

بررسی پارامترهای تجربی و نظری در تولید و کنترل کیفی چشمه رادیواکتیو روی-۶۵

سید یوسف فضائلی حسینی نژاد*⁺

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

فائزه آبادی نیا

دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

چکیده: چشمه رادیواکتیو روی-۶۵ به منظور مصرف های پزشکی، کشاورزی و صنعتی در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید شد. با توجه به امکانات موجود واکنش $^{65}\text{Cu}(p, n)^{65}\text{Zn}$ مورد استفاده قرار گرفت. انرژی باریکه فرودی به وسیله کدهای تالیس ۱٫۰ و آلیس ۹۱ و ضخامت هدف با کد $^{2012}\text{Srim}$ به دست آمد. طبق نتیجه‌ها، هدف با ضخامت $190\text{ }\mu\text{m}$ با باریکه پروتونی با انرژی 298 MeV و جریان $150\text{ }\mu\text{A}$ به مدت ۷ ساعت بمباران شد. سرانجام با روش‌های شیمیایی مبتنی بر کروماتوگرافی تعویض یونی، جداسازی روی-۶۵ انجام شد و چشمه‌هایی با فعالیت ۴۰۲ میکروکوری تهیه شد.

واژه‌های کلیدی: چشمه رادیواکتیو؛ روی-۶۵؛ تالیس؛ آلیس؛ بازده تولید؛ سیکلوترون.

KEYWORDS: Radioactive source; Zinc-65; TaLys; Alice; Production yield; CycLotron.

مقدمه

مد اصلی واپاشی روی - ۶۵ با نیمه عمر ۲۴۳/۹۳ روز، از روش گسیل پوزیترون (۱/۷٪) و گیراندازی الکترون (۹۸/۳٪) است. این رادیونوکلید در مطالعه‌های پزشکی مانند بررسی سوخت و ساز عنصر روی در بدن انسان و جانوران و جذب این عنصر در بافت‌های سرطانی استفاده می‌شود و همچنین در پژوهش‌های کشاورزی برای مطالعه میزان جذب این عنصر در گیاهان استفاده می‌شود. در زمینه فیزیولوژی و داروشناسی به عنوان ردیاب و در کالیبراسیون آشکارسازی گاما و دوربین‌های PET^(۱) به عنوان ماده استاندارد به کار می‌رود [۱،۲]. در این پژوهش هدف بررسی پارامترهای تجربی و نظری در تولید چشمه رادیواکتیو روی - ۶۵ می‌باشد.

بخش نظری

انتخاب بازه انرژی باریکه پروتون

با استفاده از کدهای هسته‌ای آلیس و تالیس، داده‌های سطح مقطع برحسب انرژی برای بمباران هدف مس طبیعی به وسیله پروتون به دست آمد. با رسم داده‌ها بر روی نمودار، بازه‌ای از انرژی که در آن کم‌ترین ناخالصی رادیونوکلیدی و بیش‌ترین مقدار فراورده موردنظر به دست می‌آید، انتخاب شد. به علت نیمه عمر بالای ^{65}Zn این رادیونوکلید به میزان کم و به صورت فراورده جانبی ژنراتور $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ تولید می‌شود. به این دلیل ساعت‌های به کارگیری سیکلوترون به برای شتاب دادن باریکه به مقدار چشمگیری

+E-mail: youseffazaeli@gmail.com

*عهده دار مکاتبات

(۱) Positron Emission Tomography



شکل ۱- نمایی از آبکاری طلا بر روی پس‌زمینه مس.

و همچنین انتهای مرحله شستشوی مس لایه نشانی شده و فراورده‌ها را از روی سطح هدف را نشان می‌دهد. آبکاری طلا و مس مطابق پژوهش پیش صورت گرفت [۸]. نمایی از آبکاری طلا در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین شکل های ۲ و ۳ هدف آبکاری شده را نشان می‌دهد. سپس هدف آماده شده با باریکه پروتون با انرژی ۲۹/۸ MeV و جریان ۱۵۰ μA به مدت ۷ ساعت بمباران شد. درحین بمباران هدف با جریان آب با دمای ۱۸°C خنک شد و در پشت نگهدارنده هدف شیارهایی وجود داشت که به خنک کردن بیش‌تر هدف کمک نماید [۹، ۱۰].

جداسازی فراوردهات واکنش

هدف بمباران شده به اتاق داغ انتقال یافت و در آن‌جا برای مراحل جداسازی به پودمان تولید شیمی وارد شد. نخست برای انحلال ماده هدف و جمع آوری فراوردهای واکنش‌های هسته‌ای، از نیتریک اسید ۸ نرمال استفاده شد و فرایند انحلال تا زمان ظهور رنگ طلایی پس‌زمینه ادامه یافت. این فرایند با آزاد شدن گاز سمی NO_2 همراه است از این‌رو با گرما دهی فراوردهای این گاز از محیط خارج شد. به برای این‌که نیتریک اسید موجب خرابی رزین نشود، محلول به وسیله گرمکن مغناطیسی خشک شد. سپس به منظور از خروج کامل نیتریک اسید از محلول، در سه مرحله ۲ mL آب به آن افزوده و خشک شد. رزین مورد استفاده در این پژوهش رزین تبادل یونی به فرم کلردار می‌باشد. به همین سبب ۱۰ mL هیدروکلریک اسید ۲ مولار به مواد افزوده شد. برای آماده سازی

کاهش می‌یابد و از سوئی تولید چشمه رادیو اکتیو روی - ۶۵ توجیه اقتصادی بسیار بالایی پیدا می‌کند. بنابراین انتخاب بازه‌ی انرژی براساس مقدار بیشینه تولید رادیو نوکلید ^{62}Zn انجام گرفت.

ضخامت هدف

ضخامت هدف باید به گونه‌ای انتخاب شود که بیش‌ترین بازده تولید رادیو نوکلید مد نظر به دست آید. همچنین در این ضخامت گرمای تولید شده به حدی نباشد که باعث ذوب ماده هدف شود و انتقال گرمای مناسبی [۳] داشته باشد. کد سریم^(۱) قادر به بررسی برد گسترده‌ی وسیعی از یون‌ها در ماده هدف و توان توقف می‌باشد [۴]. بنابراین نمودار برد باریکه برحسب انرژی با استفاده از کد سریم ۲۰۱۲ به برای تعیین ضخامت بهینه هدف رسم شد [۵]. در این ضخامت بهینه، میزان کاهش انرژی پرتابه بر حسب بهترین انرژی‌های تولید تأمین می‌شود [۶].

بازده نظری

به منظور پیش‌بینی بازده تئوری تولید رادیونوکلیدها از داده‌های سطح مقطع به دست آمده از کدهای آلیس و تالیس و توان توقف به دست آمده از کد سریم استفاده شد [۷]. بازده نظری برای زمان‌های بمباران قابل مقایسه و یا کم‌تر از نیمه عمر فراورده را می‌توان از معادله (۱) محاسبه کرد.

$$Y \approx \frac{3.76 F_T}{Z_p W_T} \int_{E_1}^{E_2} \left(\frac{dE}{d(\rho x)} \right)^{-1} \sigma(E) dE \quad (1)$$

که Y فعالیت فراورده (در یکای $\frac{\text{GBq}}{\mu\text{A.h}}$)، F_T فراوانی ایزوتوپی

نوکلید در ماده هدف، W_T جرم اتمی ماده هدف، Z_p عدد بار ذره پرتابه، $\sigma(E)$ سطح مقطع در انرژی E ، $dE/d(\rho x)$ توان توقف، λ ثابت واپاشی فراورده و t زمان تابش‌دهی می‌باشند.

بخش تجربی

طراحی هدف برای بمباران

هدف مورد استفاده برای سیکلوترون 30 MeV شرکت IBA از جنس مس می‌باشد. ولی به علت ناخالصی‌های فلزی موجود در آن، نخست ضخامتی از طلا و سپس لایه ای از مس بر روی آن لایه‌نشانی شد. طلا با پروتون‌های بمباران شده واکنش نمی‌دهد

(۱) Srim

رزین به ستون کروماتوگرافی دارای رزین (رزین تبادل کاتیونی با نام علمی (Dowex 1X8(100-200 mesh CL- form است) cc ۴۰-۵۰ هیدروکلریک اسید ۲ مولار افزوده شد. سپس محلول خشک شده در هیدروکلریک اسید ۲ مولار حل و از روی ستون عبور داده شد. با افزودن cc ۵۰ هیدروکلریک اسید ۲ مولار و cc ۵۰ هیدروکلریک اسید ۰/۰۵ مولار به ترتیب جداسازی عنصرهای مس و روی از ستون انجام گرفت. به این ترتیب ^{65}Zn و ^{62}Zn خالص به دست آمد.



شکل ۲- تصویر لایه نشانی طلا بر روی مس.

بارگذاری ژنراتور

مواد رادیوکتیو در ژنراتور با ستون کروماتوگرافی دارای رزین پیش تثبیت شد. بارگذاری به وسیله پمپ پری استالیتیک (مالشی) انجام شد. سپس ژنراتور برای مقاصد تصویربرداری PET به مراکز درمانی ارسال شد تا روی - ۶۲ (ایزوتوپ مادر ^{62}Cu) استفاده شود. یک ماه بعد (زمان مورد نیاز برای زوال کامل رادیونوکلید ^{62}Zn) با استفاده از هیدروکلریک اسید ۰/۰۵ مولار، ^{65}Zn از ستون خارج و در بسته بندی نوع A و دارای برچسب زرد با دو خط قرمز بسته بندی شد (شکل های ۴ و ۵).



شکل ۳- آبکاری مس بر روی طلا نمودار.

نتیجه ها و بحث

طبق جدول ۱ عنصرهای تولیدی در بمباران مس طبیعی (دارای نوکلیدهای ^{63}Cu و ^{65}Cu) با باریکه پروتون از روش کدهای آلیس و تالیس پیش بینی شد. با توجه به نیمه عمر رادیونوکلیدهای روی، عنصرهایی که دارای نیمه عمر طولانی (در حد روز یا بیش تر) هستند مانند ^{59}Ni ، ^{63}Ni ، ^{50}Co ، ^{55}Fe ، ^{57}Co و ^{58}Co از منظر رادیو هسته ای مزاحم محسوب می شوند. عنصرهای ^{58}Co ، ^{60}Co و ^{57}Co دارای سطح مقطع تولید پایینی هستند و در عمل تولید نمی شوند. همچنین عنصرهای ^{59}Ni ، ^{63}Ni و ^{55}Fe نیمه عمر بالایی (میزان تولید کم) داشته و در مرحله های شیمی تخلیص نیز بر روی ستون جذب نمی شوند، از این رو مزاحمتی ایجاد نمی کنند.

با رسم تابع های برانگیختگی ^{62}Zn و ^{65}Zn در شکل ۶ و ۷، دیده می شود که بیشینه سطح مقطع تولید رادیو نوکلید ^{62}Zn در بازه انرژی ۱۴-۳۰ MeV قرار دارد و در این بازه انرژی رادیو نوکلید ^{65}Zn نیز تولید می شود.

با توجه به شکل ۸، کد سریم، مقدار برد پروتون در انرژی ۱۴ MeV و ۳۰ MeV را به ترتیب مقدارها ۰/۴۳ mm و



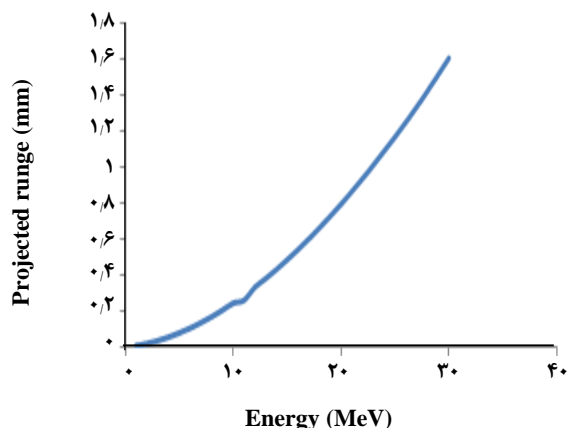
شکل ۴- بسته بندی چشمه رادیوکتیو روی-۶۵.



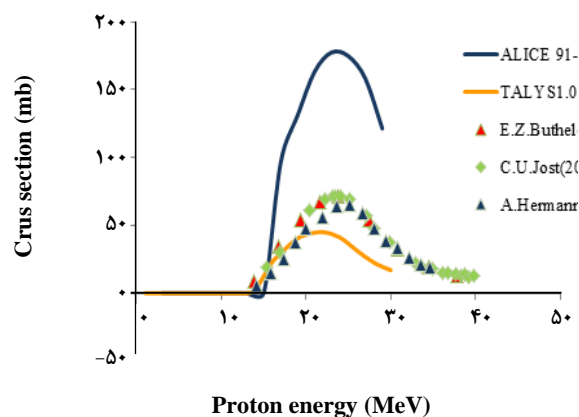
شکل ۵- برچسب به کار برده شده بر روی بسته ی نهایی.

جدول ۱- رادیونوکلئید های تولید شده براساس کد آلیس ۹۱ و تالیس ۱/۰ در بمباران ^{nat}Cu با پروتون.

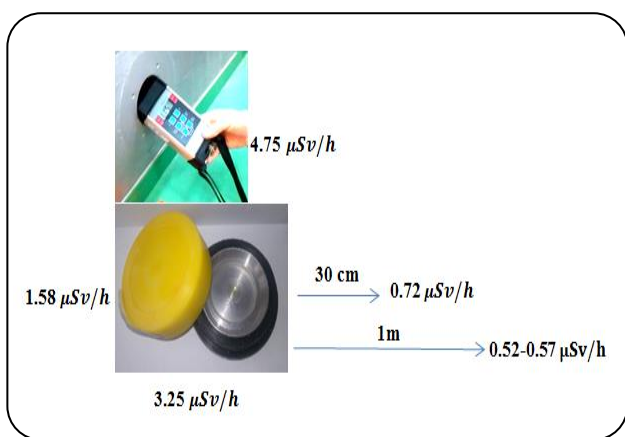
رادیونوکلئید	نیمه عمر	انرژی آستانه (MeV)	بیشینه سطح مقطع (MeV)cm ² کد آلیس ۹۱ کد تالیس ۱/۰	رادیونوکلئید	نیمه عمر	انرژی آستانه (MeV)	بیشینه سطح مقطع (MeV)cm ² کد آلیس ۹۱ کد تالیس ۱/۰
⁶⁵ Zn	۲۴۳/۹۳ روز	۱۵ ۱۱	(۲۹) ۵/۹۹ (۳۰) ۳/۶۱	⁶⁴ Ni	پایدار	۸۰/۴۸ ۲۰/۴۷	(۱۱) (۱۰)
⁶⁴ Zn	پایدار	۲۷ ۱۸	(۲۹) ۰/۱۵۹ (۳۰) ۳/۹۳	⁶³ Ni	۱۰۰/۱۷ سال	۲۳۰/۷۷ ۱۷۰/۷۷	(۱۹) (۱۷)
⁶³ Zn	۳۸/۴۶۷ دقیقه	۷ ۱>	(۲۹) ۱۵/۷۳ (۱۵) ۱۴۱/۰۳	⁶² Ni	پایدار	۴۲۶/۱۷ ۲۴۰/۷۹	(۱۳) (۱۲)
⁶² Zn	۹/۱۸ ساعت	۱۷ ۱۱	(۲۵) ۲۲/۰۸ (۳۰) ۱۵۵/۰۲	⁶¹ Ni	پایدار	۱۷۷/۴۴ ۴۵/۰۶	(۲۳) (۲۲)
⁶¹ Zn	۱/۴ دقیقه	۹ ۱>	(۱۷) ۴۹/۸۷ (۱۱) ۶۳/۵۲	⁶⁰ Ni	پایدار	۰/۰۱ ۰/۴۷	(۲۹) (۳۰)
⁶⁵ Cu	پایدار	۱۹ ۱۲	(۲۷) ۱۱۱/۵۷ (۲۴) ۴۳/۶۵	⁵⁹ Ni	۱/۰۱۲ سال *۱۰۵	۱۰۹/۹۲ ۸۴/۳۴	(۱۵) (۱۴)
⁶⁴ Cu	۱۲/۶۹ ساعت	۰ ۲۲	(۰) ۰ (۳۰) ۶/۹۹۶	⁵⁸ Ni	پایدار	۲۷۵/۹۲ ۱۰۸/۲۱	(۲۵) (۲۴)
⁶³ Cu	پایدار	۲۳ ۱۶	(۲۹) ۰/۲۰ (۳۰) ۰/۴۴	⁶¹ Co	۱/۶۵ ساعت	۲۰۶/۸۱ ۳۱۳/۹۱	(۱۵) (۱۲)
⁶² Cu	۹/۶۷ دقیقه	۰ ۲۶	(۰) ۰ (۳۰) ۰/۲۲	⁶⁰ Co	۵/۲۷۵ سال	۴۱۰/۷۸ ۴۱۵/۲۲	(۲۳) (۲۲)
⁶¹ Cu	۳/۳۳ ساعت	۲۱ ۱۲	(۲۹) ۴/۸۱ (۲۸) ۱۰/۷۴	⁵⁹ Co	پایدار	۱۱۸/۵۳ ۱۱۴/۵۹	(۲۹) (۳۰)
⁶⁰ Cu	۲۳/۶۶۷ دقیقه	۲۹ ۲۴	(۲۹) ۰/۰۰۱ (۳۰) ۵/۱۸	⁵⁸ Co	۷۰/۸۵ روز	(۰) ۰ ۰/۰۵۹	(۳۰) (۳۰)
⁵⁸ Fe	پایدار	۰ ۲۶	(۰) ۰ (۳۰) ۰/۰۳۴۷	⁵⁷ Co	۲۷۱/۷۴ روز	(۰) ۰ ۰/۱۸۳	(۰) (۳۰)
⁵⁷ Fe	پایدار	۰ ۱>	(۰) ۰ (۱۴) ۰/۳۸۳	⁶⁶ Zn	پایدار	(۰) ۰ ۰/۰۰۶۶۵	(۰) (۳۰)
⁵⁶ Fe	پایدار	۰ ۲۸	(۰) ۰ (۳۰) ۰/۰۱۰۵	⁵⁵ Fe	۲/۷۴۴ سال	(۰) ۰ ۰/۰۶۹۷	(۰) (۳۰)



شکل ۸ - نمودار منحنی برد - انرژی در بیماران مس طبیعی به وسیله باریکه پروتون.



شکل ۶ - نمودار سطح مقطع - انرژی واکنش $^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$ بیشینه سطح مقطع در بازه انرژی 14-30 MeV می باشد.

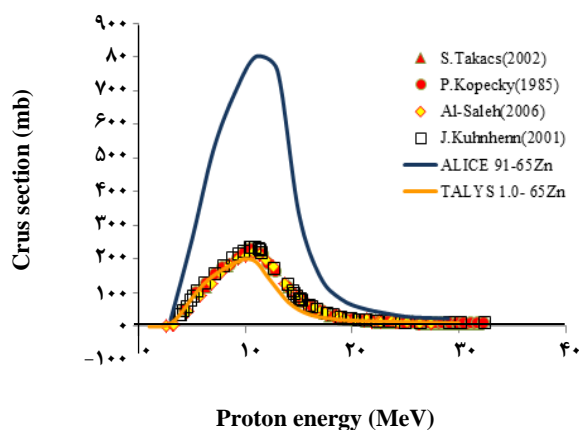


شکل ۹ - آهنگ دز نشان داده شده در حالت چسبیده (از بالا، پایین و پهلو)، ۳۰ سانتی متری و ۱ متری (محیطی).

پس از انجام بسته بندی، به وسیله دستگاه دوزیمتر بیشترین آهنگ دز در حالت چسبیده به چشمه مقدار ۵/۴ میکروسیورت بر ساعت اندازه گیری شد (شکل ۹).

نتیجه گیری

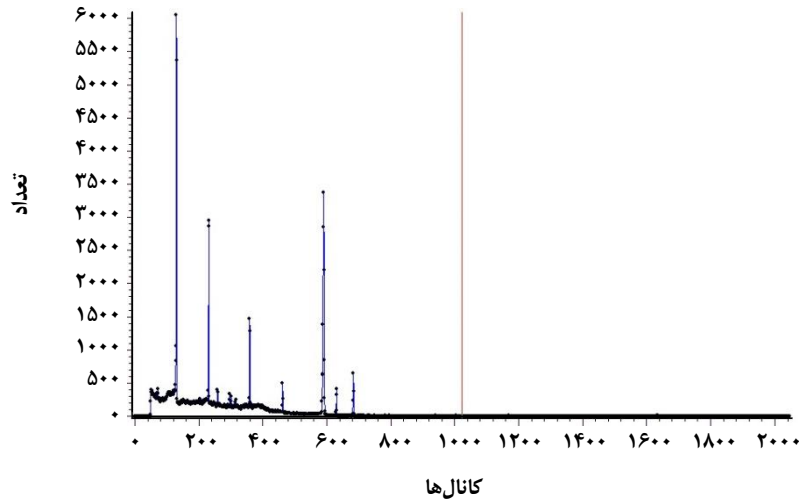
همانگونه که در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است با بازبینی طیف گامای مقدارها اندکی از فرآورده رادیواکتیو تولید شده، با استفاده از آشکارساز HPGe، تولید روی - ۶۲ و روی - ۶۵ با خلوص ۹۹/۹۹۹٪ تأیید شد. سرانجام برای استفاده های پزشکی هسته ای و مطالعه های هسته ای به مراکز درمانی و پژوهشی ارسال شد.



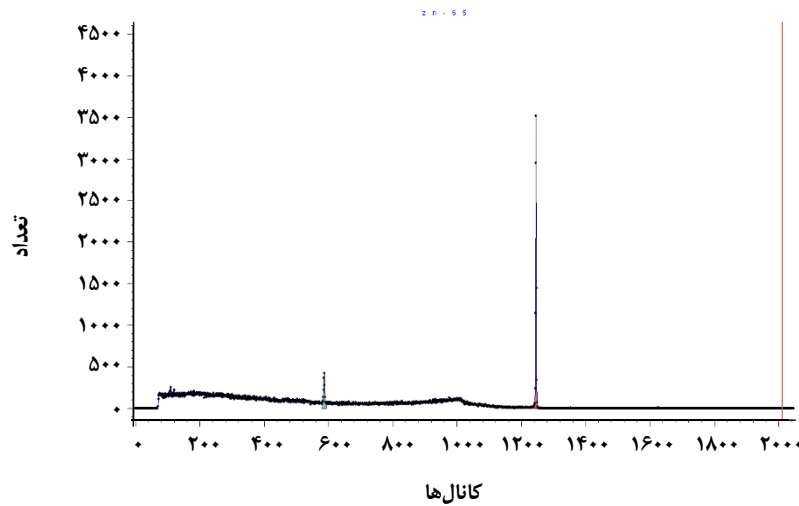
شکل ۷ - نمودار سطح مقطع محاسبه شده برحسب انرژی پروتون پرتابه با استفاده از کد آلیس و تالیس برای تولید ^{65}Zn در مقایسه با اندازه گیری های تجربی.

۱/۶۱ mm پیش بینی می کند. بنابراین ضخامت مورد نیاز برای کاهش انرژی باریکه پروتون در هدف مس ۱/۱۸ میلی متر می باشد.

با جای گذاری مقدارها در معادله بازده نظری تولید با استفاده از داده های کد آلیس و تالیس، مقدارها این بازده به ترتیب $0.188002 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ و $0.044186 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ به دست آمد. مقدارهای نظری اکتیویته تولید شده حاصل ضرب این عددها در جریان و مدت بیماران می باشد و به ترتیب مقدارها $197/403 \text{ MBq}$ و $46/395 \text{ MBq}$ مشخص شد. اکتیویته تجربی با استفاده از آشکارساز HPGe، $40.2 \mu\text{Ci}$ ($14,874 \text{ MBq}$) اندازه گیری شد.



شکل ۱۰- HPGe محلول تثبیت شده روی-۶۲ بر روی ستون.



شکل ۱۱- HPGe محلول تثبیت شده روی-۶۵.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۲

مراجع

- [1] Rowshanfarzad P., JaLiLian A., Sabet M., [Production and Quality Control of ⁶⁵Zn Radionuclide](#), *NukLeonika*, **50**: 97-103 (2005).
- [2] Van Ammel R., Pommé S., Sibbens G., [Experimental Verification of the Half-Life of ⁶⁵Zn](#), *Applied Radiation and Isotopes*, **60**: 337-339 (2004).

- [3] Sabet M., Rowshanfarzad P., JaLiLian A., Ensaf M., Rajamand A., [Production and Quality Control of \$^{66}\text{Ga}\$ Radionuclide](#), *NukLeonika*, **51**: 147-154 (2006).
- [4] W. L. Dunn, ShuLtis J.K., ["ExpLoring Monte CarLo Methods"](#), ELsevier, (2011).
- [5] ZiegLer J F., Biersack J. P., Littmark U., ["The Code of SRIM {The Stopping and Range of Ions in Matter}"](#), IBM Research, New York, USA, (2006).
- [6] Andrade E., Canto C.E., Rocha M.F., [Calibration of an Analyzing Magnet Using the \$^{12}\text{C}\(d, p\)^{13}\text{C}\$ Nuclear Reaction with a Thick Carbon Target](#), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **406**: 38-41 (2017).
- [7] Sadeghi M., Kakavand T., Mokhtari L., GhoLamzadeh Z., [Determination of \$^{68}\text{Ga}\$ Production Parameters by Different Reactions Using ALICE and TALYS Codes](#). *Pramana: Journal of Physics*, **72**:335-341 (2009).
- [8] Ghandi M., Feizi Sh., Ziaie F., Fazaeli Y., Notash B., [Synthesis, Characterization and *In Vivo* Evaluation of \$^{62}\text{Zn}\$ -benzo- \$\delta\$ -suLtam CompLex as a PossibLe Pet Imaging Agen](#), *Annals of Nuclear Medicine*, **28**: 880-890 (2014).
- [9] GhoLipour N., JaLiLian A.R., Fazaeli Y., Sabzevari O., Moradkhani S., BoLourinovin F., KhaLaj A., [Development Of \$^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}\$ -DOTA-Rituximab As A Possible Novel *In Vivo* PET Generator for Anti-CD20 Antigen Imaging](#), *Radiochimica Acta*, **102**: 1035-1045 (2014).

[۱۰] فاضلی، سید یوسف؛ تولید و کنترل کیفی ژنراتورهای رادیو دارویی روی- ^{62}Zn /مس- ^{62}Cu (ParsCuGen) در ایران،

نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۳۶: ۱۶۹ تا ۱۷۴ (۱۳۹۶)