

اندازه گیری انرژی باریکه پروتونی شتابدهنده Cyclone30 در انرژی اسمی 24MeV با روش فعالسازی ورقه نازک مس طبیعی

حسین تارقلی زاده^۱، غلامرضا رئیس علی^۲، فریدون عباسی^۳، محمد میرزائی^۲، پژمان روشن فرزاد^۲، محمدرضا انصاف^۲، سعید صفا^۴

۱- دانشگاه امام حسین^(ع) ۲- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای ۳- دانشگاه شهید بهشتی
۴- دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در این مقاله به روش فعالسازی، ورقه نازک مسی با خلوص بالا (99/98%) و ضخامت کم ($25 \mu m$) تحت باریکه پروتونی $24 MeV$ فعال می شود. باریکه پروتون با ورقه مسی واکنش های گوناگونی انجام می دهد. از آنها دو واکنش $^{63}Cu(p,2n)^{62}Zn$ و $^{65}Cu(p,n)^{65}Zn$ بررسی شده اند. با استفاده از نسبت فعالیت رادیوایزوتوپ های ^{62}Zn به ^{65}Zn انرژی باریکه پروتونی اندازه گیری و با مقدار اسمی آن در شتابدهنده Cyclone30 مقایسه شده است.
Foil Activation, $^{63}Cu(p,2n)^{62}Zn$ and $^{65}Cu(p,n)^{65}Zn$, Proton beam Monitoring

مقدمه

گسترش کاربرد شتابدهنده ها در علوم مختلف مخصوصاً در فیزیک و پزشکی هسته ای و توجه روز افزون به آن باعث افزایش علاقه محققان در ارتقاء دقت داده های مورد آزمایش با این سیستم ها شده است [1]. در اثر عوامل گوناگون در شتابدهنده ممکن است سنجه بندی انرژی دستگاه به هم بخورد و بین انرژی اسمی باریکه و مقدار واقعی آن اختلاف افتد. از این رو لازم است انرژی واقعی باریکه به صورت دوره ای سنجیده شود [2]. یکی از راه های اندازه گیری انرژی باریکه گسیل شده از شتابدهنده استفاده از روش فعالسازی ورقه نازک مس است [3].

در این مقاله با استفاده از نسبت فعالیت های رادیوایزوتوپ های تولید شده در ورقه نازک مس طبیعی تحت باریکه پروتونی حدود $24 MeV$ گسیل شده از شتابدهنده Cyclone 30 پژوهشگرده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی انرژی باریکه پروتونی اندازه گیری و مقایسه می گردد. چون مس طبیعی از مانیتورهای شناخته شده انرژی باریکه پروتونی می باشد، با استفاده از رادیوایزوتوپ های تولید شده در

آن، مانیتورینگ انرژی در بازه $100\text{ MeV} - 2/5$ انجام می‌شود [4]. لازم به ذکر است که وقتی ورقه مسی تحت بمباران پروتونی فعال می‌گردد، رادیوایزوتوپ‌های مختلفی در آن به وجود می‌آید که از ایزوتوپ‌های مس و ناخالصی‌های موجود در ورقه مسی ناشی می‌شود. از بین رادیوایزوتوپ‌های تولید شده در ورقه مسی با توجه به شرایط ویژه‌ای که سطح مقطع‌های واکنش‌های $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$ و $^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$ در بازه انرژی $34-14\text{ MeV}$ دارند، این دو رادیوایزوتوپ به عنوان مانیتور انتخاب شده و از نسبت سطح مقطع‌های ^{62}Zn به ^{65}Zn که متناسب با نسبت فعالیت‌های آنها می‌باشد [5] در این مقاله برای اندازه‌گیری انرژی باریکه پروتونی در انرژی اسمی 24 MeV استفاده می‌گردد. در انرژی 24 MeV تولید اغلب رادیو داروها امکان‌پذیر بوده و از طرفی تحت این انرژی نسبت فعالیت رادیوایزوتوپ‌های ^{62}Zn به ^{65}Zn تولید شده در ورقه مسی از مرتبه 10^4 می‌باشد، از این رو آشکارسازی و آنالیز طیف گامای رادیوایزوتوپ‌های ^{62}Zn و ^{65}Zn در انرژی مذکور نیازمند دقت بیشتری در مقایسه با سایر انرژی‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق با استفاده از روش فعالسازی ورقه مانیتور مس، انرژی باریکه پروتونی شتاب‌دهنده با قرار دادن یک ورق مسی نازک با خلوص $99/91\%$ ، ضخامت $25\ \mu\text{m}$ و قطر 13 mm ، در برابر باریکه پروتونی به قطر 10 mm ، انرژی 24 MeV ، جریان $1/5\ \mu\text{A}$ که به مدت $0/5$ ساعت تحت بمباران بوده، اندازه‌گیری شده است. در این روش با توجه به میزان انرژی، شدت باریکه فرودی، ضخامت ورقه و مدت زمان بمباران، ورقه مسی بمقدار مشخصی فعال می‌گردد. این فعالیت ناشی از رادیوایزوتوپ‌های مختلفی می‌باشد که از بین آنها ^{62}Zn و ^{65}Zn مد نظر قرار گرفته‌اند. طیف‌نگاری رادیوایزوتوپ ^{62}Zn پس از $27/5$ ساعت و ^{65}Zn پس از 20 روز با آشکارساز HPGGe انجام شده است. در روش فعالسازی، اگر ورقه مسی به لایه‌های نازک‌تر تقسیم شود، در این صورت آنالیز تغییر انرژی باریکه پروتونی در ورقه مسی دقیق‌تر انجام می‌شود و سهم هر لایه در کاهش انرژی نیز مشخص می‌گردد. وقتی ورقه مسی توسط باریکه پروتونی بمباران می‌شود، انرژی باریکه از لایه‌ای به لایه دیگر تغییر کرده و هسته‌های تشکیل‌دهنده هر لایه با سطح مقطع مشخصی با پروتون‌های فرودی برهمکنش می‌کنند. این واکنش‌ها موجب فعال شدن ورقه مسی می‌شوند. می‌توان این فعالیت را به مجموع واکنش‌های پروتون با مس در لایه‌های مختلف با سطح مقطع‌های مختلف نسبت داد. اگر ضخامت ورق مسی به اندازه‌ی کافی نازک (در حد ابعاد مولکولی) باشد، در این صورت انرژی باریکه فرودی به مقدار اندکی در ورق مسی کاهش می‌یابد و فعالیت ایجاد شده در ورقه مسی تقریباً ناشی از برهمکنش پروتون‌های تک انرژی می‌باشد. در

نتیجه سطح مقطع واکنش با کمترین عدم قطعیت اندازه گیری می شود. در عمل تهیه و کار با ورقه ای به ضخامت بسیار نازک (در حد ابعاد مولکولی) با مشکلات متعددی از نظر پایداری مکانیکی و انتقال حرارت مواجه است. لذا می باید از ورقه هایی با ضخامت بیشتر استفاده نمود که در این صورت هرچه ضخامت ورقه بیشتر باشد فعالیت ایجاد شده در ورقه ناشی از لایه های مختلف آن بوده و می باید فعالیت ورقه را به عنوان فعالیت متوسط در نظر گرفت. از این رو دقت تعیین انرژی باریکه فرودی به نسبت افزایش ضخامت کاهش خواهد یافت. به طور تجربی بهترین ضخامتی که برای اندازه گیری انرژی باریکه پروتونی مورد استفاده قرار می گیرد بین $50-100 \mu\text{m}$ می باشد، که در اینجا از ورقه مسی $25 \mu\text{m}$ استفاده شده است. در روش فعالسازی، شدت جریان باریکه فرودی پارامتر مهمی است، اگر مقدار این شدت مشخص باشد سطح مقطع واکنش قابل محاسبه گردیده و انرژی باریکه پروتونی که باعث آن واکنش شده از مرجع NDS [6] بدست می آید (این داده ها بطور تجربی از اندازه گیری سطح مقطع واکنش برحسب انرژی باریکه پروتونی بدست آمده اند). بنابراین با در دست داشتن جریان باریکه فرودی، مدت زمان بمباران و اندازه گیری فعالیت رادیوایزوتوپ مورد نظر، سطح مقطع واکنش از رابطه (۱) محاسبه و با استفاده از داده های مرجع NDS انرژی باریکه فرودی روی ورقه مسی به دست می آید.

$$\sigma(\text{barn}) = \frac{1.42 \times 10^{-8} M (g/mol) T_{1/2}(h) \cdot A(\mu\text{Ci})}{\rho x (\text{mg/cm}^2) \cdot I(\mu\text{A}) \cdot T(h)} \quad (1)$$

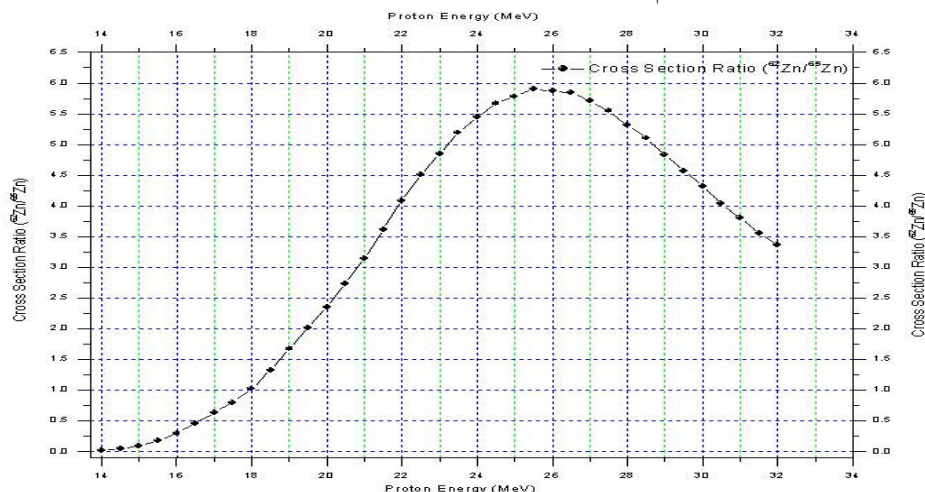
در رابطه (۱) σ سطح مقطع واکنش، M جرم مولکولی، $T_{1/2}$ نیمه عمر رادیوایزوتوپ، A فعالیت، ρx چگالی سطحی هدف، I شدت جریان باریکه و T مدت زمان بمباران می باشد.

چون آزمایش های فعالسازی به دلایل حفاظتی و محدودیت های اندازه گیری، در جریان های حدود $1 \mu\text{A}$ انجام می شود و دقت آمپرمتر سیستم شتابدهنده از مرتبه $1-2 \mu\text{A}$ است، لذا آمپرمتر شتابدهنده نمی تواند مقدار دقیق شدت جریان را مشخص کند. در این صورت علاوه بر سطح مقطع واکنش، شدت جریان باریکه پروتونی نیز مجهول می شود. در نتیجه در یک رابطه دو مجهول وجود خواهد داشت که از نظر ریاضی غیر قابل حل می باشد. این مشکل را می توان با استفاده از شرایط ویژه ای که در فیزیک مسئله وجود دارد، حل نمود. مس طبیعی در برهمکنش با باریکه پروتونی در بازه انرژی $34-14 \text{ MeV}$ رادیوایزوتوپ های مختلفی را تولید می کند که از بین آنها، سطح مقطع واکنش ^{65}Zn و ^{62}Zn به شکلی است که در بازه انرژی مذکور می توان با تقسیم این سطح مقطع ها به یکدیگر یکی از مجهولات (جریان باریکه I) را در رابطه (۱) حذف نمود. از آنجاکه باریکه پروتونی با یک شدت مشخص ورق مسی را تحت بمباران قرار داده و بطور همزمان رادیوایزوتوپ ها تولید می شوند، لذا شدت جریان مربوط به

تولید محصولات یکسان بوده و می توان جریان و پارامترهای مشابه را با تقسیم سطح مقطع واکنش های ${}^{nat}Cu(p,n){}^{65}Zn$ و ${}^{nat}Cu(p,2n){}^{62}Zn$ به یکدیگر حذف نمود. رابطه جدیدی که از نسبت سطح مقطع واکنش ها حاصل می شود برابر با نسبت حاصلضرب نیمه عمر در فعالیت ها بوده و مستقل از جریان باریکه پروتونی و پارامترهای مشابه می باشد(رابطه ۲).

$$\frac{\sigma({}^{62}Zn)}{\sigma({}^{65}Zn)} = \frac{[A({}^{62}Zn)T_{1/2}({}^{62}Zn)]}{[A({}^{65}Zn)T_{1/2}({}^{65}Zn)]} \quad (2)$$

با استفاده از ویژگی نمودارهای سطح مقطع واکنش های ${}^{nat}Cu(p,n){}^{65}Zn$ و ${}^{nat}Cu(p,2n){}^{62}Zn$ می توان نقاط روی منحنی ها را بر حسب انرژی بطور یک به یک با هم مقایسه و نسبت سطح مقطع واکنش ها را بر حسب انرژی باریکه فرودی رسم نمود (شکل ۱).



شکل ۱- منحنی نسبت سطح مقطع واکنش های ${}^{nat}Cu(p,2n){}^{62}Zn$ و ${}^{nat}Cu(p,n){}^{65}Zn$ بر حسب انرژی باریکه فرودی

با توجه به رابطه (۲) پس از فعال سازی رقه مسی با باریکه پروتونی و اندازه گیری فعالیت هر یک از رادیوایزوتوپ های ${}^{62}Zn$ و ${}^{65}Zn$ با آشکارسازهای HPGc، نسبت سطح مقطع ها محاسبه شده و با استفاده از نمودار شکل ۱، انرژی باریکه فرودی به دست می آید. از آنجاییکه در شکل ۱ شیب منحنی در بازه انرژی ۲۷-۲۵ MeV به سمت صفر میل می کند، خطاهای محاسباتی به شدت افزایش یافته و در نتیجه در این بازه انرژی در مقایسه با سایر انرژی ها دقت داده ها بسیار کاهش می یابد.

در اینجا ضخامت ورقه مسی با توجه به باند انرژی شتابدهنده و با استفاده از کد SRIM محاسبه گشته [7]، از طرفی با در نظر گرفتن ضخامت ورقه، محدودیت طیف نگاری با آشکارسازهای HPGe و مشکلات حفاظتی، ورقه مسی تحت باریکه پروتونی با بهره کمتر از $1\mu\text{A}\cdot\text{h}$ فعال شده است. در این آزمایش نگهدارنده هدف مسی از جنس آلومینیوم بوده و بر اساس استاندارد شاتلهای Solid Target طوری طراحی شده است که باریکه پروتونی بطور عمودی با هدف برخورد کند. این شاتل ها توسط آب با فشار حدود 20bar خنک شده و از استاندارد خلاء بالا برخوردار می باشند.

نتایج

در این تحقیق ورقه مسی تحت باریکه پروتونی در شتابدهنده Cyclone30 بمباران شده و رادیویزوتوپ های ^{62}Zn و ^{65}Zn در واکنش های $^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$ و $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$ تولید شده اند. طیف نگاری رادیویزوتوپ ها توسط آشکارساز HPGe و آنالیز طیف توسط نرم افزار OMNIGAM انجام گردیده است. منحنی بهره این آشکارساز با استفاده از چشمه های نقطه ای ^{241}Am , ^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{60}Co است. بدست آمده و کالیبراسیون انرژی آن با چشمه گامای چند گانه (^{241}Am , ^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{60}Co) انجام شده است. در آشکارسازی ورقه مسی فعال شده، رادیویزوتوپ های مختلفی مشاهده گردیده که برخی از آنها ناشی از ناخالصی های موجود در ورقه مسی بوده و برخی دیگر مربوط به قله های زمینه می باشد. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به طیف نگاری و خطاهای مربوطه موجود است.

جدول ۱: اطلاعات طیف نگاری به همراه خطاهای محاسبه شده

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
Reaction	Isotop & $T_{1/2}$	λ	Energy (keV)	Intensity (%)	Net Area	Del.Net Area (%)	Det. Eff. (%)	Del. Det.Eff. (%)	Time Spect.	Time trans. (sec)
(p,n)	$^{62}\text{Zn}(9.26\text{h})$	$2/0.8\text{E}-5$	$548/35$	$15/3$	23581	0.77	19/99	0.0124	1550	$9/9\text{E}+4$
	$^{62}\text{Zn}(9.26\text{h})$	$2/0.8\text{E}-5$	$596/56$	26	36866	0.6	18/63	0.013	1550	$9/9\text{E}+4$
(p,2n)	$^{65}\text{Zn}(244\text{d})$	$2/2.8\text{E}-8$	$1115/54$	$5.0/6$	127099	0.29	11/19	0.0034	4480	$1/7\text{E}+6$

در جدول ۱، ۱- نوع واکنش، ۲- رادیویزوتوپ های طیف نگاری شده، ۳- ثابت واپاشی، ۴- انرژی مربوط به قله های قابل آنالیز رادیویزوتوپ های ^{62}Zn و ^{65}Zn ، ۵- شدت پرتوهای گاما، ۶- سطح زیر قله، ۷- خطای مربوط به سطح زیر قله، ۸- منحنی بهره آشکارساز، ۹- خطای مربوط به منحنی بهره آشکارساز، ۱۰- مدت زمان طیف نگاری، ۱۱- مدت زمان مربوط به بازه زمانی از آخر بمباران تا زمان طیف

نگاری. با استفاده از داده های جدول ۱، فعالیت هر یک از رادیوایزوتوپ ها برای زمان انتهای بمباران ($t=0$) محاسبه و سپس نتایج در رابطه (۲) قرار داده می شود. با استفاده از شکل ۱ و نسبت حاصله از رابطه (۲)، متوسط انرژی باریکه فرودی بدست می آید. در جدول ۲ فعالیت رادیوایزوتوپ های مورد نظر و انرژی باریکه فرودی اندازه گیری شده در این تحقیق ثبت شده است.

جدول ۲: نتایج حاصل از بمباران ورقه مس در شتابدهنده Cyclone30 با انرژی ۲۴ MeV

نوع واکنش هسته ای	رادیوایزوتوپ تولید شده	فعالیت (A ₀) اندازه گیری شده μCi	انرژی اندازه گیری شده MeV
$^{63}\text{Cu}(P, 2n)$	^{62}Zn	137 ± 1	23.7 ± 0.4
$^{65}\text{Cu}(P, n)$	^{65}Zn	$4.07 \times 10^{-2} \pm 1.19 \times 10^{-4}$	23.7 ± 0.4

همانطور که مشاهده می گردد، انرژی اندازه گیری شده کمتر از انرژی ثبت شده در سیکلوترون می باشد. این انرژی ناشی از فعالیت کل محیط بمباران شده می باشد، در صورتی که انرژی ثبت شده در سیکلوترون مربوط به انرژی باریکه فرودی روی ورقه است.

بحث و نتیجه گیری :

در روش فعالسازی ورقه های نازک، سه دسته خطا وجود دارد. دسته اول مربوط به عدم یقین های باریکه پروتونی گسیل شده از شتابدهنده می باشد، دسته دوم با مشخصات ورقه نازک در ارتباط بوده و دسته سوم به عدم یقین های طیف نگاری ورقه فعال شده مربوط است [8]. با توجه به روشی که در این تحقیق انتخاب شده است (استفاده از نسبت سطح مقطع واکنش ها) خطاهای دسته اول و دوم حذف شده و فقط خطای دسته سوم در محاسبات لحاظ می گردد. با توجه به جدول ۲ مشاهده می گردد که انرژی اندازه گیری با انرژی تنظیم شده در شتابدهنده از توافق خوبی برخوردار می باشد.

مراجع:

- 1- IAEA-NDS-210, FORMATTING OF CROSS SECTIONS FOR PRODUCTION OF DIAGNOSTIC RADIONUCLIDES IN ENDF-6 FORMAT, (27 Nov. 2003).
- 2- T. Clarke, *Nuclear Excitation Function*, Phys. Rev., 71, 87-191 (1947).
- 3- N. M. Hintz, *Excitation Function to 100 MeV*, Phys. Rev., 88, 19-27 (1952).
- 4- I. R. Williams and C. B. Fulmer, *Excitation Function for Radioactive Isotopes Produced by Protons below 60 MeV on Al, Fe, and Cu*, Phys. Rev., 162, 1055-1061 (1967).



- 5- P. Kopecky, *Poroton Beam Monitoring Via the $Cu(p,x)^{58}Co$, $^{63}Cu(p,2n)^{62}Zn$, and $^{65}Cu(p,2n)^{65}Zn$ Reactions in Copper*, Int. J. Appl. Radiat. Isot., 36, (8), pp. 657-661(1985).
- 6- International Atomic Energy Agency (IAEA) Technical Document 1211,(May 2001).
- 7- J. F. Ziegler and J. P. Biersack, *SRIM 2003*. 20 [http ://www. SRIM. org](http://www.SRIM.org).
- 8- F. Tarkanyi, *Excitation Function of Proton Induced Nuclear Reactions on Natural Nickel for Monitoring Beam Energy and Intensity*, Appl. Radiat. Isot., 42, (6), pp.513-517(1991).
- 9- BLANN, M., *Hybrid Model for Pre-equilibrium decay in nuclear reactions*, Phys. Rev. Lett. 27., 337-340, (1997).