

Measurement of Excitation Function of ^{94}Mo (p,n) $^{94\text{m}}\text{Tc}$ Reaction using Stacked foil Method

Reza Pourimani^{1,*}, Gholamreza Reisali², Azadeh Sadat Shavarani¹

¹Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran

²Applied radiation section, Department of Science and Technology Research, Iranian Atomic Energy Organization, Tehran, Iran

Received: 02.02.2020 Final revised: 04.05.2021 Accepted: 03.08.2021

Doi link: [10.22055/JRMBS.2021.16979](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.16979)

Abstract

Among radioisotopes, the technetium isotopes have a special place because of the variety of kits they are labeled with. Recent advances in the field of chemotherapy for radioimmunoassay and the development of technology for PET imaging in the diagnosis of cardiovascular diseases a great attention has been imposed on $^{94\text{m}}\text{Tc}$ ($I_{\beta^+} = 72\%$; $E_{\beta^+} = 2.47$ MeV; $T_{1/2} = 52.5$ min) as a positron emitter radioisotope of technetium. In this research employing natural molybdenum target has been measured excitation function of $^{94\text{m}}\text{Tc}$ using stacked foils method for 6.4 MeV to 17.4 MeV rang of proton energy and then the excitation function ^{94}Mo (p, n) $^{94\text{m}}\text{Tc}$ was determined in this energy range. The energy of protons on each of the target stack foils was determined using SRIM software. The cross section for this interaction varied from 21 to 511 mb. The comparison of measured value of excitation function of ^{94}Mo (p,n) $^{94\text{m}}\text{Tc}$ in this research with the results of two other research groups employing enrichment targets shows reasonable agreement

Keywords: $^{94\text{m}}\text{Tc}$, Excitation function, Natural molybdenum, stacked foils Method, Cyclone 30

* Corresponding Author: r-pourimani@araku.ac.ir



اندازه‌گیری تابع برانگیختگی واکنش $^{94}\text{Mo}(p,n)^{94m}\text{Tc}$ با استفاده از

روش لایه‌های نازک

رضا پورایمانی^{1*}، غلامرضا رئیس‌علی²، آزاده سادات شاورانی¹¹گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، اراک، ایران²پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

دریافت: 1398/11/13 ویرایش نهایی: 1400/02/14 پذیرش: 1400/05/12

Doi link: [10.22055/JRMBS.2021.16979](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.16979)

چکیده

در بین رادیو ایزوتوپ‌های، ایزوتوپ‌های تکنسیوم به علت تنوع کیت‌هایی که توسط آن نشان‌دار می‌گردند دارای جایگاه ویژه‌ای هستند. پیشرفت‌های اخیر در زمینه شیمی رادیو داروی تکنسیوم و توسعه فناوری در زمینه تصویربرداری PET در تشخیص بیماری‌های قلب و عروق باعث جلب توجه زیادی از دانشمندان و پژوهشگران به ایزوتوپ ^{94m}Tc ($T_{1/2} = 52.5\text{m}; I_{\beta^+} = 72\%$) به عنوان گسیل‌کننده پوزیترون شده است. در این روش ابتدا تابع برانگیختگی ^{94m}Tc ($^{94}\text{Mo}(p,n)$) با استفاده از ورق مولبدن طبیعی به روش فعال‌سازی مجموعه لایه‌های نازک در بازه انرژی 6/4 تا 17/4 MeV اندازه‌گیری گردید و سپس تابع برانگیختگی ^{94m}Tc ($^{94}\text{Mo}(p,n)$) در این بازه انرژی تعیین شد. سطح مقطع واکنش در محدوده 21 تا 511 میلی بارن تغییر می‌کند. انرژی باریکه پروتون تأیید شده به هر لایه از مجموعه لایه‌های هدف با استفاده از نرم افزار SRIM تعیین شد. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده تابع برانگیختگی ^{94m}Tc ($^{94}\text{Mo}(p,n)$) در این پژوهش با اندازه‌گیری‌ها انجام شده توسط دو گروه از پژوهشگران دیگر که با هدف مولبدن غنی شده انجام شده است توافق قابل قبولی را نشان داد.

کلیدواژه‌گان: ^{94m}Tc ، تابع برانگیختگی، مولبدن طبیعی، روش لایه‌های نازک، سیکلون 30

مقدمه

دارای جایگاه ویژه‌ای هستند [1]. امروزه با توجه به خواص منحصر به فرد واپاشی ویژه هسته ^{94m}Tc و در دسترس بودن آن و همزمان با پیشرفت‌های اخیر در تولید هر دو رادیوداروی ^{99m}Tc و ^{94m}Tc به ترتیب به منظور استفاده در تصویربرداری SPECT^2 و PET مورد علاقه پژوهشگران هسته‌ای و پزشکان قرار گرفته است. ایزوتوپ ^{94m}Tc برای تشخیص بیماری‌های قلب و عروق توجه زیادی را به خود جلب کرده است [2]. یکی از روش‌های تولید ^{94m}Tc ، تاباندن پروتون بر روی

یکی از روش‌های بررسی ضایعات غدد داخلی بدن، استفاده از تصویربرداری هسته‌ای می‌باشد. یکی از تکنیک‌های تصویربرداری هسته‌ای پرتونگاری با نشر پوزیترون معروف به PET¹ است که با توجه به دقت تصویربرداری و تعیین محل ضایعه با خطای ناچیز، از برتری بیشتری نسبت به سایر تکنیک‌ها برخوردار است. در بین رادیو ایزوتوپ‌ها، ایزوتوپ‌های تکنسیوم به علت تنوع کیت‌هایی که توسط آن نشان‌دار می‌گردند

* نویسنده مسئول: r-pourimani@araku.ac.ir¹ Positron Emission Tomography² Single-Photon Emission Computed Tomography

گردید. در این روش چندین ورقه نازک کنار هم مورد تابش باریکه پرتون قرار می‌گیرند با در دست داشتن انرژی باریکه فرودی به مجموعه لایه‌های نازک با استفاده از نرم افزار SRIM انرژی باریکه در وسط هر لایه محاسبه شده است.

محاسبه انرژی پروتون‌ها در عمق‌های مختلف هدف

برای محاسبه میزان کاهش انرژی پروتون‌ها در عبور از ضخامت هدف از نرم‌افزار SRIM استفاده شد [6]. در این برنامه، نوع ماده، جرم و چگالی هدف و نوع ذره فرودی و انرژی آن داده می‌شود و نرم افزار توان بازدارندگی (dE/dX) هدف را بر اساس رابطه مکانیک کوآنتومی Bethe-Bloch محاسبه می‌کند [7]. در این روش ضخامت کل به صورت لایه‌های مساوی با پهنای Δx در نظر گرفته می‌شود که ذره فرودی با انرژی E_i وارد هر لایه شده و با انرژی E_0 خارج می‌گردد در این صورت انرژی ذره پس از خروج از لایه طبق رابطه 1 به دست می‌آید.

$$E_0 = E_i - \left(\frac{dE}{dX} \right)_i \Delta X \quad 1$$

برای تعیین مقدار dE/dX در هر انرژی دلخواه برای باریکه پرتون با برازش کردن مناسب‌ترین منحنی بر داده‌های محاسبه شده توسط SRIM توسط نرم‌افزار MATLAB معادله منحنی به دست آمد که بر مبنای آن توان بازدارندگی به‌ازای هر انرژی باریکه پرتون و ضخامت لایه محاسبه گردید. شکل‌های 1 و 2 نتایج محاسبات تغییرات انرژی باریکه پرتون در بازه 5-30MeV و منحنی‌های برازش شده را برای عناصر Mo, Ti, Cu, Al را نشان می‌دهد.

مولیدن طبیعی و یا غنی شده در یک سیکلوترون است [3]. امروزه تحقیقات زیادی در رابطه با اندازه‌گیری تابع برانگیختگی واکنش‌ها با پرتابه پرتون جهت تولید ^{94m}Tc به منظور اندازه‌گیری احتمال واکنش به‌عنوان تابعی از انرژی پروتون و امکان تولید آن انجام گردیده است [4]. در این پژوهش تابع برانگیختگی واکنش $^{94}\text{Mo}(p,n)^{94m}\text{Tc}$ به روش فعال‌سازی مجموعه لایه‌های نازک در بازه انرژی پروتون‌های 6/4MeV تا 17/4MeV اندازه‌گیری شده است. فعالیت هر لایه پرتو دیده شده با استفاده از سیستم طیف‌سنجی گاما شامل آشکارساز فوق خالص ژرمانیومی (HPGe^1) تعیین شده است.

کارهای آزمایشگاهی

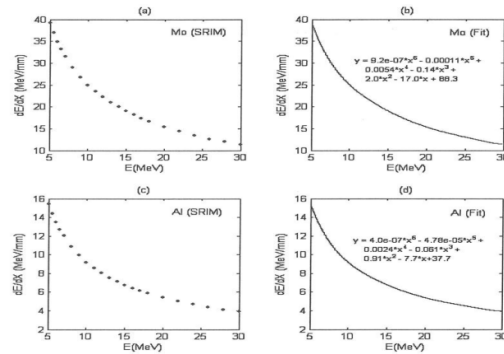
در این پژوهش سطح مقطع واکنش ^{94m}Tc $^{94}\text{Mo}(p,n)$ با پروتون‌های تولید شده توسط سیکلوترون مدل Cyclon30 مرکز پزشکی هسته‌ای کرج در محدوده انرژی 6/4MeV تا 17/4MeV به روش مجموعه لایه‌های نازک اندازه‌گیری شده است. به علت عدم دستیابی به مولیدن 94 غنی شده، از ورق مولیدن طبیعی استفاده گردید و با در دست داشتن فراوانی مولیدن 94 سطح مقطع این واکنش محاسبه شد. هرگاه انرژی باریکه پرتون بیش از 12MeV باشد علاوه بر واکنش فوق، واکنش ^{94m}Tc $^{95}\text{Mo}(p,2n)$ نیز منجر به تولید ^{94m}Tc می‌گردد. با مشخص بودن سطح مقطع یکی از این دو واکنش می‌توان سطح مقطع واکنش دیگر را با توجه به درصد فراوانی هر یک از دو ایزوتوپ مولیدن 94 و 95 در ورقه مولیدن طبیعی که به ترتیب برابر 9/25% و 15/92% است، محاسبه کرد [5]. در این پژوهش برای تعیین انرژی باریکه پرتون در روی هر لایه مولیدن از روش لایه‌های نازک استفاده

¹ High purity germanium detector

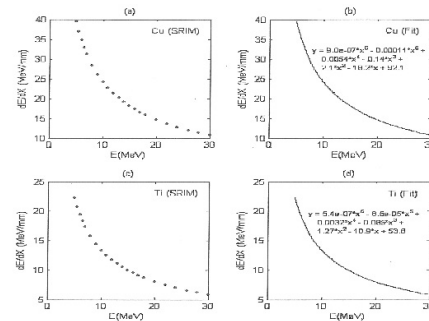
همچنین شرایط لازم را جهت تعیین انرژی دارند زیرا سطح مقطع واکنش برای این هسته‌ها در محدوده انرژی مذکور کاملاً شناخته شده هستند [8-12]. طیف گامای این واکنش‌ها کاملاً شناخته شده می‌باشند و می‌توان فعالیت رادیو ایزوتوپ‌های تولید شده را با آشکارساز HPGe و سیستم الکترونیک مربوطه تعیین کرد.

روش محاسبه سطح مقطع واکنش

در این پژوهش از فلزات طبیعی مولیبدن، مس، تیتانیوم و آلومینیوم به صورت پولک‌هایی به قطر 13mm و به ترتیب با درجه خلوص 99.9%، 99.9%، 99.8% و 99.9% و ضخامت‌های 25، 25، 25 و 130 میکرومتر استفاده گردید. مجموعه پولک‌ها در هر بار پرتودهی در مقر آلومینیومی با دهانه دایروی شکل به قطر 1cm (اندازه قطر موازی ساز) در معرض پروتون‌ها قرار گرفتند. مقر آلومینیومی طوری در داخل شاتل قرار داده شد که صفحات نسبت به یکدیگر موازی و نسبت به باریکه پروتون فرودی عمود بودند. ایزوتوپ‌های تولید شده در اثر برخورد باریکه پروتون با پولک‌های مانتیور مس طبیعی و تیتانیوم طبیعی و پولک مولیبدن طبیعی دارای نیمه‌عمرهای متفاوتی هستند که ^{94m}Tc به عنوان محصول واکنش اصلی و ^{63}Zn دارای نیمه‌عمرهای کوتاه به ترتیب برابر 52 و 38/47 دقیقه و ^{65}Zn و ^{48}V دارای نیمه‌عمرهای طولانی به ترتیب برابر 243/66 و 15/97 روز هستند [5]. مقدار فعالیت مربوط به هر ایزوتوپ در پایان پرتودهی با توجه به سطح مقطع‌های گزارش شده و مدت زمان پرتودهی و معلوم بودن



شکل 1. نمودار توان بازدارندگی برای Mo و Al برحسب انرژی باریکه پروتون با استفاده از کد SRIM در محدوده 5MeV تا 30MeV و منحنی‌های برازش شده.



شکل 2. نمودار توان بازدارندگی برای Ti و Cu برحسب انرژی باریکه پروتون با استفاده از کد SRIM.

در محدوده 5MeV تا 30MeV و منحنی‌های برازش شده جهت افزایش دقت اندازه‌گیری انرژی باریکه پروتونی از روش فعال کردن چند ورقه مانتیور به‌طور هم‌زمان استفاده گردید. در این روش انرژی باریکه برخورد کننده براساس فعال شدن ورقه‌های مانتیور در اثر واکنش پروتون با لایه‌های مختلف به دست می‌آید. به منظور اندازه‌گیری سطح مقطع واکنش $^{94}\text{Mo}(p,n)^{94m}\text{Tc}$ در بازه انرژی 6MeV تا 18 MeV از ورقه‌های نازک مس و تیتانیوم به عنوان ورق‌های مانتیور و از واکنش‌های $^{63}\text{Zn}(\text{p},x)^{\text{nat}}\text{Cu}$ و $^{65}\text{Zn}(\text{p},x)^{\text{nat}}\text{Cu}$ و $^{48}\text{V}(\text{p},x)^{\text{nat}}\text{Ti}$ به عنوان واکنش‌های مانتیور استفاده گردید. این واکنش‌ها

در این روابط M جرم مولکولی، e بار الکتریکی الکترون و N_A عدد آووگادرو $6,023 \times 10^{23}$ و ضریب $3,7 \times 10^{41}$ برای تبدیل واحدها به کار برده شده است. در جدول 1 مقادیر محاسبه شده L برای فلزات طبیعی مولیدن، تیتانیوم و مس درج شده است.

جدول 1. مقادیر محاسبه شده ضریب L برای فلزات طبیعی مولیدن، تیتانیوم و مس.

هدف	$M(\text{g/mol})$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$L (\text{I/C. cm}^3)$
^{94}Mo	95,94	10,28	1,089
^{48}Ti	47,87	4,51	0,956
^{63}Cu	63,55	8,96	1,433

شدت جریان باریکه بر اساس رابطه 2 محاسبه می‌گردد [13].

$$\sigma (\text{mb}) = \frac{A_0(\mu\text{Ci})}{[I(\mu\text{A}) \cdot X(\mu\text{m}) (1 - \exp(-\lambda t_i)) L]} \quad 2$$

که در این رابطه A_0 ، K و L طبق روابط 3، 4 و 5 زیر تعریف می‌گردند.

$$A_0 (\mu\text{Ci}) = \frac{[I(\mu\text{A}) \rho(\text{g/cm}^3) \times (\mu\text{m}) \sigma (\text{mb}) (1 - \exp(-\lambda t_i))]}{[3.7 \times 10^{41} K]} \quad 3$$

$$K = \frac{[M \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) e (C)]}{N_A} \quad 4$$

$$L = \frac{[\rho(\text{g/cm}^3) N_A]}{[3.7 \times 10^{41} M(\text{g/mol}) e(C)]} \quad 5$$

جدول 2. مقدار فعالیت در پایان هر مرحله پروتو دهی برای واکنش‌های مختلف بر حسب L ، t_i و σ

نوع واکنش	A_0 (μCi)	λ (1/min)	X (μm)	L (C^{-1}cm^3)
$^{94}\text{Mo}(p,n)$ ^{94m}Tc	$27.215 \sigma I(1 - \exp(-0.013t_i))$	0,0133	25	1,089
^{63}Zn (p,x) ^{nat}Cu	$35.813 \sigma I(1 - \exp(-0.018t_i))$	0,0180	25	1,433
^{65}Zn (p,x) ^{nat}Cu	$35.813 \sigma I(1 - \exp(-0.0000020t_i))$	$1,97 \times 10^{-6}$	25	1,433
^{48}V (p,x) ^{nat}Ti	$23.91 \sigma I(1 - \exp(-0.000030t_i))$	$3,013 \text{ E-}5$	25	0,956

بنابراین باریکه پس از عبور از اولین پولک مانیتور مسی با انرژی $17,5 \text{ MeV}$ به اولین پولک مولیدن برخورد کرده و پس از خروج از آن به دومین پولک مانیتور (اولین پولک تیتانیوم) می‌رسد و بعد از آن پس از عبور از پولک آلومینیوم به همین ترتیب از سه پولک بعدی عبور می‌کند که انرژی باریکه در موقع برخورد به دومین پولک مولیدن حدود $15,5 \text{ MeV}$ است. در سه مجموعه دیگر از یک پولک تیتانیوم و یک پولک مس

فعالیت اولیه A_0 برای واکنش‌های مختلف بر حسب L ، t_i و σ در جدول 2 نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری تابع برانگیختگی چهار مجموعه پولک به شرح زیر در معرض تابش پروتون قرار گرفتند. اولین مجموعه هدف که تحت پروتو دهی باریکه پروتون با انرژی 18 MeV قرار گرفت شامل پنج پولک بود که پولک‌های مس و تیتانیوم در طرفین هر دو پولک اصلی مولیدن و یک پولک آلومینیوم بین دو قسمت بود.

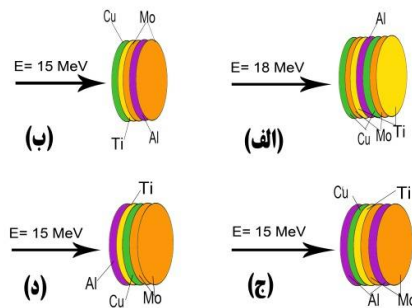
مجموعه چهارم علاوه بر استفاده از شش پولک آلومینیوم در ابتدای مجموعه پولک‌های مس و تیتانیوم جابه‌جا گردید و بین دو پولک مولیبدن پولک آلومینیوم قرار داده نشد. به این ترتیب باریکه پروتون با انرژی $7/2\text{MeV}$ از پولک مولیبدن اول عبور کرده و با انرژی زیر 6MeV به پولک دوم برخورد می‌کند. مجموعه‌های اول، دوم، سوم و چهارم در معرض باریکه پروتون به ترتیب با شدت جریان $0/5$ ، 1 ، $0/2$ و $0/5$ میکروآمپر به ترتیب به مدت‌های 10 ، 10 ، 10 و 10 دقیقه قرار گرفتند. پس از گذشت حداقل یک ساعت از پایان هر بمباران پولک‌ها از مقر آلومینیومی خارج و در ظروف سربی نگهداری شدند تا طیف‌نگاری از آنها انجام شود. طیف‌نگاری گاماهاى چهار ایزوتوپ تولیدی شامل ^{94m}Tc ، ^{63}Zn ، ^{65}Zn و ^{48}V با استفاده از آشکارساز فوق خالص ژرمانیومی (HPGe) مدل GC1020-7500SL با بازدهی نسبی ده درصد ساخت شرکت CANBERRA با سیستم الکترونیکی مربوطه انجام گردید. در هر طیف‌نگاری، فاصله پولک تا دهانه آشکارساز با توجه به مقدار زمان مرده چنان تنظیم شد که میزان زمان مرده از 5 درصد تجاوز نکند.

اندازه‌گیری فعالیت هر پولک

فعالیت ورقه‌های بمباران شده با استفاده از روش طیف‌سنجی گاما و لحاظ کردن نسبت انشعابی برطبق جدیدترین مقادیر داده شده تعیین گردید [5]. برای این منظور بعد از گذشت زمان معینی از پایان بمباران سطح زیر قله‌های مورد نظر طبق رابطه 6 محاسبه شد.

$$A(\text{Bq}) = \frac{\text{Net Area}}{\epsilon \times (B.R.) \times \left[\frac{1 - \exp(-\lambda t_s)}{\lambda} \right]} \quad 6$$

قبل از اولین پولک مولیبدن برای تعیین شدت جریان باریکه پروتون فرودی استفاده شد به علت ناچیز بودن افت شدت جریان باریکه پروتون طی عبور از پولک‌های بعدی از محاسبه کاهش شدت باریکه صرف نظر شد. در شکل 3 ترتیب چیدمان هر چهار مجموعه پولک نشان داده شده است.



شکل 3. طریق چیدمان چهار مجموعه پولک‌ها در برابر باریکه پروتون‌ها.

با توجه به محدودیت تنظیم انرژی باریکه پروتون در سیکلوترون که کمترین انرژی قابل تنظیم توسط آن 15MeV می‌باشد در مواقعی که لازم بود پروتون با انرژی کمتری به پولک مولیبدن برخورد کند از تعداد مشخصی پولک آلومینیوم در ابتدای مجموعه استفاده شد. به این ترتیب در مرحله دوم باریکه پروتون با انرژی 15MeV پس از عبور از پولک‌های مس و تیتانیوم با انرژی حدود 14MeV از اولین پولک مولیبدن عبور کرده و پس از عبور از یک پولک آلومینیوم با انرژی حدود $12/5\text{MeV}$ به دومین پولک مولیبدن برخورد می‌کند به همین ترتیب مجموعه پولک‌های سوم و چهارم در معرض باریکه پروتون با انرژی 15MeV قرار گرفتند با این تفاوت که در ابتدای مجموعه سوم و چهارم به ترتیب از سه و شش پولک آلومینیوم با ضخامت هریک به اندازه $130\mu\text{m}$ استفاده شد در

بحث و نتیجه‌گیری

برای کلیه مجموعه‌ها آنالیز طیف‌های ثبت شده و سطح مقطع نمونه‌ها محاسبه شد. به‌عنوان نمونه نتایج به‌دست آمده از طیف نگاری اولین مجموعه بمباران شده با پروتون‌های فرودی با انرژی 18 MeV و شدت جریان 0,2 μA در جدول 4 درج شده است. نهایتاً پس از تعیین شدت جریان باریکه پروتونی در هر بمباران و انرژی پروتون‌ها در وسط هر پولک مولیدن و اطلاعات به‌دست آمده از طیف نگاری سطح مقطع واکنش ^{94m}Tc برای هر پولک مولیدن محاسبه گردید که نتایج آن در جدول 5 آورده شده است. برای محاسبه سطح مقطع واکنش ^{94m}Tc $^{94}\text{Mo}(p, n)$ که با توجه به این مسئله که در انرژی‌های بیشتر از 12,6 MeV علاوه بر واکنش مورد نظر، واکنش ^{94m}Tc $^{95}\text{Mo}(p, 2n)$ نیز رخ می‌دهد با استفاده از مقادیر سطح مقطع گزارش شده برای واکنش رقیب و بر اساس منحنی برازش شده از رابطه 7 استفاده شد [4].

$$\sigma_0 = a_1 \sigma_1 + a_2 \sigma_2 \quad 7$$

که در این رابطه σ_0 سطح مقطع واکنش ^{94m}Tc $^{nat}\text{Mo}(p, xn)$ ، σ_1 سطح مقطع واکنش ^{94m}Tc $^{94}\text{Mo}(p, n)$ و σ_2 سطح مقطع واکنش ^{94m}Tc $^{95}\text{Mo}(p, 2n)$ بوده و a_1 و a_2 به ترتیب فراوانی نسبی دو ایزوتوپ مولیدن 94 و 95 در نمونه طبیعی که به ترتیب برابر 9/25 و 15/92 درصد می‌باشند.

در این رابطه t_s زمان طیف نگاری و سایر اطلاعات مربوط به انرژی و شدت نسبی گاماها استفاده شده برای ایزوتوپ‌های مختلف در جدول 3 داده شده است [5].

جدول 3. اطلاعات مربوط به انرژی و نسبت انشعابی گاماها استفاده برای ایزوتوپ‌های مختلف.

نام ایزوتوپ	B.R.(%)	$T_{1/2}$	E_γ (keV)
^{94m}Tc	2,21	52 m	992,8
^{63}Zn	8,4	38,47 m	669,8
	6,6		962,6
^{65}Zn	50,6	243,66 d	1115,55
^{48}V	99,98	15,9735 d	983,52
	97,5		1312,10
	7,76		904,10

برای تعیین کارایی آشکارساز از چشمه‌های استاندارد نقطه‌ای ^{60}Co ، ^{152}Eu و چشمه مایع ^{152}Eu به ترتیب با فعالیت‌های 469/4، 186 و 198/7 کیلو بکرل استفاده شد و منحنی کارایی آشکارساز HPGe برای فواصل 0، 10، 25 و 35 سانتیمتری از دهانه آشکارساز رسم گردید. تصحیحات مربوط به زاویه فضایی و زمان مرگ آشکارساز با توجه به قطر 5 میلیمتری پولک و قطر 47 میلیمتری دهانه آشکارساز و فاصله بین پولک و آشکارساز اعمال شد [14].

جدول 4. نتایج به دست آمده از طیف‌نگاری اولین مجموعه بمباران شده با پروتون‌های 18 MeV

شماره مجموعه	شدت جریان باریکه پروتون (μA)	پولک	میانگین انرژی باریکه در وسط هر پولک Mo برحسب MeV	فعالیت ^{94m}Tc در پایان بمباران (μCi)	سطح مقطع بر حسب mb
1 (الف)	0,29	Mo ردیف 1	17,39	52±4	36±5
		Mo ردیف 2	15,47	48±4	33±5
2 (ب)	0,86	Mo ردیف 1	14,03	128±10	44±6
		Mo ردیف 2	12,55	135±11	46±8
3 (ج)	0,42	Mo ردیف 1	11,01	67±5	47±6
		Mo ردیف 2	9,21	50±4	35±5
4 (د)	0,29	Mo ردیف 1	7,19	13±1	13±2
		Mo ردیف 2	6,38	1,9±0,15	1,9±0,2

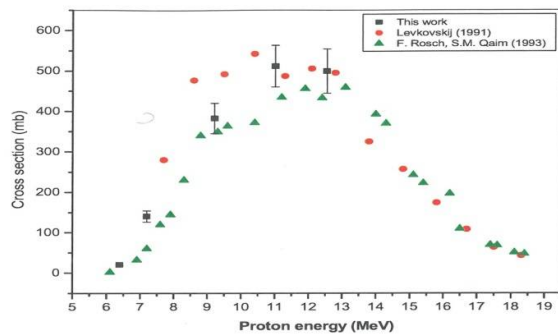
جدول 5. سطح مقطع محاسبه شده برای واکنش ^{94m}Tc $^{nat}\text{Mo}(p,xn)$ در پولک مولبدن طبیعی با پروتون

نام پولک و ردیف آن	ایزوتوپ تولید شده	انرژی گاما (keV)	فاصله تا آشکارساز (cm)	زمان مرده (%)	مدت زمان شمارش (s)	سطح زیر قله برحسب شمارش	خطای سطح زیر قله (%)
Cu ردیف 1	^{63}Zn	669,62	35	4/6	600	9250	1/12
	^{65}Zn	962,06	35	4/6	600	4927	1/49
Mo ردیف 1	^{94m}Tc	1115,54	0	0,36	6000	22486	0/60
		992,8	35	6,66	900	1337	4/21
Ti ردیف 1	^{48}V	983,52	35	0,58	1200	1498	2/96
		1312,09	35	0,58	1200	1112	3/30
		944,10	35	0,58	1200	101	22
Cu ردیف 2	^{63}Zn	669,62	35	4,8	300	6340	1/47
	^{65}Zn	962,06	35	4,8	300	3296	1/83
Mo ردیف 2	^{65}Zn	1115,54	0	0,42	6000	39998	0/52
	^{94m}Tc	992,80	35	3,67	900	911	4/04
Ti ردیف 2	^{48}V	983,52	35	0,8	800	1346	2/94
		1312,09	35	0,8	800	997	3/00
		944,10	35	0,8	800	88	21/00

با توجه به رابطه 4 سطح مقطع واکنش ^{94m}Tc $^{95}\text{Mo}(p,2n)$ برای انرژی‌های پروتون کمتر از 12/6 MeV صفر است و نیازی به تأثیر این واکنش نمی‌باشد. برای کلیه مقادیر

محاسبه گردید که نتایج آن در جدول 6 درج شده است. برای نمونه پولک مولبدن طبیعی $^{94}\text{Mo}(p,n)$ ^{94m}Tc

این پژوهش همچنین تابع برانگیختگی واکنش ^{94m}Tc با استفاده از ورقه‌های مولبیدن طبیعی می‌باشد نیز اندازه‌گیری گردید. با توجه به اینکه در آینده قرار است مولبیدن با استفاده از واکنش شکافت اورانیوم 60% جهت مصارف پزشکی تولید گردد. این پژوهش نشان می‌دهد که امکان تولید عملی ایزوتوپ‌های تکنسیوم در کشور وجود دارد.



شکل 4. مقایسه سطح مقطع‌های به‌دست آمده برای واکنش $^{94}\text{Mo}(p, n)^{94m}\text{Tc}$ با نتایج سایر اندازه‌گیری‌ها.

سپاسگزاری

این پژوهش در پژوهشکده فیزیک و شتابگرهای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران و با استفاده از سیکلوترون Cyclon30 و با حمایت معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه اراک انجام گردید. لذا نویسندگان از کارکنان این پژوهشکده و دانشگاه اراک کمال امتنان و سپاس‌گزاری را دارند.

مرجع‌ها

[1] International Atomic Energy Agency (IAEA) Technical Document 1065 (1999).

[2] R.J. Nickles, A.D. Nunn, C.K. Stone, B.T. Christian. Technetium-94m-

به‌دست آمده با توجه به خطاهای اندازه‌گیری در تعیین شدت جریان باریکه پروتونی، سطح زیر قله فتوپیک، کارایی آشکارساز و خطای مربوط به اطلاعات واپاشی، خطای کل سطح مقطع برآورد شده است.

نهایتاً سطح مقطع‌های به‌دست آمده برای واکنش $^{94}\text{Mo}(p, n)^{94m}\text{Tc}$ با دو گزارش قبلی [4 و 15] که به ترتیب در سال‌های 1991 و 1993 در بازه‌های انرژی 7/7 MeV تا 18/3 MeV و 6/1 MeV تا 18/4 MeV

با استفاده از هدف مولبیدن 94 غنی شده اندازه‌گیری شده است، مقایسه گردید.

در این پژوهش همچنین تابع برانگیختگی واکنش ^{94m}Tc با استفاده از ورقه‌های مولبیدن طبیعی می‌باشد نیز اندازه‌گیری گردید. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که برای هردو واکنش بیشترین مقدار سطح مقطع در محدوده انرژی 11 MeV تا 12 MeV قرار دارد.

جدول 6. سطح مقطع به‌دست آمده برای واکنش $^{94}\text{Mo}(p, n)^{94m}\text{Tc}$.

σ_1 (mb)	σ_2 (mb)	انرژی باریکه پروتون فرودی (MeV)
-	430	17,39
-	346	15,47
67 ± 10	235	14,03
500 ± 50	0	12,55
510 ± 51	0	11,01
380 ± 37	0	9,21
140 ± 14	0	7,19
21 ± 2	0	6,38

شکل 4 مقایسه نتایج این پژوهش و هر دو گزارش مذکور را نشان می‌دهد که در توافق خوبی هستند. در

- [10] F. Tarkanyi, F. Szelecsényi, P. Kopecky. Excitation Function of proton induced nuclear reactions on natural Nickel for monitoring beam energy and intensity. *Applied Radiation Isotopes Part A. Applied Radiation and Isotopes* **42** 6 (1991) 513-517. [https://doi.org/10.1016/0883-2889\(91\)90154-S](https://doi.org/10.1016/0883-2889(91)90154-S)
- [11] P. Kopecky, F. Szelecsényi, T. Molnár, P. Mikecz, F. Tárkányi. Excitation function of (p,xn) reactions on ^{nat}Ti : monitoring of bombarding proton beam. *Applied Radiation Isotopes* **44** 6 (1993) 687-692. [https://doi.org/10.1016/0969-8043\(93\)90133-U](https://doi.org/10.1016/0969-8043(93)90133-U)
- [12] F. Szelecsenyi, F. Tárkányi, S. Takács, A. Hermanne, M. Sonck, Yu. Shubin, M.G. Mustafa, Z. Youxiang. Excitation function for the $^{nat}\text{Ti}(p,x)^{48}\text{V}$ nuclear process: Evaluation and new measurements for practical application. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **174** (2001) 47-64. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(00\)00516-4](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(00)00516-4)
- [13] M. Bonardi, C. Birattari, F. Groppi, E. Sabbioni, Tin target excitation functions, cross section and optimized thick-target yields for $^{nat}\text{Mo}(p,xn) \text{Tc}^{94g, 95m, 95g, 96(m+g)}$ nuclear reactions induced by protons from threshold up to 44MeV. No carrier added radiochemical separation and quality control. *Applied Radiation Isotopes* **57** (2002) 617-635. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(02\)00176-8](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(02)00176-8)
- [14] N. Tsoulfanidis. Measurement and detection of radiation. Taylor & Francis, USA, Washington (1995).
- Teboroxime: Synthesis Dosimetry and Initial PET Imaging Studies. *Journal of Nuclear Medicine* **34** 7 (1993) 1058-1066.
- [3] S.M. Qaim, Production of high purity ^{94m}Tc for Positron Emission Tomography studies. *Nuclear Medicine and Biology* **27** (2000) 323-328. [https://doi.org/10.1016/S0969-8051\(00\)00104-9](https://doi.org/10.1016/S0969-8051(00)00104-9)
- [4] V.N. Levkovskij. Activation cross section nuclides of average masses (A=40-100) by protons and alpha particles with average energies (E= 10-50 MeV) Inter-Vesy, Moscow (1991).
- [5] LBNL Isotopes Project – LUNDs University, available from [http://www.Table of Radioactive Isotopes Version 2.1](http://www.TableofRadioactiveIsotopesVersion2.1) (2004).
- [6] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, SRIM 2003.20 available from <http://www.SRIM.org>.
- [7] S.A. Durrani, R.K. Bull, Solid state nuclear track detection. Pergamon Books Ltd. 1st Edition 1987.
- [8] S. Takacs, S. Tarkanyi, M Sonck, A. Hermanne. New cross section and intercomparison of proton monitor reactions on Ti, Ni and Cu. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **188** (2002) 106-111. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)01032-1](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)01032-1)
- [9] P. Kopecky. Proton Beam Monitoring via the $\text{Cu}(p,x)^{58}\text{Co}$, $^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$ and $^{65}\text{Cu}(p,2n)^{65}\text{Zn}$ reaction in copper. *International Journal Applied Radiation Isotopes* **36** 8 (1985) 657-66 [https://doi.org/10.1016/0020-708X\(85\)90008-01](https://doi.org/10.1016/0020-708X(85)90008-01).

$^{94}\text{Mo}(p,n)$ reaction. *Radiochimica Acta*
(1993) 115-121.
<https://doi.org/10.1524/ract.1993.62.3.115>

[15] F. Rösch. S.M. Qaim. Nuclear data relevant to the production of positron emitting technetium isotope ^{94m}Tc via the