شدند. مقایسه بهره اندازه‌گیری شده در این مطالعه با تنها داده موجود در نشریه‌ها در  $E_{\alpha}=2400 \text{ keV}$ ، توافق بسیار خوبی را نشان می‌دهد. این نتایج برای آنالیز AIGE مقادیر کم فلونور در نمونه‌های حاوی غلظت‌های بالا دیگر عناصر سبک مانند سدیم، منیزیم، آلومینیوم و فسفر که آنالیز آنها با استفاده از روش PIGE امکان‌پذیر نیستند، استفاده خواهد شد. همچنین داده‌های بدست آمده برای استفاده در آزمایش معیار (benchmarking experiment) به منظور تست اعتبار سطح مقطع‌های واکنش هسته‌ای  $^{19}\text{F}(\alpha, p\gamma)^{22}\text{Ne}(E_{\gamma}=1275 \text{ keV})$  پیشنهاد می‌شوند.

#### ۵. مراجع:

۱. J.R. BIRD, J.S. WILLIAMS (EDs), Ion Beams for Materials Analysis, (Chapter 4), Nuclear Reactions.
۲. Y. Wang, M. Nastasi (Eds.), Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis, (Chapter 7), in: J. Räsänen, particle-induced gamma emission: PIGE, second ed., 2009.
۳. A. Jokar, et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **431** 25 (2018).
۴. A.P. Jesus et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **161-163** 186 (2000).



- 
۵. R. Lappalainen, A. Anttila and J. Räsänen, Nucl. Instr. and Meth. **212** 441 (1983).
  ۶. A. Jokar, et al., Instr. Meth. Phys. Res. B **394** 28 (2017).
  ۷. M.J. Kenny, J.R. Bird, E. Clayton, Nucl. Instr. and Meth. **168** 115 (1980).
  ۸. M. Mayer, SIMNRA, Report IPP 9/113, Max Planck institute fürplasmaphysik, Germany, 1997.