

Calculation of the production yield of ^{43}Sc radioisotope using proton, deuteron and alpha projectiles

Mansoureh Tatari*, Motahharez Dehghani

Nuclear Physics Division, Department of Physics, Yazd University, Yazd, Iran

Received: 16.11.2019 Final revised: 28.12.2019 Accepted: 12.02.2020

Doi link: [10.22055/JRMBS.2020.15571](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.15571)

Abstract

The ^{43}Sc radioisotope with a half-life of 3.891 h is an ideal radioisotope for PET imaging. In this paper, the production of ^{43}Sc radioisotope through $^{43}\text{Ca}(p,n)^{43}\text{Sc}$, $^{44}\text{Ca}(p,2n)^{43}\text{Sc}$, $^{42}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$, $^{43}\text{Ca}(d,2n)^{43}\text{Sc}$, $^{40}\text{Ca}(\alpha,p)^{43}\text{Sc}$ and $^{41}\text{K}(\alpha,2n)^{43}\text{Sc}$ nuclear reactions have been investigated. The cross-section of these reactions was calculated using the TALYS1.8 and ALICE ASH 1.0 nuclear codes and compared with the experimental results. The SRIM-2013 and MCNPX2.6 codes are used to calculate the stopping power and projectile flux distribution in the target. The theoretical and simulation production yields for each reaction are calculated. The production yield results of some of these reactions are compared with the experimental results at the same optimum energy interval, which shows relatively good agreement between the experimental and computational results.

Keywords: Nuclear reactions, ^{43}Sc radioisotope, Production yield, MCNP2.6 code, TALYS1.8 and ALICE ASH 1.0 code

* Corresponding Author: mtatari@yazd.ac.ir



محاسبه بهره تولید رادیوایزوتوپ ^{43}Sc با استفاده از پرتابه‌های پروتون، دوترون و آلفا

منصوره ناتاری*، مطهره دهقانی

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

دریافت: 1398/08/25 ویرایش نهایی: 1398/10/07 پذیرش: 1398/11/23

Doi link: [10.22055/JRMBS.2020.15571](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.15571)

چکیده

رادیوایزوتوپ ^{43}Sc با نیمه عمر 3,891 h یک رادیوایزوتوپ مناسب و ایده‌آل برای تصویربرداری PET است. در این مقاله تولید رادیوایزوتوپ ^{43}Sc از طریق واکنش‌های هسته‌ای $^{43}\text{Ca}(p,n)^{43}\text{Sc}$ ، $^{44}\text{Ca}(p,2n)^{43}\text{Sc}$ ، $^{42}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$ ، $^{43}\text{Ca}(d,2n)^{43}\text{Sc}$ ، $^{40}\text{Ca}(\alpha,p)^{43}\text{Sc}$ و $^{41}\text{K}(\alpha,2n)^{43}\text{Sc}$ مورد بررسی قرار گرفته است. سطح مقطع این واکنش‌ها با استفاده از کدهای هسته‌ای TALYS 1.8 و ALICE ASH 1.0 محاسبه شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. از کدهای SRIM-2013 و MCNPX2.6 برای محاسبه توان توقف و توزیع شار پرتابه در هدف استفاده شده است. برای هر واکنش بهره تولید تئوری و شبیه‌سازی محاسبه شده است. نتایج بهره تولید برخی از این واکنش‌ها با نتایج تجربی در همان بازه انرژی بهینه انتخابی مقایسه شده است که تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج تجربی و محاسباتی مشاهده می‌شود.

کلیدواژگان: واکنش‌های هسته‌ای، رادیوایزوتوپ ^{43}Sc ، بهره تولید، کد MCNPX2.6، کدهای TALYS 1.8 و ALICE ASH 1.0

مقدمه

این رادیوایزوتوپ پایین بوده و دز جذبی کمی را برای بیمار به همراه دارد. گامای منتشر شده از ^{43}Sc سبب شده کیفیت تصویربرداری با این رادیوایزوتوپ به دلیل انتشار سه فوتون (دو فوتون نابودی و یک فوتون گاما) بهتر باشد. به دلیل ویژگی‌هایی که ذکر شد ایزوتوپ ^{43}Sc به‌عنوان مناسب‌ترین رادیوفلز برای تصویربرداری PET پیشنهاد شده است [3و4]. همچنین از این رادیوایزوتوپ می‌توان به‌عنوان دزیمتر در بدن موجود زنده بهره برد [5]. در سال 2015 والراک¹ و همکاران برتری رادیوایزوتوپ ^{43}Sc نسبت به ^{44}Sc برای مقاصد

رادیوایزوتوپ ^{43}Sc گسیلنده پوزیترون با نسبت انشعابی 88/1 درصد و نیمه‌عمر مناسب 3,891 h است. این رادیوایزوتوپ به دلیل داشتن شدت پوزیترون بالا و نیمه‌عمر طولانی یک رادیوایزوتوپ ایده‌آل برای تصویربرداری PET می‌باشد. نیمه‌عمر طولانی این رادیوایزوتوپ، باعث شده تا قابلیت انتقال آن از یک سیکلوترون به مراکز درمانی وجود داشته باشد [1و2]. ^{43}Sc علاوه برانتشار پوزیترون، پرتو گاما با انرژی keV 372,9 نیز منتشر می‌کند. انرژی گامای منتشر شده از

* نویسنده مسئول: mtatari@yazd.ac.ir

¹Walczak

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

این مقاله تحت مجوز کپی‌رایت کامنز تخصصی 4.0 بین‌المللی می‌باشد.



طبیعی و غنی شده کلسیم و تیتانیم پرداختند و بهره تولید رادیوایزوتوپ ^{43}Sc با انرژی‌های مختلف پرتابه را به دست آورده و همچنین میزان ناخالصی‌های تولید شده در کنار هر واکنش را تعیین نمودند [8]. اخیراً در سال 2019 کارزانیگا و همکاران سطح مقطع تولید رادیوایزوتوپ ^{43}Sc از طریق کانال $^{43}\text{Ca}(d,n)^{42}\text{Ca}$ را اندازه‌گیری کرده و سپس بهره تولید واکنش مورد نظر را محاسبه نمودند [9]. همواره برای تولید آزمایشگاهی یک رادیوایزوتوپ خطر پرتوگیری وجود دارد و همچنین در تولید رادیوایزوتوپ‌ها به تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز است که ممکن است به راحتی در دسترس نباشند و یا در برخی موارد، هدف مورد نیاز برای تولید رادیوایزوتوپ مورد نظر گران قیمت باشد. بنابراین بهتر است قبل از تولید آزمایشگاهی یک رادیوایزوتوپ از کدهای شبیه‌سازی برای تخمین و بهینه‌سازی بهره تولید رادیوایزوتوپ مورد نظر استفاده شود و بهترین شرایط برای افزایش بهره تولید یک رادیوایزوتوپ و کاهش تولید ناخالصی‌های ایزوتوپی به همراه آن تعیین گردد. در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی با استفاده از کد مونت‌کارلویی MCNPX برای شبیه‌سازی تولید رادیوایزوتوپ‌ها صورت گرفته است [10-13]. در این مقاله سطح مقطع تولید رادیوایزوتوپ ^{43}Sc در واکنش‌های هسته‌ای $^{42}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$ ، $^{44}\text{Ca}(p,2n)^{43}\text{Sc}$ ، $^{43}\text{Ca}(p,n)^{43}\text{Sc}$ ، $^{41}\text{K}(\alpha,2n)^{43}\text{Sc}$ و $^{40}\text{Ca}(\alpha,p)^{43}\text{Sc}$ ، $^{43}\text{Ca}(d,2n)^{43}\text{Sc}$ با استفاده از کدهای هسته‌ای TALYS 1.8 و ALICE ASH 1.0 محاسبه و برای هر واکنش بازه انرژی که حداکثر سطح مقطع تولید رادیوایزوتوپ ^{43}Sc و حداقل تولید ناخالصی ایزوتوپی وجود دارد

پزشکی را عنوان کرده و به تولید ^{43}Sc از طریق پرتودهی پرتو آلفا بر روی اهداف $^{\text{nat}}\text{CaCO}_3$ و $^{40}\text{CaCO}_3$ پرداختند و روش جداسازی ^{43}Sc از کلسیم را ارائه دادند [3]. در سال 2016 تحقیقی برای تولید رادیوایزوتوپ‌های ^{43}Sc و ^{44}Sc توسط اسکلینیارز¹ انجام شد که در این تحقیق اهداف کلسیم و پتاسیم طبیعی و غنی شده توسط ذرات آلفا در سیکلوترون یون سنگین دانشگاه ورشو پرتودهی شده و در نهایت بهره تولید ایزوتوپ‌های مورد نظر و همچنین ناخالصی‌های تولید شده در کنار آنها تعیین شده است [2]. در همین سال مینه‌گیشی² و همکاران تولید رادیوایزوتوپ‌های ^{43}Sc و ^{47}Sc از طریق کانال واکنش $^{\text{nat}}^{44}\text{Ca}(\alpha,x)$ را مورد آزمایش قرار دادند و بهره تولید خالص ایزوتوپ‌های مورد نظر را بعد از جداسازی تعیین نمودند [6]. در سال 2017 کارزانیگا³ و همکاران سطح مقطع تولید رادیوایزوتوپ‌های ^{43}Sc و ^{44}Sc از طریق تابش پروتون‌های خروجی از یک سیکلوترون پزشکی با انرژی 18 MeV بر روی اهداف غنی شده ^{43}Ca ، ^{44}Ca و ^{46}Ti را اندازه‌گیری کرده و بهره تولید را محاسبه نمودند [7]. در همین سال رانگاجاریولو⁴ و همکاران تولید رادیوایزوتوپ‌های ^{43}Sc و ^{44}Sc در واکنش پروتون و آلفا بر روی کلسیم به شکل $^{\text{nat}}\text{CaO}$ را مورد ارزیابی قرار دادند [4]. در سال 2018 سطح مقطع تولید رادیوایزوتوپ‌های ^{43}Sc ، ^{44}Sc و $^{44\text{m}}\text{Sc}$ در واکنش‌های پروتون، دوترون و آلفا با هدف $^{\text{nat}}\text{CaO}$ تا انرژی 20 MeV توسط الیباد⁵ و همکاران اندازه‌گیری شده و بهره تولید محاسبه شده است [1]. در سال 2018 سیتارز⁶ و همکاران به تولید رادیوایزوتوپ‌های پزشکی ^{43}Sc ، ^{44}Sc ، $^{44\text{m}}\text{Sc}$ و ^{47}Sc با تابش پرتابه‌های پروتون و دوترون به اهداف

⁴Rangacharyulu⁵Alabyad⁶Sitarz¹Szkliniarz²Minegishi³Carzaniga

هدف و تعیین انرژی چشمه از توان توقف محاسبه شده با این کد استفاده شده است [15].

کد MCNPX

یک کد قدرتمند برای شبیه‌سازی مسائل و حل آنها به روش مونت کارلو می‌باشد و قادر است ترابرد ذرات گوناگونی از جمله پروتون، نوترون، الکترون، فوتون و غیره را در هر نوع هندسه سه بعدی دنبال کند و نتایج ترابرد ذره را برای بازه انرژی مد نظر ارائه دهد [16].

نتایج سطح مقطع

تولید ^{43}Sc با پرتابه آلفا

با توجه به شکل‌های 1 و 2 در واکنش $^{40}\text{Ca}(\alpha, p)^{43}\text{Sc}$ از کد ALICE ASH و در واکنش $^{41}\text{K}(\alpha, 2n)^{43}\text{Sc}$ از کد TALYS 1.8 به دلیل مطابقت بیشتر با نتایج تجربی [17 و 18] برای محاسبه سطح مقطع‌های هر واکنش استفاده شده است. سطح مقطع واکنش $^{40}\text{Ca}(\alpha, p)^{43}\text{Sc}$ که با استفاده از کد ALICE ASH محاسبه شده است در انرژی 14 MeV دارای بیشترین مقدار سطح مقطع 608 mb می‌باشد که در شکل 3 نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که در این واکنش ناخالصی ایزوتوپی تولید نمی‌شود. برای این واکنش بازه انرژی 0-20 MeV به عنوان بازه انرژی بهینه انرژی انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود از واکنش پرتابه آلفا با هدف ^{41}K علاوه بر ایزوتوپ ^{43}Sc ایزوتوپ‌های ناخواسته ^{44}Sc و ^{45}Sc تولید می‌شوند. حداکثر سطح مقطع واکنش $^{41}\text{K}(\alpha, 2n)^{43}\text{Sc}$ در انرژی 23 MeV و برابر با 259 mb است. در این واکنش بازه انرژی بهینه 19-29 MeV انتخاب شده است.

تعیین می‌شود. سپس در هر واکنش بهره تولید تئوری و بهره تولید شبیه‌سازی محاسبه شده است.

محاسبه سطح مقطع

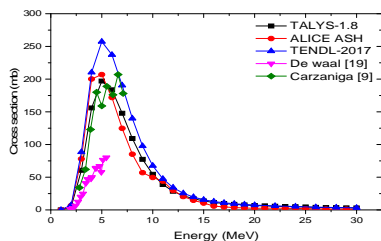
در این مقاله از کدهای هسته‌ای TALYS 1.8 و ALICE ASH 1.0 برای محاسبه سطح مقطع واکنش‌ها و همچنین تعیین محدوده انرژی بهینه هر واکنش استفاده شده است. کدهای هسته‌ای TALYS 1.8 و ALICE ASH 1.0 برای بررسی و مطالعه واکنش‌های هسته‌ای به کار می‌روند و از نظر فیزیک مشابه بوده و در داده‌های ورودی و زمان لازم برای محاسبه تفاوت دارند [14]. در هر واکنش هسته‌ای نتایج کدهای هسته‌ای TALYS 1.8 و ALICE ASH 1.0 با نتایج تجربی مقایسه شده و نتایج کدی که به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر است، برای محاسبه بهره تولید انتخاب شده است. همچنین با توجه به نتایج سطح مقطع، محدوده انرژی بهینه پرتابه در هر واکنش تعیین می‌شود به طوری که سطح مقطع تولید رادیوایزوتوپ مورد نظر حداکثر شده و سطح مقطع تولید ایزوتوپ‌های ناخواسته، به حداقل برسد.

کد SRIM

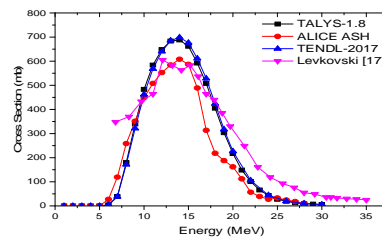
کد سریم یک برنامه شبیه‌سازی مونت کارلو برای بررسی نفوذ یونها به مواد است. به کمک این کد می‌توان پدیده‌های مرتبط با افت انرژی یونها مانند میزان نفوذ و توان توقف جرمی ذره شتاب داده شده در ماده مورد نظر را در گستره انرژی 10 eV تا 2 GeV بر واحد جرمی اتمی، به دست آورد. در این مقاله در واکنش‌های مورد بررسی برای محاسبه ضخامت بهینه

تولید ^{43}Sc با پرتابه دوترون

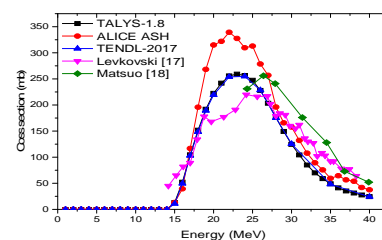
در واکنش‌های هسته‌ای $^{42}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$ و $^{43}\text{Ca}(d,2n)^{43}\text{Sc}$ نتایج سطح مقطع محاسبه شده با کد TALYS مناسب‌تر و نزدیک‌تر به نتایج تجربی [9 و 19] و داده‌های نظری TENDL-2017 است. نتایج در شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده است. در واکنش $^{42}\text{Ca}(d, n)^{43}\text{Sc}$ بیشترین مقدار سطح مقطع 197mb و در انرژی 5MeV است. تنها ناخالصی ایزوتوپی در این واکنش تولید ^{44}Sc با سطح مقطع بسیار پایین است که در شکل 7 نشان داده شده است. در این واکنش بازه انرژی بهینه 0-7 MeV انتخاب شده است. سطح مقطع تولید ایزوتوپ ^{43}Sc و ناخالصی تولید شده در کنار آن در برهم‌کنش دوترون با ^{43}Ca در شکل 8 نشان داده شده است. در واکنش $^{43}\text{Ca}(d,2n)^{43}\text{Sc}$ بیشترین سطح مقطع 300 mb و مربوط به انرژی 13 MeV است. ناخالصی‌های ایزوتوپی ^{44}Sc و ^{45}Sc در این واکنش تولید می‌شوند. برای کاهش تولید ناخالصی ایزوتوپی و افزایش تولید ^{43}Sc ، بازه انرژی 10-20 MeV انتخاب شده است.



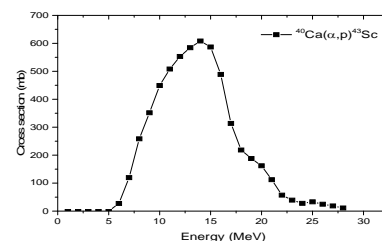
شکل 5. مقایسه تابع برانگیختگی واکنش $^{42}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$ محاسبه شده با کدهای TALYS-1.8 و ALICE ASH با نتایج تجربی.



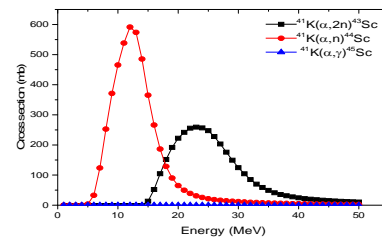
شکل 6. مقایسه تابع برانگیختگی واکنش $^{40}\text{Ca}(\alpha,p)^{43}\text{Sc}$ محاسبه شده با کدهای TALYS-1.8 و ALICE ASH با نتایج تجربی.



شکل 7. مقایسه تابع برانگیختگی واکنش $^{43}\text{Ca}(d,2n)^{43}\text{Sc}$ محاسبه شده با کدهای TALYS-1.8 و ALICE ASH با نتایج تجربی.

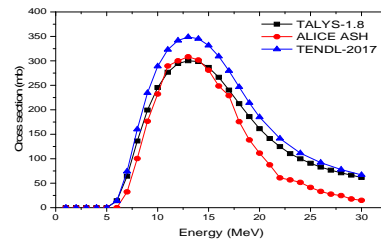
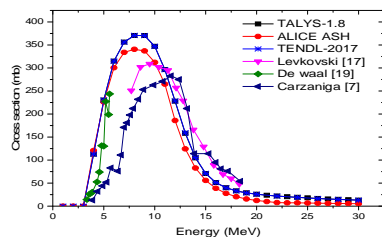


شکل 8. تابع برانگیختگی واکنش $^{40}\text{Ca}(\alpha,x)^{43}\text{Sc}$ محاسبه شده با کد ALICE ASH.

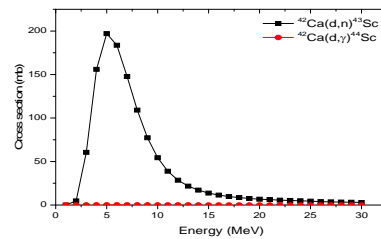


شکل 9. تابع برانگیختگی واکنش $^{41}\text{K}(\alpha,x)^{43}\text{Sc}$ محاسبه شده با کد TALYS-1.8.

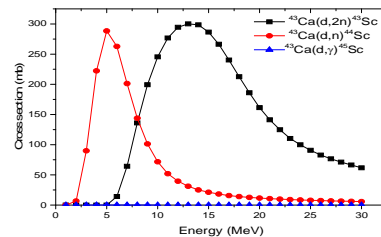
ایزوتوپ ^{43}Sc در انرژی 8 MeV به حداکثر مقدار 340 mb می‌رسد. نتایج در شکل 11 نشان داده شده است. بازه انرژی 4-17 MeV که ایزوتوپ ^{43}Sc در این گستره حداکثر مقدار سطح مقطع را داراست به‌عنوان بازه انرژی بهینه انتخاب می‌شود. مطابق شکل 12 بر اساس نتایج کد ALICE ASH در واکنش پروتون با ^{44}Ca ناخالصی‌های ایزوتوپی ^{44}Sc و ^{45}Sc تولید می‌شوند. ناخالصی ایزوتوپی ^{44}Sc تا انرژی 18 MeV سطح مقطع بالاتری نسبت به ^{43}Sc دارد. به‌نظر می‌رسد در واکنش $^{44}\text{Ca}(p,2n)^{43}\text{Sc}$ بازه انرژی 19-28 MeV که باعث افزایش تولید ^{43}Sc و کاهش تولید ناخالصی ایزوتوپی ^{44}Sc می‌شود، انتخابی مناسب است. در این واکنش بیشترین مقدار سطح مقطع تولید ^{43}Sc در انرژی 21 MeV و 189 mb است.



شکل 6. مقایسه تابع برانگیختگی واکنش $^{43}\text{Ca}(d,2n)^{43}\text{Sc}$ محاسبه شده با کدهای TALYS-1.8 و ALICE ASH با نتایج تجربی.

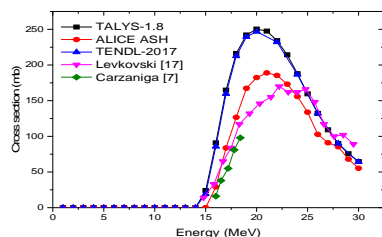


شکل 7. تابع برانگیختگی واکنش $^{42}\text{Ca}(d,x)\text{Sc}$ محاسبه شده با کد TALYS-1.8.



شکل 8. تابع برانگیختگی واکنش $^{43}\text{Ca}(d,x)\text{Sc}$ محاسبه شده با کد TALYS-1.8.

شکل 9. مقایسه تابع برانگیختگی واکنش $^{43}\text{Ca}(p,n)^{43}\text{Sc}$ محاسبه شده با کدهای TALYS-1.8 و ALICE ASH با نتایج تجربی.



شکل 10. مقایسه تابع برانگیختگی واکنش $^{44}\text{Ca}(p,2n)^{43}\text{Sc}$ محاسبه شده با کدهای TALYS-1.8 و ALICE ASH با نتایج تجربی.

تولید ^{43}Sc با پرتابه پروتون

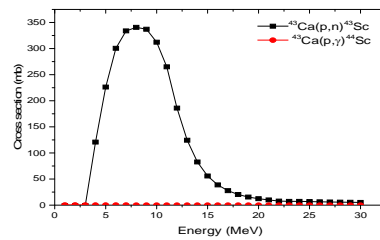
در واکنش‌های $^{43}\text{Ca}(p,n)^{43}\text{Sc}$ و $^{44}\text{Ca}(p,2n)^{43}\text{Sc}$ نتایج سطح مقطع کد هسته‌ای ALICE ASH مطابقت بیشتری با نتایج تجربی [19] و [7] دارد و نتایج در شکل‌های 9 و 10 نشان داده شده است. با توجه به نتایج کد هسته‌ای ALICE ASH در واکنش $^{43}\text{Ca}(p,n)^{43}\text{Sc}$ ناخالصی ایزوتوپی ^{44}Sc سطح مقطع تولید پایینی دارد و سطح مقطع تولید

بار ذره پرتابه، ثابت واپاشی محصول برحسب s^{-1} یا h^{-1} ،¹ زمان پرتودهی برحسب s یا h ، سطح مقطع واکنش برحسب mb و توان توقف جرمی برحسب $(\text{cm}^2 \cdot \text{MeV} \cdot \text{g}^{-1})$ هستند [11]. برای همه واکنش‌های مورد بررسی بهره تولید تئوری هر واکنش در بازه انرژی بهینه انتخابی آن واکنش و برای مدت زمان پرتودهی یک ساعت با جریان یک میکروآمپر محاسبه شده و نتایج در جدول 2 نشان داده شده است.

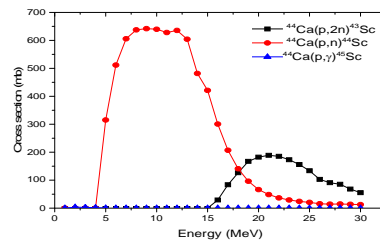
محاسبه اکتیویته شبیه‌سازی

برای واکنش‌های مورد نظر با توجه به بازه انرژی بهینه، ضخامت هدف در هر واکنش با استفاده از کد SRIM محاسبه شده است. با توجه به رابطه برد-انرژی ذرات پرتابه در هوای خشک که با استفاده از کد SRIM به دست می‌آید، انرژی چشمه محاسبه می‌شود. ذرات پرتابه ابتدا از هوای خشک به ضخامت 5cm عبور کرده سپس به هدف برخورد می‌کنند، بنابراین ذرات پرتابه هنگام ورود به هدف بایستی مقدار بالایی بازه انرژی بهینه انتخابی را داشته باشند. ضخامت هدف برای تمامی واکنش‌های مورد بررسی محاسبه شده و در جدول 2 نشان داده شده است.

شبیه‌سازی هندسه واکنش‌ها با استفاده از کد MCNPX انجام شده است. در همه واکنش‌ها هندسه هدف استوانه‌ای به شعاع یک سانتیمتر در نظر گرفته شده است که با فویل آلومینیومی پوشانده شده است. ضخامت هدف با استفاده از کد SRIM تعیین می‌شود. نمایی از هندسه شبیه‌سازی شده در شکل 13 نشان داده شده است. چشمه نیز به صورت دیسکی به شعاع یک سانتی‌متر که ذرات با توزیع گوسی از آن خارج شده و به‌طور عمود بر قاعده استوانه هدف می‌تابند، شبیه‌سازی شده است. با استفاده از تالی F4 شار ذرات پرتابه در



شکل 11. تابع برانگیختگی واکنش $^{43}\text{Ca}(p,x)\text{Sc}$ محاسبه شده با کد ALICE ASH.



شکل 12. تابع برانگیختگی واکنش $^{44}\text{Ca}(p,x)\text{Sc}$ محاسبه شده با کد ALICE ASH.

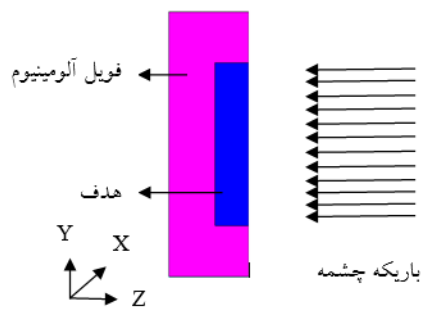
محاسبه اکتیویته تئوری

ابتدا برای محاسبه اکتیویته تئوری هر واکنش، داده‌های سطح مقطع هر واکنش با استفاده از کدهای TALYS 1.8 و ALICE ASH محاسبه شده است. سپس توان توقف در بازه انرژی بهینه انتخابی برای هر واکنش با استفاده از کد SRIM به دست آمده است و در نهایت اکتیویته هر واکنش با رابطه 1 و حل انتگرال آن به روش سیمپسون در محیط برنامه‌نویسی MATLAB محاسبه شده است:

$$A = \frac{N_a I H}{M Z_p} (1 - e^{-\lambda t}) \int_{E_{out}}^{E_{in}} \frac{\sigma(E)}{S_p(E)} dE$$

1

که در این رابطه پارامترهای A ، N_a ، I ، H ، M ، Z_p ، λ ، S_p و σ_T به ترتیب اکتیویته محصول برحسب Bq ، عدد آووگادرو، جریان تابش فرودی برحسب μA ، فراوانی هدف، وزن مولکولی هدف برحسب (g/mol) ،



حجم استوانه هدف محاسبه می‌شود. بهره تولید رادیوایزوتوپ ^{43}Sc در هر واکنش با استفاده از رابطه 2 و حل انتگرال آن به روش سیمپسون در محیط برنامه‌نویسی MATLAB محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{N_a \rho H I d}{M Z_p} (1 - e^{-\lambda t}) \int_{E_{out}}^{E_{in}} P(E) \sigma(E) dE$$

2

در این رابطه ρ ، d و $P(E)$ به ترتیب چگالی هدف برحسب (g/cm^3)، ضخامت هدف برحسب cm و تابع توزیع شار ذرات پرتابه در هدف بوده و بقیه پارامترها نیز همانند رابطه 1 هستند [11].

شکل 13. نمایی از هندسه شبیه‌سازی شده با کد MCNPX

جدول 2. ضخامت بهینه هدف، بهره تولید تئوری و بهره تولید شبیه‌سازی واکنش‌های مورد بررسی با توجه به بازه انرژی بهینه انتخابی هر واکنش.

نوع واکنش	بازه انرژی (MeV)	ضخامت هدف (cm)	بهره تولید تئوری (GBq/ $\mu\text{A.h}$)	بهره تولید شبیه سازی MCNPX (GBq/ $\mu\text{A.h}$)
$^{43}\text{Ca}(p,n)^{43}\text{Sc}$	4-17	0,2741	1,1096	1,0155
$^{44}\text{Ca}(p,2n)^{43}\text{Sc}$	19-28	0,3660	1,1240	1,1007
$^{42}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$	0-7	0,0391	0,10145	0,10594
$^{43}\text{Ca}(d,2n)^{43}\text{Sc}$	10-20	0,1653	0,92051	0,83814
$^{40}\text{Ca}(\alpha,p)^{43}\text{Sc}$	0-20	0,0340	0,13207	0,13668
$^{41}\text{K}(\alpha,2n)^{43}\text{Sc}$	19-29	0,0621	0,09011	0,08969

جدول 3. مقایسه نتایج بهره تولید تئوری و شبیه‌سازی، محاسبه شده در این مقاله با نتایج تجربی در بازه انرژی بهینه انتخابی هر واکنش.

ذره پرتابه	بازه انرژی (MeV)	هدف	بهره تولید تئوری (MBq/ $\mu\text{A.h}$)	بهره تولید شبیه سازی MCNPX (MBq/ $\mu\text{A.h}$)	بهره تولید تجربی (MBq/ $\mu\text{A.h}$)
P	4-17	$^{43}\text{CaCO}_3$ (90%)	417	381	[8] 320 (20)
D	0-7	$^{42}\text{CaCO}_3$ (95.9%)	41	42	[8] 35 (2)
α	0-20	$^{40}\text{CaCO}_3$ (99.99%)	53	55	[2] 88 (13)
α	19-29	^{41}KCl (95.4%)	46	46	[2] 60 (9)

بحث و نتیجه گیری

شبیه‌سازی و تئوری در این واکنش‌ها محاسبه شده است و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و نتایج در جدول 3 نشان داده شده است. با توجه به توافق نسبتاً خوبی که بین نتایج محاسباتی در این مقاله و نتایج تجربی وجود دارد، می‌توان نتیجه گرفت که قبل از تولید آزمایشگاهی یک رادیوایزوتوپ، از روش‌های محاسباتی برای پیش‌بینی حداکثر نمودن بهره تولید آن رادیوایزوتوپ و حداقل نمودن تولید ایزوتوپ‌های ناخواسته در کنار محصول، استفاده نمود.

در این مقاله بهره تولید رادیوایزوتوپ ^{43}Sc در واکنش‌های هسته‌ای با پرتابه‌های پروتون، دوترون و آلفا بر روی ایزوتوپ‌های کلسیم و پتاسیم مورد ارزیابی قرار گرفته است. در محاسبه سطح مقطع، برای واکنش‌های $^{43}\text{Ca}(p,n)^{43}\text{Sc}$ ، $^{44}\text{Ca}(p,2n)^{43}\text{Sc}$ و $^{40}\text{Ca}(\alpha,p)^{43}\text{Sc}$ نتایج کد ALICE ASH 1.0 و برای واکنش‌های $^{43}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$ ، $^{42}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$ و $^{43}\text{Sc}(\alpha,2n)^{41}\text{K}$ نتایج کد TALYS به دلیل هم‌خوانی با نتایج تجربی مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از توان توقف محاسبه شده با کد SRIM و شار ذرات محاسبه شده با کد MCNPX بهره تولید تئوری و بهره تولید شبیه‌سازی در هر واکنش محاسبه شده است. نتایج بهره تولید تئوری و شبیه‌سازی در بازه انرژی بهینه برای هر واکنش در جدول 2 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در واکنش‌های مورد نظر، واکنش‌های $^{43}\text{Ca}(p,n)^{43}\text{Sc}$ و $^{44}\text{Ca}(p,2n)^{43}\text{Sc}$ بیشترین بهره تولید رادیوایزوتوپ ^{43}Sc را دارند. با بررسی برخی از واکنش‌های مورد نظر در بازه انرژی بهینه انتخابی، مشاهده می‌شود که آزمایش‌های تجربی برای اندازه‌گیری بهره تولید انجام شده است. با در نظر گرفتن فراوانی ایزوتوپی و شیمیایی هدف، بهره تولید

مرجع‌ها

- [1] M. Alabyad, G.Y. Mohamed, H.E. Hassan, S. Takács, F. Ditrói, Experimental measurements and theoretical calculations for proton, deuteron and α -particle induced nuclear reactions on calcium: special relevance to the production of $^{43,44}\text{Sc}$, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **316** (2018) 119-128. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5733-4>
- [2] K. Szkliniarz, M. Sitarz, R. Walczak, J. Jastrzębski, A. Bilewicz, J. Choiński, A. Jakubowski, A. Majkowska, A. Stolarz, A. Trzcińska, W. Zipper, Production of medical Sc radioisotopes with an alpha particle beam, *Applied Radiation and Isotopes* **118** (2016) 182-189.

- Vermeulen, C. Vockenhuber, S. Braccini, Measurement of the ^{43}Sc production cross-section with a deuteron beam, *Applied Radiation and Isotopes* **145** (2019) 205-208. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.12.031>
- [10] M. Sadeghi, N. Jokar, T. Kakavand, H. G. Fard, C. Tenreiro, Prediction of ^{67}Ga production using the Monte Carlo code MCNPX, *Applied Radiation and Isotopes* **77** (2013) 14-17. [10.1016/j.apradiso.2013.02.001](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.02.001)
- [11] M. Eslami, T. Kakavand, Simulation of the direct production of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ at a small cyclotron, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **329** (2014) 18-21. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.03.008>
- [12] S.F. Hosseini, M. Aboudzadeh, M. Sadeghi, A.A. Teymourlouy, M. Rostampour, Assessment and estimation of ^{67}Cu production yield via deuteron induced reactions on ^{nat}Zn and ^{70}Zn , *Applied Radiation and Isotopes* **127** (2017) 137-141. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.05.024>
- [13] Z. Karimi, M. Sadeghi, M. Rostampour, Assessment and estimation of ^{65}Zn production yield via neutron induced reaction on ^{nat}ZnO and $^{nat}\text{ZnONPs}$, *Applied Radiation and Isotopes* **141** (2018) 118-121. [10.1016/j.apradiso.2018.09.002](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.09.002)
- [14] S.A. Fegghi, Z. Gholamzadeh, Z. Alipoor, A. Zali, M. Joharifard, M. Aref, C. Tenreiro, A benchmark study on uncertainty of ALICE ASH 1.0, TALYS 1.0 and MCNPX 2.6 codes to estimate production yield of accelerator-based radioisotopes, *Praman* **81** (2013) 87-101. <https://doi.org/10.1007/s12043-013-0554-z>
- <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.07.001>
- [3] R. Walczak, S. Krajewski, K. Szkliniarz, M. Sitarz, K. Abbas, J. Choiński, A. Jakubowski, J. Jastrzębski, A. Majkowska, F. Simonelli, A. Stolarz, Cyclotron production of ^{43}Sc for PET imaging, *EJNMMI physics* **2** (2015) 33. [10.1186/s40658-015-0136-x](https://doi.org/10.1186/s40658-015-0136-x)
- [4] C. Rangacharyulu, M. Fukuda, H. Kanda, S. Nishizaki, N. Takahashi, Assessment of $^{43,44}\text{Sc}$ isotope production in proton-and alpha-induced reactions, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **314** (2017) 1967-1971. <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5515-4>
- [5] T.H. Bokhari, A. Mushtaq, I.U. Khan, Separation of no-carrier-added radioactive scandium from neutron irradiated titanium, *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry* **283** (2010) 389-393. <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0370-6>
- [6] K. Minegishi, K. Nagatsu, M. Fukada, H. Suzuki, T. Ohya, M.R. Zhang, Production of scandium-43 and-47 from a powdery calcium oxide target via the $^{nat/44}\text{Ca}(\alpha,x)$ -channel, *Applied Radiation and Isotopes* **116** (2016) 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.07.017>
- [7] T.S. Carzaniga, M. Auger, S. Braccini, M. Bunka, A. Ereditato, K.P. Nesteruk, P. Scampoli, A. Türler, N. van der Meulen, Measurement of ^{43}Sc and ^{44}Sc production cross-section with an 18 MeV medical PET cyclotron, *Applied Radiation and Isotopes* **129** (2017) 96-102. [10.1016/j.apradiso.2017.08.013](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.08.013)
- [8] M. Sitarz, K. Szkliniarz, J. Jastrzębski, J. Choiński, A. Guertin, F. Haddad, A. Jakubowski, K. Kapinos, M. Kisieliński, A. Majkowska, E. Nigron, Production of Sc medical radioisotopes with proton and deuteron beams, *Applied Radiation and Isotopes* **142** (2018) 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.09.025>
- [9] T.S. Carzaniga, N.P. van der Meulen, R. Hasler, C. Kottler, P. Peier, A. Türler, E.

- [18] T. Matsuo, T.T. Sugihara, Evidence for Low-Momentum-Transfer Process In K^{41} (A, N) $\text{Sc}^{44m, G}$ Reactions From Range Measurements of Products, *Canadian Journal of Chemistry* **39** (1961) 697-705. [10.1139/v61-084](https://doi.org/10.1139/v61-084)
- [19] T.J. De Waal, M. Peisach, R. Pretorius, Activation cross sections for proton-induced reaction on calcium isotopes up to 5.6-MeV, *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry* **33** (1971) 2783-2789. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(71\)80038-6](https://doi.org/10.1016/0022-1902(71)80038-6)
- [15] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark, The stopping and range of ions in matter (SRIM Code), (2000). <http://www.srim.org>
- [16] R.C. Fernow, R.C. Fernow, *Introduction to experimental particle physics*, Cambridge university press, (1989). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511622588>
- [17] V.N. Levkovski, Cross Sections of Medium Mass Nuclide Activation (A= 40–100) by Medium Energy Protons and Alpha Particles (E= 10–50 MeV), *Inter-Vesi, Moscow, USSR*, (1991). <https://www-nds.iaea.org>