



اندازه‌گیری مطلق ایزوتوپ‌های ^{16}O و ^{18}O در نمونه بمباران شده H_2^{18}O به روش گسیل پرتو گاما القایی با دوترون

حسین رفیع‌خیری^۱، علیرضا جوکار^{۱*}، فریبا جوهری دها^۲، غلامرضا اصلانی^۲

۱. پژوهشکده‌ی فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران
۲. پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

*Email: ajowkar@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۳/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۴/۲۷

چکیده

در این کار پژوهشی ما از روش گسیل پرتوی گامای القایی با دوترون (DIGE) بر اساس واکنش‌های هسته‌ای $^{18}\text{O}(d, p\gamma)^{19}\text{O}(E_\gamma = 1376 \text{ keV})$ و $^{16}\text{O}(d, p\gamma)^{17}\text{O}(E_\gamma = 871 \text{ keV})$ برای اندازه‌گیری مطلق ایزوتوپ‌های پایدار ^{16}O و ^{18}O در نمونه H_2^{18}O پرتودهی شده استفاده کردیم. این نمونه به عنوان هدف برای تولید رادیوایزوتوپ ^{18}F با باریکه پروتون شتابگر سیکلوترون بمباران شده بود. هدف نازک Ta_2O_5 مورد استفاده در این آزمایش با آندایزینگ فلز تانتالوم با آب پرتودهی شده ساخته شد. مزیت اصلی روش DIGE اندازه‌گیری هم‌زمان ایزوتوپ‌های ^{16}O و ^{18}O تنها با یک آزمایش با باریکه دوترون است. اعتبار روش با تعیین مقدار ایزوتوپ ^{18}O برای یک نمونه آب با غنای ^{18}O مشخص بررسی شد. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از باریکه دوترون 1150 keV شتابگر الکتروستاتیک 3 MV واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شد.

کلیدواژه‌ها: واکنش هسته‌ای، گسیل پرتو گاما القایی با ذره، ایزوتوپ‌های ^{16}O و ^{18}O

Absolute measurement of the isotopes ^{16}O and ^{18}O in bombarded H_2^{18}O sample using deuteron-induced gamma-ray emission technique

H. Rafi-Kheiri¹, A. Jokar^{*1}, F. Johari Doha², G. Aslani²

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

Research Article

Received 24.5.2021, Accepted 18.7.2021

Abstract

In this research work, we used the Deuteron Induced Gamma-ray Emission (DIGE) method based on $^{18}\text{O}(d, p\gamma)^{19}\text{O}(E_\gamma=1376 \text{ keV})$, and $^{16}\text{O}(d, p\gamma)^{17}\text{O}(E_\gamma= 871 \text{ keV})$ nuclear reactions to determine absolute amounts of the stable isotopes ^{16}O and ^{18}O in the irradiated H_2^{18}O sample. This sample had been bombarded as a target by the proton beam of a cyclotron accelerator in order to ^{18}F radioisotope production. The employed thin Ta_2O_5 target was prepared by anodizing tantalum backing with the sample of irradiated H_2^{18}O . The main advantage of PIGE is in measuring the simultaneity of the isotopes ^{16}O and ^{18}O only using one experience with a deuteron beam. The method's reliability was checked by determining isotope ^{18}O for a sample with given ^{18}O enrichment. These measurements were conducted using the 1150 keV deuteron beam of the 3 MV Van de Graaff electrostatic accelerator of the Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI).

Keywords: Nuclear reaction, Particle induced gamma-ray emission, Isotopes ^{16}O and ^{18}O



۱. مقدمه

روش‌های آنالیز مبتنی بر واکنش‌های هسته‌ای مانند آنالیز فعال‌سازی نوترون^{۱۱} (NAA) و آنالیز با واکنش هسته‌ای^{۱۲} (NRA) جایگزین و مکمل مناسب برای روش‌های متداول تعیین ایزوتوپی محسوب می‌شوند که مشکلات فوق را تا حد بسیار زیادی کاهش می‌دهند. سرعت بالای آنالیز، آنالیز مطلق بدون نیاز به نمونه استاندارد و عدم نیاز به نمونه‌سازی از جمله مزیت‌های مهم این روش‌ها است.

تاکنون از چندین روش هسته‌ای برای آنالیز ایزوتوپ‌های اکسیژن استفاده شده است. با روش فعال‌سازی نوترونی از طریق واکنش هسته‌ای $^{18}\text{O}(n,\gamma)^{19}\text{O}$ با نوترون‌های حرارتی می‌توان ایزوتوپ ^{18}O را در نمونه‌های بالک تعیین نمود. اگرچه استفاده از این روش به علت نیمه‌عمر بسیار کوتاه ^{19}O ، سطح مقطع‌گیراندازی پایین و زمینه پرتوی گاما بالا حاصل از واکنش‌های رقیب با محدودیت همراه است [۱۰].

روش گسیل پرتو ایکس ذره-القایی^{۱۳} (PIXE) به علت بازده کم آشکارساز Si(Li) برای پرتوهای ایکس مشخصه حاصل از بمباران عناصر با عدد اتمی $Z \leq 11$ و نیز اثر خود جذبی ماتریس هدف برای پرتوهای ایکس، روش مناسبی جهت آنالیز اکسیژن نمی‌باشد [۱۱]. در روش اسپکتروسکوپی پس‌پراکندگی راترفورد^{۱۴} (RBS) نیز با توجه به این‌که سطح مقطع پراکندگی راترفورد متناسب با Z^2 است، آنالیز اکسیژن در نمونه‌های ضخیم حاوی عناصر سنگین‌تر، به علت پوشش سیگنال اکسیژن توسط زمینه مربوط به دیگر عناصر با مشکل همراه است [۱۲]. با توجه به محدودیت‌های موجود عموماً تعیین غلظت اکسیژن به روش آنالیز با واکنش هسته‌ای انجام می‌گیرد. جامع‌ترین مطالعه در زمینه به‌کارگیری واکنش‌های هسته‌ای برای تعیین ایزوتوپ‌های اکسیژن توسط Cohen و Rose در اواخر دهه ۹۰ میلادی ارائه شده است [۱۳]. واکنش‌های $^{18}\text{O}(p,\alpha)^{15}\text{N}$ ، $^{16}\text{O}(d,\alpha)^{14}\text{N}$ ، $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}$ ، $^{18}\text{O}(d,p)^{19}\text{O}$ ، $^{18}\text{O}(d,\alpha)^{16}\text{N}$ ، $^{16}\text{O}(d,p)^{17}\text{O}$ از مهم‌ترین این واکنش‌های هسته‌ای هستند که به طور متداول برای آنالیز ایزوتوپ‌های اکسیژن در نمونه‌های مختلف به کار می‌روند.

به دلیل سطح مقطع‌های نسبتاً مناسب واکنش‌های (d,α) و (d,p) بر هدف‌های ^{16}O و ^{18}O ، این واکنش‌ها به طور معمول برای آنالیز اکسیژن استفاده می‌شوند. مزایای استفاده از واکنش‌های $^{18}\text{O}(d, \alpha)^{16}\text{N}$ ، $^{18}\text{O}(d, \alpha)^{14}\text{N}$ ، $^{16}\text{O}(d, p)^{17}\text{O}$ ، $^{16}\text{O}(d, p)^{19}\text{O}$ نسبت به سایر تکنیک‌های هسته‌ای توسط Amsel و همکارانش مورد بحث قرار گرفته‌است [۱۴].

اکسیژن یکی از مهم‌ترین عناصر جهان هستی است که ۲۰٫۹۵٪ از حجم جو زمین، ۵۰٪ وزن پوسته زمین و تقریباً ۶۵٪ بدن انسان را تشکیل می‌دهد. اکسیژن بسیار واکنش‌پذیر است و با بسیاری از عناصر ترکیب اکسید پایدار تشکیل داده و باعث تغییر خواص مواد می‌شود. اکسیژن دارای سه ایزوتوپ پایدار ^{16}O (۹۹٫۷۵٪)، ^{17}O (۰٫۳۷٪) و ^{18}O (۰٫۲۰۴٪) و چهار ایزوتوپ ناپایدار ^{14}O ، ^{15}O ، ^{19}O و ^{20}O با نیمه‌عمر بسیار کوتاه است. از ایزوتوپ ^{18}O به عنوان یک ردیاب^۱ قدرتمند برای بررسی مکانیسم‌های انتقال اکسیژن در مطالعه لایه‌نشانی و رفتار رشد فیلم‌های نازک [۱-۳]، مطالعه خوردگی [۴]، مطالعه آهنگ متابولیسم حیوانات [۵] و مطالعه نفوذ آب در بسترهای متخلل آب انبارهای سنگی استفاده شده است [۶]. علاوه بر این، تعیین نسبت $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ در علوم مختلف مانند اقلیم‌شناسی، هیدرولوژی، بیوشیمی و کیهان‌شیمی^۲ مورد توجه قرار گرفته است [۷، ۸]. از این رو مشخصه‌یابی و آنالیز ایزوتوپی اکسیژن در بسترهای مختلف یک صورت مسأله مهم در آنالیز مواد است.

با توجه به پیشرفت روزافزون ابزارهای اندازه‌گیری، در حال حاضر روش‌های متنوع و بسیار دقیقی برای تعیین ایزوتوپ‌های پایدار وجود دارد که از متداول‌ترین آن‌ها می‌توان به روش‌های طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپ^۳ (IRMS)، طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی^۴ (ICP-MS)، روش طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری^۵ (LIBS)، روش طیف‌سنجی ایزوتوپی مولکولی سایش لیزری^۶ (LAMIS)، طیف‌سنجی جرمی با شتابگر^۷ (AMS)، طیف‌سنجی جرمی یونیزاسیون حرارتی^۸ (TIMS)، طیف‌سنجی جرمی یون‌های ثانویه^۹ (SIMS) و طیف‌سنجی جرمی زمان پرواز^{۱۰} (TOF-MS) اشاره کرد. مهم‌ترین محدودیت روش‌های مبتنی بر طیف‌سنجی جرمی نیاز آن‌ها به فرایند پیچیده و زمان‌بر نمونه‌سازی است. همچنین برخی از این روش‌ها مخرب بوده و برای اندازه‌گیری کمی نیازمند نمونه استاندارد هستند. اگرچه روش‌های LIBS و LAMIS نیاز به نمونه‌سازی ندارند اما در حال حاضر تنها تعداد محدودی از ایزوتوپ‌ها با این دو روش قابل اندازه‌گیری می‌باشند [۹].

1. Tracer
2. Cosmochemistry
3. Isotope-Ratio Mass Spectrometry
4. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
5. Laser Induced Breakdown Spectroscopy
6. Laser Ablation Molecular Isotopic Spectrometry
7. Accelerator Mass Spectrometry
8. Thermal Ionization Mass Spectrometry
9. Secondary-Ion Mass Spectrometry
10. Time-of-Flight Mass Spectrometry

11. Nuclear Activation Analysis
12. Nuclear Reaction Analysis
13. Particle Induced X-Ray Emission
14. Rutherford Backscattering Spectroscopy
Journal of Nuclear Science and Technology



اطلاعات طیف‌نمایی هسته‌ای برای هسته‌های ^{16}O و ^{18}O نشان می‌دهد که پرتوی گامای 1376 keV نتیجه‌گذار از دومین تراز برانگیخته‌ی هسته ^{16}O با $E_x=1,471 \text{ MeV}$ و پرتوی $(J=1,2^+)$ به اولین تراز با $E_x=0,096 \text{ MeV}$ ($J=3,2^+$) و پرتوی گامای 871 keV حاصل از گذار از اولین تراز برانگیخته‌ی هسته ^{18}O با $E_x=0,87 \text{ MeV}$ ($J=1,2^+$) به تراز پایه ($J=5,2^+$) است [۲۱].

بررسی مراجع نشان می‌دهد که در چندین مورد از واکنش $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma=871 \text{ keV}$) مختلف استفاده شده است [۲۲-۲۹]. در یکی از کاربردهای جالب، Vickridge و همکارانش از این واکنش برای اندازه‌گیری دقیق اکسیژن در نمونه ابررساناهای دمای بالا استفاده کردند [۲۷]. در هنگام استفاده از این واکنش باید وجود احتمالی ناخالصی فلئوئر حتی به مقدار بسیار ناچیز را در هدف بررسی نمود. اثر هم‌پوشانی گامای 871 keV ساطع شده از واکنش $^{17}\text{O}(d,\alpha\gamma)^{14}\text{F}$ ($E_\gamma=871 \text{ keV}$) ناشی از وجود فلئوئر باعث ایجاد خطا در تعیین غلظت اکسیژن از طریق واکنش $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma=871 \text{ keV}$) بررسی نشریه‌ها همچنین نشان می‌دهد که تاکنون از واکنش هسته‌ای $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma=1376 \text{ keV}$) برای آنالیز اکسیژن استفاده نشده است. این مسأله ممکن است به‌خاطر در دسترس نبودن مقادیر سطح مقطع این واکنش در سالیان گذشته باشد.

لازم به ذکر است که آنالیز مطلق به روش DIGE شدیداً به داده‌های سطح مقطع واکنش وابسته است. تاکنون برای واکنش $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma=871 \text{ keV}$) سه مجموعه داده سطح مقطع و برای واکنش $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma=1376 \text{ keV}$) و تنها یک مجموعه داده اندازه‌گیری و گزارش شده است [۲۸-۳۱]. از میان آن‌ها جدیدترین مقادیر سطح مقطع واکنش $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma=871 \text{ keV}$) و تنها داده‌های موجود واکنش $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma=1376 \text{ keV}$) در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای توسط Jokar و Rafi-kheiri در سال ۲۰۲۰ اندازه‌گیری و منتشر شد [۳۱].

به عنوان یک کاربرد ویژه روش DIGE با استفاده از سطح مقطع‌های اندازه‌گیری شده، می‌توان نسبت ایزوتوپ‌های $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ در نمونه آب غنی‌شده (H_2^{18}O) را به‌طور مطلق و بدون نیاز به استاندارد تعیین کرد.

در حال حاضر در شتابگر سیکلوترون کرج از هدف مایع H_2^{18}O برای تولید رادیوایزوتوپ ^{18}F از طریق واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ با باریکه پروتون 18 MeV استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا مایع H_2^{18}O توسط سرنگ‌های همیلوتونی

استفاده از واکنش‌های فوق امکان آنالیز هم‌زمان ایزوتوپ‌های ^{16}O و ^{18}O و تعیین نسبت $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ تنها با یک آزمایش و یک باریکه (باریکه دوترون) وجود دارد. با این وجود، این واکنش‌ها تنها محدود به آنالیز هدف‌های نازک یا عمق‌های نزدیک به سطح، چند میکرون اول هدف‌های ضخیم می‌باشند. همچنین طیف ذرات حاصل از بمباران ایزوتوپ‌های اکسیژن با باریکه دوترون پیچیده و احتمال هم‌پوشانی بین قله‌های ذرات α و p حاصل از واکنش‌های رقیب وجود دارد.

واکنش $^{18}\text{O}(p,\alpha)^{15}\text{N}$ ($Q=3,981 \text{ MeV}$) یکی از متداول‌ترین واکنش‌های هسته‌ای مورد استفاده برای آنالیز و تعیین نمای عمقی ^{18}O است [۱۵-۱۷]. مقادیر سطح مقطع بالای این واکنش نسبت به واکنش‌های القایی با باریکه دوترون، امکان آنالیز سریع ایزوتوپ ^{18}O را حتی در انرژی‌های پایین‌تر از 1 MeV فراهم می‌کند. در میان رزونانس‌های واکنش $^{18}\text{O}(p,\alpha)^{15}\text{N}$ ، رزونانس باریک 633 keV (پهنای حدود $2,1 \text{ keV}$) برای اندازه‌گیری نمای عمقی هدف‌های نازک یا نواحی نزدیک به سطح هدف‌های ضخیم مناسب است [۱۸]. اگرچه در مقایسه با واکنش‌های القایی با باریکه دوترون، به‌علت مقدار Q منفی واکنش $^{18}\text{O}(p,\alpha)^{15}\text{N}$ ($Q=-5,122 \text{ MeV}$)، آنالیز هم‌زمان ^{16}O و ^{18}O با استفاده از واکنش‌های $^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$ و $^{18}\text{O}(p,\alpha)^{15}\text{N}$ ممکن نیست [۱۹، ۲۰]. در تعدادی از کاربردها از دو آزمایش مجزا با باریکه‌های پروتون و دوترون با ترکیب واکنش‌های $^{18}\text{O}(p,\alpha)^{15}\text{N}$ و $^{16}\text{O}(d,p)^{17}\text{O}$ یا از باریکه‌های پروتون و هلیوم با ترکیب واکنش‌های $^{18}\text{O}(p,\alpha)^{15}\text{N}$ و پراکندگی راترفورد $^{nat}\text{O}(\alpha,\alpha)^{nat}\text{O}$ برای آنالیز ایزوتوپ‌های اکسیژن و تعیین نسبت $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ استفاده شده که انجام این آزمایش‌ها پیچیده و زمان‌بر است [۲۰].

در این کار پژوهشی برای رفع محدودیت‌های ذکر شده، روش گسیل پرتوی گامای القایی با دوترون^۱ (DIGE) با استفاده از واکنش‌های هسته‌ای $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma=1376 \text{ keV}$) و $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma=871 \text{ keV}$) پیشنهاد می‌شود. با استفاده از این دو واکنش امکان آنالیز هم‌زمان ایزوتوپ‌های ^{16}O و ^{18}O در هدف‌های نازک و ضخیم تنها با یک آزمایش و یک باریکه فراهم خواهد شد. استفاده از یک باریکه فرودی برای آنالیز هم‌زمان ایزوتوپ‌ها، کاهش خطای سیستماتیک و کاهش زمان اندازه‌گیری را در بر خواهد داشت. از مزیت‌های دیگر روش DIGE نسبت به روش NRA می‌توان به دسترسی به عمق کاوش بیش‌تر تا چند ده میکرومتر، قابلیت استفاده از باریکه خارجی و امکان اندازه‌گیری هم‌زمان و بدون هم‌پوشانی عناصر N و C اشاره کرد.

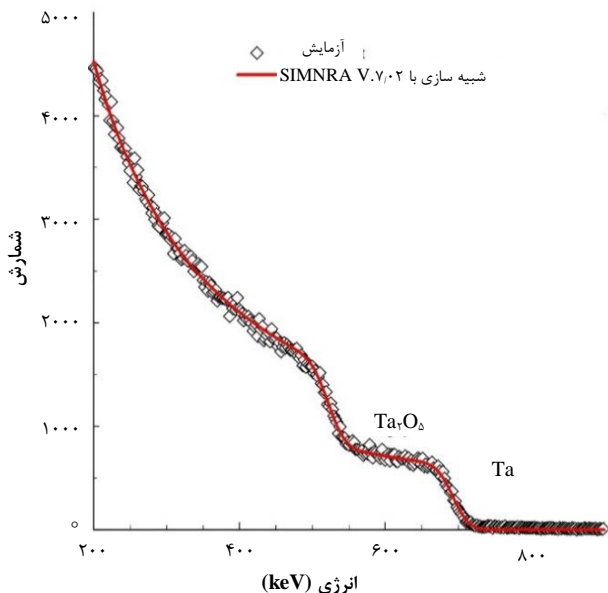
۱. Deuteron Induced Gamma-Ray Emission



چگالی جریان ثابت 2 mA/cm^2 تا حداکثر ولتاژ 100 V انجام گردید. بدین منظور از یک منبع جریان ثابت با دقت 0.1 mA و حداکثر ولتاژ خروجی 240 V جهت آندایزینگ استفاده شد. لازم به توضیح این که با توجه به حجم کم نمونه آب دریافتی، یک سلول آندایزینگ جدید حجم 10 cc طراحی و ساخته شد.

بعد از ساخت هدف نازک $\text{Ta}_2^{16,18}\text{O}_5$ ، احتمال وجود فلئوئور در آن با استفاده از روش DIGE با باریکه دوترون 1.8 MeV مورد بررسی قرار گرفت. هیچ سیگنالی حاصل از واکنش دوترون‌ها با هسته‌های فلئوئور در طیف گاما دیده نشد.

با استفاده از طیف ذرات پس‌پراکنده شده حاصل از بمباران هدف با ذرات آلفای 900 keV تعداد مطلق اتم‌های اکسیژن و تانتالیوم بر واحد سطح تعیین شدند. شبیه‌سازی طیف‌ها توسط نرم‌افزار $7.0.2 \text{ SIMNRA}$ و با استفاده از رابطه توان توقف Zigler/Biersack و مدل تفرق Chu&Yang انجام شد. در شبیه‌سازی‌ها تصحیحات مربوط به اثرات تجمع و زمان مرده آشکارسازی اعمال شد. سطح مقطع پراکندگی هلیوم روی هسته‌های O و Ta رادرفورد در نظر گرفته شد [۳۴]. در شکل ۱ طیف تجربی و شبیه‌سازی حاصل ارائه شده است. رفتار پله‌ای شکل مشاهده شده در طیف، ناشی از افت ذرات آلفا در لایه Ta_2O_5 سطحی می‌باشد. در حقیقت از این پله برای تعیین ضخامت لایه Ta_2O_5 استفاده شد. بر اساس شبیه‌سازی طیف تجربی، چگالی سطحی اکسیژن $1.0^{17} \text{ O/cm}^2 (\pm 0.7/9)$ و تانتالیوم $1.0^{17} \text{ Ta/cm}^2 (\pm 0.3/3)$ به دست آمد.



شکل ۱. طیف‌های تجربی و شبیه‌سازی در زاویه 165° حاصل از بمباران هدف $\text{Ta}_2^{16,18}\text{O}_5/\text{Ta}$ با $E_\alpha=900 \text{ keV}$

از اتاق کنترل سیکلوترون به داخل ظرف هدف ارسال می‌شود. یکی از چالش‌های بزرگ فرایند تولید رادیوایزوتوپ‌ها در شتابگر سیکلوترون ایجاد گرمای بسیار زیاد پس از برخورد بیم پروتون به ماده هدف می‌باشد. این گرما، از انرژی جنبشی پروتون‌های شتاب‌گرفته از سیکلوترون و واکنش‌های هسته‌ای مختلف حاصل می‌شود. خنک‌کاری هدف با چرخش آب به دور بدنه خارجی هدف انجام می‌گیرد. در حال حاضر جنس بدنه هدف مایع H_2^{18}O از جنس نئوبیوم و شکل آن جهت افزایش سطح در دسترس باریکه مخروطی است. مقدار گرمای ایجاد شده حتی با خنک‌کاری، باعث تبخیر سریع آب غنی شده داخل بدنه هدف می‌شود. با تبخیر آب غنی شده و کاهش سطح در دسترس باریکه پروتون، بازده تولید ^{18}F کاهش می‌یابد. به منظور جلوگیری از این اتفاق از کمپرسور گاز هلیوم با فشار بالا 30 bar بر روی آب غنی شده استفاده می‌شود.

با توجه به این که تهیه نمونه آب با غنای بالای ^{18}O مستلزم هزینه زیادی می‌باشد، از باقی‌مانده هدف بمباران شده از نو برای تولید ایزوتوپ ^{18}F مورد نیاز رادیوداروی $^{18}\text{F}\text{FDG}$ استفاده می‌شود.

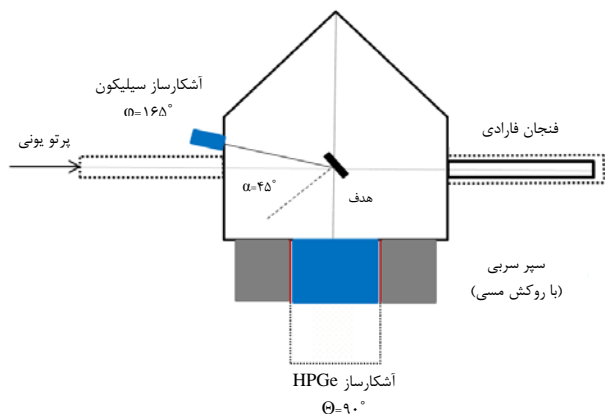
هدف از این کار پژوهشی تعیین درصد غنای ایزوتوپ‌های ^{18}O و ^{16}O در هدف بمباران شده H_2^{18}O با روش DIGE از طریق واکنش‌های هسته‌ای $^{16}\text{O}(d, p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma = 1376 \text{ keV}$) و $^{18}\text{O}(d, p\gamma)^{17}\text{O}$ ($E_\gamma = 871 \text{ keV}$) می‌باشد.

۲. جزئیات تجربی

۲.۱ ساخت هدف

با توجه به این که در محفظه واکنش تحت خلأ موجود امکان بمباران و آنالیز مستقیم نمونه مایع وجود ندارد، در این آزمایش از یک هدف جامد و نازک $\text{Ta}_2^{16,18}\text{O}_5$ استفاده گردید. هدف $\text{Ta}_2^{16,18}\text{O}_5$ به روش آندایزینگ فلز تانتالوم با نمونه آب بمباران شده ساخته شد. فلز تانتالوم به دلیل رسانایی، عدد اتمی زیاد، دسترس‌پذیری بودن با خلوص بالا، ترکیب‌پذیری راحت با اکسیژن در محلول‌های آبی رقیق، مقاومت اکسید فلزی در مقابل خوردگی و آمورف بودن اکسید فلزی به عنوان بستر هدف اکسیژن استفاده می‌شود [۳۲]. پیش از آندایزینگ، نمونه تانتالوم توسط استن چربی‌زدایی شد و سپس برای صیقلی شدن و حذف لایه اکسیدی نامنظم سطحی نمونه به مدت 15 s در محلول $(\text{H}_2\text{SO}_4, \text{HNO}_3, \text{HF})$ با نسبت‌های حجمی $2:2:5$ قرار داده شد. در نهایت به منظور حذف ناخالصی‌های سطحی گوگرد، نیتروژن و فلئوئور نمونه به مدت 30 s در آب مقطر جوشانده شد [۳۲، ۳۳]. آندایزینگ در الکترولیت 0.1 molar KI تحت





شکل ۲. چیدمان آزمایش مورد استفاده در خط باریکه 45° راست شتابگر واندوگراف (بدون مقیاس).

۳. نتایج تجربی

چگالی ایزوتوپ مورد نظر، N_t ، را می‌توان با اندازه‌گیری بهره گاما^۱ و به شرط داشتن مقادیر قابل اعتماد سطح مقطع واکنش با استفاده از رابطه ۱ تعیین کرد [۳۶]:

$$Y(E_\gamma, \theta) = \epsilon_{abs}(E_\gamma) \cdot N_p \cdot N_t \cdot \int_{E_\gamma - \Delta E}^{E_\gamma} \frac{d\sigma/d\Omega(E, \theta)}{S(E_\gamma)} dE \quad (1)$$

که $Y(E_\gamma, \theta)$ بهره پرتوی گاما در انرژی فرودی E_γ و زاویه آشکارسازی θ ، $\epsilon_{abs}(E_\gamma)$ بازده مطلق آشکارساز معادل با انرژی E_γ ، N_p تعداد ذرات باریکه فرودی، ΔE افت انرژی پرتابه در عبور از هدف، $S(E)$ توان توقف پرتابه و $d\sigma/d\Omega(E, \theta)$ سطح مقطع دیفرانسیلی واکنش در انرژی $E = E_0 - \Delta E/2$ و θ زاویه آشکارسازی می‌باشد.

در رابطه ۱، برای اندازه‌گیری فراوانی ایزوتوپ‌های ^{18}O و ^{16}O ، به ترتیب از واکنش‌های $^{16}\text{O}(d, p\gamma)^{16}\text{O}$ ($E_\gamma = 1376 \text{ keV}$) و $^{16}\text{O}(d, p\gamma)^{16}\text{O}$ ($E_\gamma = 871 \text{ keV}$) سطح مقطع‌های این واکنش‌ها در بازه $590 - 1994 \text{ keV}$ و زاویه آشکارسازی 90° توسط Jokar و Rafi-kheiri اندازه‌گیری و منتشر شده است [۳۱]. در شکل‌های ۳ و ۴ علاوه بر تابع تحریکی اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها دیگر نتایج تجربی چاپ شده در نشریه‌ها نیز ارایه شده‌اند [۲۸-۳۰].

به‌منظور دستیابی به یک نتیجه قابل اعتماد در آنالیز هدف‌های نازک، وجود ناحیه مسطح با پهنای مناسب در تابع تحریکی واکنش مفید می‌باشد. در این حالت با انتخاب انرژی فرودی در ناحیه مسطح، تغییرات قابل ملاحظه در احتمال وقوع

۲.۲ چیدمان آزمایش

تمام اندازه‌گیری‌ها مربوط به این کار پژوهشی در خط باریکه 45° راست شتابگر الکتروستاتیک 3 MV واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شد. شکل ۲ چیدمان به کار برده شده برای این آزمایش را نشان می‌دهد. در این چیدمان، طیف‌های پرتوی گاما و ذرات پس‌پراکنده به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری شده‌اند. پرتوهای گاما آنی توسط یک آشکارساز HPGe نوع p با اندازه بلور $6.58 \text{ cm} \times 6.58 \text{ cm}$ و حجم فعال 213 cm^3 آشکارسازی شدند. بهره نسبی و قدرت تفکیک انرژی اسمی آشکارساز در 1.33 MeV به ترتیب 50% درصد و 1.95 keV است. آشکارساز HPGe در زاویه 90° نسبت به راستای باریکه و فاصله 5.19 cm از مرکز هدف نصب شده و زاویه فضایی 77.7 msr را می‌پوشاند. برای کاهش تابش زمینه از یک حفاظ سربی استوانه‌ای به ضخامت 5 cm و طول 14 cm دورتادور آشکارساز HPGe استفاده شده است. همچنین برای حذف پرتو ایکس ناشی از سرب، جداره داخلی حفاظ سربی با پوششی از جنس مس به ضخامت 3 mm پوشانده شد. ذرات دوترون پس‌پراکنده شده از هدف توسط یک آشکارساز سدسطحی به مساحت 25 mm^2 ، ضخامت $300 \mu\text{m}$ و قدرت تفکیک 13 keV ثبت و اندازه‌گیری گردید. فاصله آشکارساز سدسطحی تا مرکز محفظه واکنش با حرکت دادن آشکارساز بین 83 mm تا 183 mm قابل تغییر می‌باشد. جابه‌جایی آشکارساز سدسطحی به وسیله یک بازوی متحرکی که آشکارساز بر روی آن سوار است و بدون نیاز به شکستن خلأ محفظه انجام می‌شود. این آشکارساز در زاویه 165° نسبت به راستای باریکه نصب شده و زاویه فضای 0.75 msr را برای فاصله 183 mm از هدف پوشش می‌دهد. خلأ مسیر باریکه و محفظه برهم‌کنش در حین آزمایش با استفاده هم‌زمان از دو جفت پمپ خلأ روتاری و توربو به کم‌تر از $5 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ رسانده و در همین شرایط نگه داشته شد. جزییات بیشتر در مورد مشخصات چیدمان آزمایش و محفظه واکنش در مرجع منتشر شده است [۳۵].



با ثابت بودن سطح مقطع‌ها در بازه انتگرال معادله ۱، این معادله برای واکنش‌های $^{18}\text{O}(d,p\gamma)^{19}\text{O}$ و $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ به ترتیب به معادله‌های ساده شده ۲ و ۳ تبدیل می‌شود:

$$Y_{18}(1150,90) = 4\pi \cdot \varepsilon_{abs}(E_{\gamma=871}) \cdot N_p \cdot N_{18} \cdot \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{18}(1141,90) \quad (2)$$

$$Y_{16}(1150,90) = 4\pi \cdot \varepsilon_{abs}(E_{\gamma=1376}) \cdot N_p \cdot N_{16} \cdot \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{16}(1141,90) \quad (3)$$

با استفاده از معادله‌های بالا و جایگزینی مقادیر سطح مقطع واکنش‌ها، تعداد ذرات فرودی و بازه آشکارساز پرتوهای گاما، N_{16} و N_{18} معادل با تعداد ایزوتوپ‌های ^{18}O و ^{16}O در واحد سطح به دست می‌آیند.

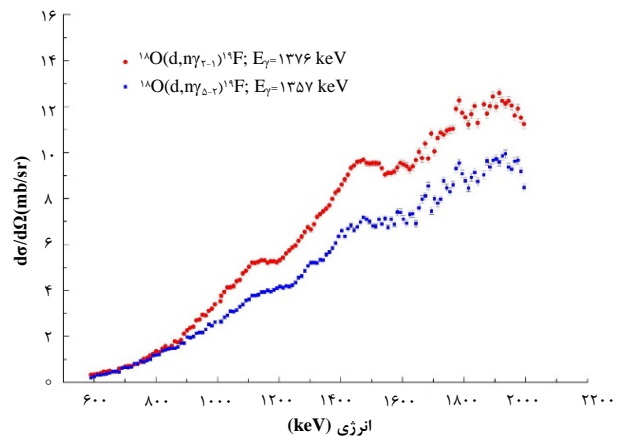
همچنین با استفاده از معادله ۲ و ۳ می‌توان نسبت تعداد ایزوتوپ‌ها را مستقل از تعداد ذرات فرودی به دست آورد:

$$\frac{N_{18}}{N_{16}} = \frac{Y_{18}(1150,90) \cdot \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{16}(1141,90) \cdot \varepsilon_{abs}(E_{\gamma=871})}{Y_{16}(1150,90) \cdot \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{18}(1141,90) \cdot \varepsilon_{abs}(E_{\gamma=1376})} \quad (4)$$

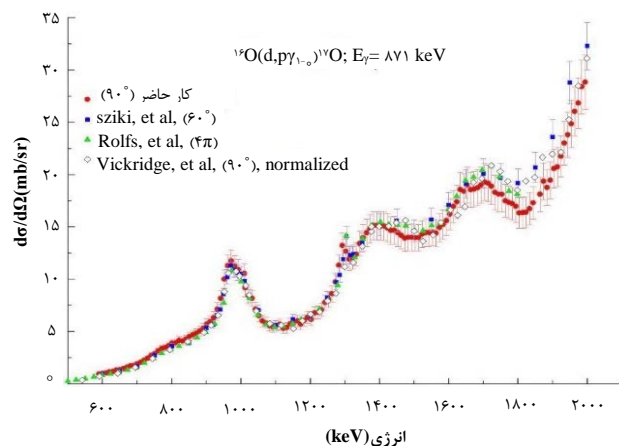
برای تعیین بازه آشکارساز HPGe، نمودار تجربی بازه مطلق آشکارساز با استفاده از چشمه‌های رادیواکتیو استاندارد ^{241}Am ، ^{60}Co ، ^{137}Cs ، ^{133}Ba ، ^{152}Eu استاندارد در همان مکان برخورد باریکه با هدف نصب شدند. درون‌یابی نمودار به دست آمده، بازه مطلق آشکارساز HPGe برای پرتوهای گاماها 871 keV و 1376 keV ، به ترتیب مقادیر $(1.2 \pm 0.06) \times 10^{-2}$ و $(8.2 \pm 0.4) \times 10^{-3}$ به دست آمدند. مقادیر بهره (سطح زیر قله پرتو گاما 871 keV و در شکل ۵ طیف گاما حاصل از بمباران هدف $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Ta}$ با باریکه دوترون 1150 keV ارایه گردیده است. در طیف گاما، به‌خاطر سطح مقطع بالایی واکنش‌ها، قله‌های 871 keV و 1376 keV به‌طور واضح مشخص می‌باشند. سایر قله‌ها همراه واکنش‌های معادل آن‌ها در طیف مشخص شده‌اند.

در این آزمایش مقدار جریان باریکه دوترون (10 nA) و زمان جمع‌آوری طیف‌ها (حدود 600 ثانیه) طوری انتخاب شدند که اثر زمان مرگ برای آشکارساز HPGe کم‌تر از 10% درصد و خطاهای آماری مربوط به شمارش زیر قله‌ها با دقت $\pm 5\%$ کم‌تر از 3% درصد شود. نتایج اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ ارایه شده است. منابع عدم قطعیت سیستماتیک نتایج آزمایش شامل عدم

واکنش هسته‌ای در پهنای افت انرژی ذرات عبوری از هدف نازک مشاهده نخواهد شد. همچنین با انتخاب انرژی در این ناحیه اثر عدم قطعیت انرژی باریکه فرودی ناچیز خواهد بود. همان‌طور که از شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان مشاهده نمود در توابع تحریکی هر دو واکنش ساختارهای سطح شکل وجود دارد. برای واکنش $^{18}\text{O}(d,p\gamma)^{19}\text{O}$ یک ناحیه تقریباً تخت بین 1102 keV و 1212 keV در تابع تحریکی واکنش وجود دارد. مقدار میانگین سطح مقطع‌ها در این بازه انرژی معادل 5.28 mb/sr با نوسان حدود 3% درصد می‌باشد. همچنین در تابع تحریکی واکنش $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ نیز یک ساختار مسطح شکل در بازه 1060 keV تا 1222 keV با مقدار میانگین 5.88 mb/sr و نوسان کم‌تر از 5% درصد دیده می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده، در این آزمایش انرژی باریکه دوترون فرودی مقدار 1150 keV انتخاب شد. با کمک کد $\text{SRIM}2013$ افت انرژی دوترون‌های 1150 keV هنگام عبور از لایه Ta_2O_5 ، 18 keV به دست آمد.



شکل ۳. توابع تحریکی واکنش‌های $^{18}\text{O}(d,n\gamma)^{19}\text{F}$ و $^{18}\text{O}(d,p\gamma)^{19}\text{O}$ برداشته شده از مرجع [۳۱].



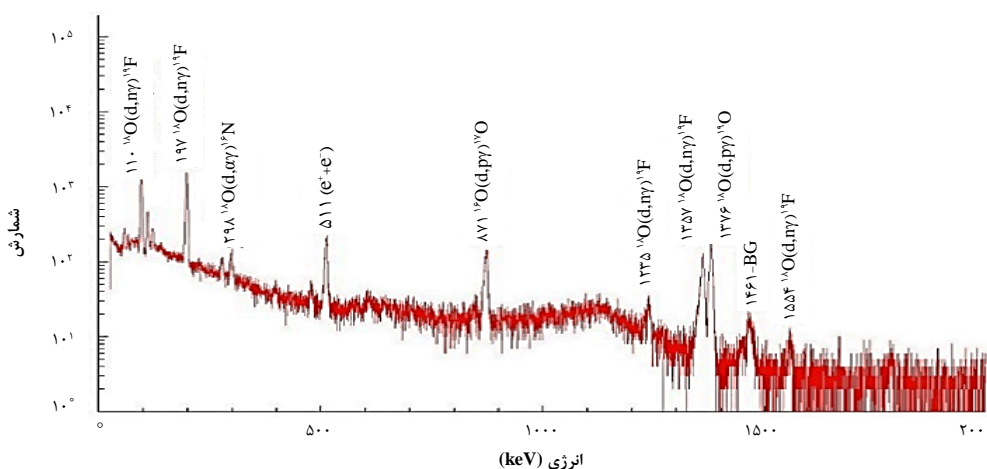
شکل ۴. توابع تحریکی واکنش $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ برداشته شده از مرجع [۳۱].



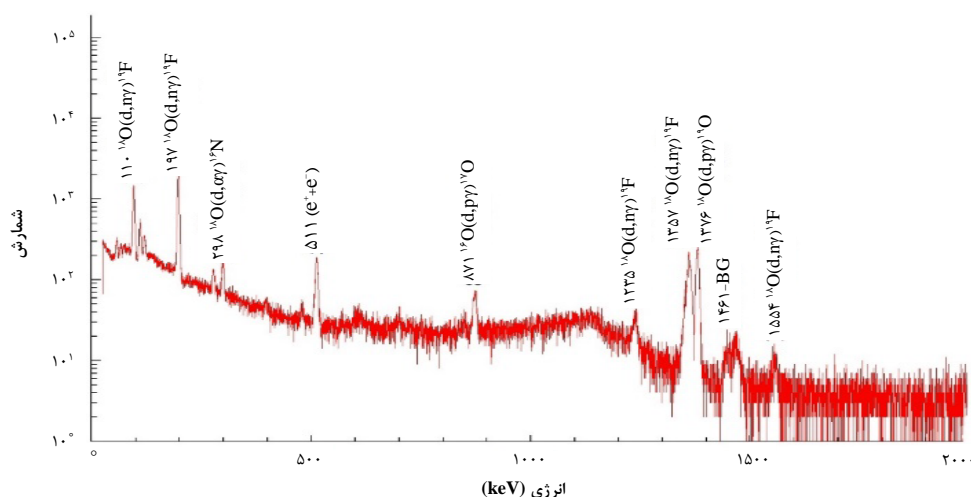
برای بررسی بیشتر اعتبار روش مورد استفاده، تمام مراحل اندازه‌گیری فوق برای یک نمونه آب شاهد با غنای مشخص ^{18}O (۹۸ درصد طبق گزارش کارخانه سازنده) انجام شد. شکل ۶ طیف گاما حاصل از بمباران هدف $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Ta}$ ساخته شده از این نمونه با باریکه دوترون 1150 keV را نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری‌ها برای این نمونه شاهد در جدول ۱ ارایه شده است. مقایسه نتایج به‌دست آمده در این کار پژوهشی با مقدار درصد غنی ایزوتوپ ^{18}O گزارش شده توسط کارخانه تولید کننده توافق بسیار خوبی را نشان می‌دهد. وجود این سازگاری، اعتبار روش مورد استفاده در این کار پژوهشی را تأیید می‌کند.

قطعیت تعیین سطح مقطع واکنش‌ها ۸ درصد، عدم قطعیت تعیین بازده مطلق آشکارساز ۵ درصد، عدم قطعیت اندازه‌گیری بار ۴ درصد و عدم قطعیت تعیین بهره گاما ۱ درصد می‌باشد. با جمع عدم قطعیت‌های سیستماتیک و آماری با معادله انتشار خطا، عدم قطعیت کل در تعیین درصد غنا با دقت $\pm 5\%$ حدود ۱۰ درصد تخمین زده می‌شود.

مقایسه بین چگالی اتمی اکسیژن کل حاصل از روش DIGE یعنی مقدار $(9.2 \pm 0.9) \times 10^{17} \text{ O/cm}^2$ (ستون چهار جدول ۱) و مقدار $(9.8 \pm 0.7) \times 10^{17} \text{ O/cm}^2$ به‌دست آمده با روش RBS (شکل ۲)، نشان می‌دهد که در محدوده عدم قطعیت سیستماتیک ۱۰ درصد، توافق بسیار خوبی بین آن‌ها وجود دارد.



شکل ۵. طیف گامای حاصل از بمباران هدف $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Ta}$ تهیه شده از نمونه آب پرتودیده با $E_d=1150 \text{ keV}$.



شکل ۶. طیف گامای حاصل از بمباران هدف $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Ta}$ تهیه شده از نمونه شاهد با باریکه دوترون $E_d=1150 \text{ keV}$.

جدول ۱. تعیین درصد ایزوتوپ‌های ^{16}O و ^{18}O در نمونه‌های آب به روش DIGE

نمونه	تعداد ایزوتوپ ^{18}O در واحد سطح	تعداد ایزوتوپ ^{16}O در واحد سطح	تعداد اتم‌های O در واحد سطح	درصد غنای ^{18}O	درصد غنای ^{16}O
بمباران شده	$(6.7 \pm 0.6) \times 10^{17}$	$(2.5 \pm 0.2) \times 10^{17}$	$(9.2 \pm 0.9) \times 10^{17}$	۷۲٫۷±۷٫۵	۲۷٫۲±۲٫۸
شاهد	$(9.9 \pm ۱.۰) \times 10^{17}$	$(۱.۷۰ \pm ۰.۱۷) \times 10^{16}$	$(۱.۰۱ \pm ۱.۰) \times 10^{17}$	۹۸٫۳±۹٫۸	۱٫۷۰±۰٫۱۸



۴. بحث و نتیجه گیری

مراجع

1. G. Amsel, D. Samuel, *The mechanism of anodic oxidation*, *J. Phys. Chem. Solids.*, **23**, 1707 (1962).
2. G. Amsel, et al., *Microanalysis by the direct observation of nuclear reactions using a 2 MeV van de graaff*, *Nucl. Instr. and Meth.*, **92**, 481 (1971).
3. J.-J. Ganem, et al., *Study of thin hafnium oxides deposited by atomic layer deposition*, *Nucl. Instr. and Meth.*, B **219–220**, 856 (2004).
4. A.F. Gurbich, S.L. Molodtsov, *Application of IBA techniques to silicon profiling in protective oxide films on a steel surface*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **226**, 637(2004).
5. D.D. Cohen, et al., *Determination of ^{18}O concentrations in musamples of biological fluids*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **50**, 43 (1990).
6. S.N. Nwosu, H.J. Fischbeck, *Assessment of ^{18}O enriched water as a marker of total body water* *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **40/41**, 857 (1989).
7. P. Trocellier, et al., *Real capabilities of nuclear microprobe analysis for isotope ratio measurements*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **83**, 377 (1993).
8. M. Borysiuk, et al., *Optimization of ^{18}O measurement using NRA for studies of isotopic content in fossil meteorites*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **269**, 2229 (2011).
9. Paula Rangel Pestana Allegro, et al., *Determination of stable isotope ratios using nuclear reaction analysis coupled with a particle–gamma coincidence method*, *J. Anal. At. Spectrom.*, **36**, 120 (2021).
10. C.E. Rolfs, W.S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos*, (University of Chicago Press, USA, 1988).
11. 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).
12. W.K. Chu, J.W. Mayer, M.A. Nicolet, *Backscattering Spectrometry*, Academic Press, New York, (1978).
13. D.D. Cohen, E.K. Rose, *Analysis of oxygen by charged particle bombardment*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **66**, 158 (1992).
14. G. Amsel, D. Samuel, *Microanalysis of the stable isotopes of oxygen by means of nuclear reactions*, *Anal. Chem.*, **39**, 1689 (1967).
15. I.C. Vickridge, et al., *The contribution of stable isotopic tracing, narrow nuclear resonance depth profiling, and a simple stochastic theory of charged particle energy loss to studies of the dry thermal oxidation of SiC*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **232**, 272 (2005).
16. E. Pitthan, et al., *Synthesis and applications of ^{18}O standards for nuclear reaction analysis*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **332**, 56 (2014).
17. C. Lien, L. Wielunski, M. Nicolet, *Comparison of the Nuclear Reactions $^{18}\text{O}(p, \alpha)^{15}\text{N}$ and $^{16}\text{O}(d, \alpha)^{14}\text{N}$ to Study the Oxygen Effects in Pt Silicide Formation*, *Nucl. Instr. and Meth.*, **213**, 463 (1983).

رادایوایزوتوپ ^{18}F متداولترین گسیلنده پوزیترون برای تصویربرداری به روش توموگرافی گسیل پوزیترون است. این رادایوایزوتوپ از طریق واکنش هسته‌ای $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ حاصل از بمباران هدف H_2^{18}O با باریکه پروتون ۱۸ MeV شتابگر سیکلوترون کرج تولید می‌شود. با توجه به این که تهیه نمونه آب با غنای بالای ^{18}O مستلزم هزینه زیادی می‌باشد، استفاده مجدد از باقی‌مانده هدف برای تولید ایزوتوپ ^{18}F مرسوم می‌باشد. بنابراین تعیین میزان غنای ^{18}O مصرف‌نشده در هدف بمباران شده H_2^{18}O حایز اهمیت است. در این پژوهش با اندازه‌گیری پرتوهای گامای آبی ۱۳۷۶ keV و ۸۷۱ keV حاصل از واکنش‌های $^{18}\text{O}(d,p\gamma)^{19}\text{O}$ و $^{16}\text{O}(d,p\gamma)^{17}\text{O}$ نسبت ایزوتوپ‌های $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ هدف بمباران شده به روش DIGE تعیین شد. با توجه به در دسترس بودن سطح مقطع‌های واکنش‌های فوق، اندازه‌گیری‌ها بدون نیاز به مقایسه با نمونه استاندارد به روش مطلق انجام شدند.

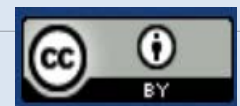
هدف نازک Ta_2O_5 با استفاده از روش آندایزینگ فلز تانتالوم با نمونه آب پرتودهی شده ساخته و با دوترون‌های ۱۱۵۰ keV بمباران شد. علت انتخاب انرژی ۱۱۵۰ keV این است که در اطراف این انرژی سطح مقطع‌های دو واکنش نسبتاً ثابت و در نتیجه اثر خطای انرژی باریکه بر بهره پرتوهای گامای ثبت‌شده در زاویه آشکارسازی 90° ناچیز است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که درصد غنای ^{18}O در هدف H_2^{18}O بعد از بمباران با باریکه پروتون سیکلوترون به حدود ۷۳ درصد افت می‌کند. برای اطمینان از درستی روش مورد استفاده، آزمایش برای یک نمونه آب با غنای ^{18}O مشخص تکرار شد. مقایسه نتیجه به‌دست آمده با درصد غنای ^{18}O گزارش شده از طرف کارخانه سازنده توافقی خوبی را نشان می‌دهد. وجود این توافق، اعتبار روش مورد استفاده در این کار پژوهشی را تأیید می‌کنند.



18. N.S. Christensen, et al., *Absolute calibration of the ^{18}O (p, α_0) ^{15}N nuclear reaction*, *Nucl. Instr. and Meth.*, B **51**, 97 (1990).
19. I.V. Mitchell, et al., *The Determination of Absolute Oxygen Coverage by Nuclear Reaction Analysis*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **45**, 107 (1990).
20. G. Amsel, *Nuclear Reaction Techniques in Materials Analysis*, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **34**, 435 (1984).
21. R.B. Firestone, *Table of isotopes, Eighth Edition*, Version 1.0, (1996).
22. Z. Elekes, et al., *Deuteron induced gamma-ray emission method applied at a nuclear microprobe for carbon and oxygen content measurements*, *Nucl. Instr. Meth.*, B **168**, 305 (2000).
23. Á.Z. Kiss, et al., *Thick target yields of deuteron induced gamma-ray emission from light elements*, *Nucl. Instr. Meth.*, B **85**, 118 (1994).
24. A.E. Pillay, D.K. Bewley, *Analysis of the Rare Stable Isotopes of Carbon, Nitrogen and Oxygen using Charged-particle Induced Prompt γ -Rays*, *J. Appl. Radiat. Isotopes*, **34**, 1571 (1983).
25. D. Gihwala, M. Peisach, *Determination of Oxygen by Deuteron-Induced PIPPS*, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.*, **106**, 9 (1986).
26. L. Csedreki, R. Huszank, *Application of PIGE, BS and NRA techniques to oxygen profiling in steel joints using deuteron beam*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **348**, 165 (2015).
27. I.C. Vikridge, J. Tallon, M. Preland, *^{16}O DIGME of high T_c materials*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **99**, 450 (1995).
28. I.C. Vikridge, J. Tallon, M. Preland, *High precision determination of ^{16}O in high T_c superconductors by DIGME*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **85**, 95 (1994).
29. C. Rolfs, I.J.R. Baumvol, *Characterisation of ultrathin dielectric films with ion beams*, *Z. Phys.*, A **353**, 127 (1995).
30. G.Á. Sziki, et al., *Gamma ray production cross-sections of deuteron induced nuclear reactions for light element analysis*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **251**, 343 (2006).
31. A. Jokar, H. Rafi-kheiri, *DIGE differential cross section data for oxygen isotopic analysis*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect.*, B **482**, 11 (2020).
32. G. Amsel, et al., *Precision Absolute Thin Film Standard Reference Targets for Nuclear Reaction Microanalysis of Oxygen Isotopes*, *Nucl. Instr. Meth.*, **149**, 705 (1978).
33. H. Rafi-kheiri, O. Kakuee, M. Laméhi-Rachti, *Differential cross section measurement of the $^{nat}\text{O}(d,d_0)$ reaction at energies and angles relevant to EBS*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B **373**, 40 (2016).
34. M. Mayer, SIMNRA, *a Simulation Program for the Analysis of NRA, RBS and ERDA*, in: J.L. Duggan, I.L. Morgan (Eds.), *Proceedings of the 15th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry*, American Institute of Physics Conference Proceedings, **475**, 541 (1999).
35. A. Jokar, O. Kakuee, M. Laméhi-Rachti, *Differential cross sections measurement of $^{28}\text{Si}(p,p'\gamma)^{28}\text{Si}$ and $^{29}\text{Si}(p,p'\gamma)^{29}\text{Si}$ reactions for PIGE applications*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect.*, B **371**, 37 (2016).
36. Y. Wang, M. Nastasi (Eds.), *Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis*, (Chapter 7), in: J. Räsänen, *particle-induced gamma emission: PIGE*, second ed. *Materials Research Society*, (2009).

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

حسین رفیع‌خیری، علیرضا جوکار، فریبا جوهری ده‌ا، غلامرضا اصلانی (۱۴۰۱)، اندازه‌گیری مطلق ایزوتوپ‌های ^{18}O و ^{16}O در نمونه بمباران‌شده H_2^{18}O به روش گسیل پرتو گاما القایی با دوترون، ۱۰۱، ۱۲۴-۱۳۲

DOI: 10.24200/nst.2022.1454

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1454.html

