



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱۱، شماره ۴، زمستان (ویژه نامه) ۱۴۰۱، صفحه ۳۳-۳۶

ششمین کنفرانس سنجش و ایمنی پرتوهای یون ساز و غیریون ساز (مردادماه ۱۴۰۰)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۳، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

## محاسبه مونت کارلو فعال سازی نوترونی چشمه نوترون Am-Be دانشگاه شهید باهنر کرمان

آرزو ریاحی و محمدرضا رضایی رایینی نژاد\*

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.  
\*کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۷۶۳۱۸۱۸۳۵۶.  
پست الکترونیکی: mr.rezaie@kgut.ac.ir

### چکیده

معمولاً تولید رادیوایزوتوپ‌ها توسط راکتورها و شتاب‌دهنده‌های سیکلوترون و خطی انجام می‌گرفت. در این تحقیق سعی می‌شود از روش مونت کارلو با استفاده از کد MCNP برای شبیه‌سازی فعال‌سازی نوترونی توسط چشمه نوترون کرمان و بررسی بهره رادیوایزوتوپ‌های تولیدی استفاده شود. بدین منظور از دستگاه پراش اشعه X برای تشخیص عناصر تشکیل‌دهنده این مواد استفاده می‌شود. برای فعال‌سازی نوترونی به یک منبع برای بمباران کردن نمونه نیاز است که از این طریق رادیوایزوتوپ عناصر تولید می‌شود. هر رادیوایزوتوپ طیف مشخصی را منتشر می‌کند که با استفاده از آن می‌توان غلظت عناصر موجود در آن را تعیین کرد. نتیجه بررسی با استفاده از کد MCNP نشان می‌دهد که امکان تولید چشمه رادیواکتیو توسط چشمه نوترون کرمان وجود دارد. رادیوایزوتوپ  $^{137}\text{Cs}$  بیش‌ترین بهره تولید را بین مواد تحت تابش چشمه نوترون کرمان دارد. بنابراین از چشمه نوترون کرمان می‌توان برای تولید رادیوایزوتوپ‌های مناسب آزمایشگاه‌های هسته‌ای استفاده کرد.

کلیدواژگان: نوترون، فعال‌سازی نوترونی، کد MCNP، چشمه نوترون در کرمان، رادیوایزوتوپ.

### ۱. مقدمه

ید رادیواکتیو در مطالعه فیزیولوژی تیروئید استفاده کردند و تحقیقات لارنس و همکاران (۱۹۴۰)، که سرطان خون را با فسفر رادیواکتیو بررسی کردند [۴-۲]. در سال ۱۹۴۱ اولین سیکلوترون پزشکی در دانشگاه واشنگتن در سنت لوئیس نصب شد، جایی که ایزوتوپ‌های رادیواکتیو فسفر، آهن، آرسنیک و گوگرد تولید می‌شود. با بهره‌برداری از فرآیند شکافت در طول جنگ جهانی دوم، بیشتر رادیوایزوتوپ‌های مورد علاقه پزشکی شروع به تولید در راکتورهای هسته‌ای کردند. پس از جنگ، استفاده گسترده از مواد رادیواکتیو در پزشکی منجر به تأسیس رشته جدیدی از آن‌چه در آن زمان

تاکنون چشمه‌های مورد نیاز آزمایشگاه‌ها با اکتیویته پایین توسط راکتورها و شتاب‌دهنده‌ها تولید می‌شدند. یک دهه قبل از اولین راکتور هسته‌ای، تولید رادیوایزوتوپ‌ها توسط شتاب‌دهنده‌های سیکلوترون و خطی انجام می‌گرفت [۱]. در شتاب‌دهنده خطی وقتی ذره‌ای با سرعت مناسب با هسته اتم هدف برخورد می‌کند، واکنشی رخ می‌دهد و یک محصول رادیواکتیو تشکیل می‌شود. از نکات مهم در استفاده از این رادیوتراکهای تولید شده مصنوعی می‌توان به آزمایشات همپلتون و استون (۱۹۳۷) اشاره کرد که به‌طور بالینی از سدیم رادیواکتیو استفاده می‌کردند. هرترز و همکاران (۱۹۳۸)، که از

مورد یک هسته سنگین، نتیجه می‌تواند اسپالیشن یا شکافت باشد. بسته به نوع رادیواکتیو خاص، نیمه عمر می‌تواند از کسری از ثانیه تا چندین سال باشد [۶،۵]. انواع مختلفی از منابع نوترونی وجود دارد (راکتورها، شتاب دهنده‌ها و ساطع‌کننده‌های نوترون رادیوایزوتوپی) که می‌توان از آنها برای فعال‌سازی نوترونی استفاده کرد. پراکندگی اشعه ایکس منسجم یا اشعه ایکس ریلی، که منجر به انحراف اشعه X هنگام تجزیه و تحلیل نمونه‌های بلوری می‌شود و برای مطالعه ساختار مولکولی ماده استفاده می‌شود. تحت تأثیر میدان الکتریکی تصادفی، الکترون‌ها با انرژی فوتون اشعه X تصادفی نوسان می‌کنند و تابشی در جهت دیگری منتشر می‌کنند. تشعشع ساطع شده توسط الکترون‌های مختلف در یک اتم می‌تواند برای ایجاد یک الگوی پراکندگی اشعه X معمولی تداخل ایجاد کند [۷]. کد MCNP یک کد نانوذره مونت کارلو برای اهداف عمومی است که می‌تواند برای انتقال نوترون، فوتون، الکترون یا جفت شدن نوترون/فوتون/الکترون استفاده شود. انواع کاربرد آن شامل حفاظت در برابر اشعه و دزیمتری، رادیوگرافی، فیزیک پزشکی، ایمنی حساسیت هسته‌ای، طراحی و تجزیه و تحلیل ردیاب، طراحی هدف شتاب‌دهنده، طراحی راکتور شکافت و همجوشی است و امکان ردیابی ۳۲ ذره هسته‌ای و اتمی را دارد [۹،۸]. در ادامه چگونگی انجام کار و نتایج شبیه‌سازی توضیح داده می‌شود.

## ۲. روش انجام تحقیق

برای انجام فعال‌سازی نوترونی ناشی از چشمه نوترون کرمان ابتدا بایستی مشخصات سلولی که ماده در داخل آن قرار می‌گیرد در کارت سلول کد MCNP تعریف گردد. هندسه سلول به صورت یک استوانه با ارتفاع دو سانتی‌متر و شعاع یک سانتی‌متری در کارت سطوح تعریف می‌گردد. مواد با چگالی مختلف در کارت سلول و طیف انرژی چشمه نوترون کرمان در قسمت کارت داده تعریف می‌گردد. (جدول ۱)

پزشکی اتمی نامیده می‌شود، شد که بعداً پزشکی هسته‌ای نامیده شد. اگرچه اولین رادیونوکلیدهای تولید شده مصنوعی از سیکلوترون‌های لارنس بود، اما ۳۰ سال پیش از شروع رادیونوکلیدهای تولید شده توسط شتاب دهنده، نقشی اساسی در تولید مواد رادیواکتیو مهم پزشکی داشت [۱]. در این مقاله سعی می‌شود امکان تولید رادیونوکلیدهای مختلف با چشمه نوترون موجود در کشور بررسی شود. بدین منظور مواد مختلفی با ابعاد متناسب با محل قرارگیری مواد داخل چشمه نوترون تهیه شده است. سپس عناصر تشکیل‌دهنده این مواد توسط دستگاه XRD<sup>۱</sup> شناسایی شده و با استفاده از کد شبیه‌سازی MCNP<sup>۲</sup> فعال‌سازی نوترونی این عناصر و بهره رادیوایزوتوپ‌های تولیدی توسط هرکدام بررسی می‌شود. نوترون‌ها ذرات الکتریکی خنثی با جرم تقریباً برابر با یک اتم هیدروژن هستند. نوترون‌های پرانرژی از یک منبع شیمیایی (مانند <sup>۲۴۱</sup>AmBe<sup>۳</sup>) ساطع می‌شوند. نوترون‌ها وقتی به چیزی با جرم برابر مانند اتم هیدروژن برخورد می‌کنند، بیش‌ترین انرژی را از دست می‌دهند. چند میکروثانیه پس از آزاد شدن نوترون‌ها انرژی قابل توجهی را از دست داده و وارد حالت گرمایی می‌شوند. هنگامی که در حالت حرارتی قرار دارند، نوترون‌ها توسط هسته اتم‌های دیگر جذب می‌شوند. اتمی که نوترون را می‌گیرد تحریک می‌شود و پرتوی گاما ساطع می‌کند. وقتی یک نوترون به یک قطعه ماده برخورد می‌کند، به علت فقدان بار الکتریکی با الکترون‌های اتمی برهم‌کنش ندارد (این فقط با ذرات باردار اتفاق می‌افتد). در عوض، نوترون‌ها با هسته‌ها در تعامل هستند. این فعل و انفعالات نوترون و هسته می‌تواند منجر به انتقال انرژی از نوترون به هسته یا سبب تجزیه ناشی از نوترون شود. گرفتن نوترون توسط یک هسته اغلب منجر به تشکیل یک ایزوتوپ رادیواکتیو می‌شود. (در

<sup>۱</sup> X-ray diffraction device

<sup>۲</sup> Monte Carlo N – Particle

<sup>۳</sup> Americium- Beryllium

جدول (۲): عناصر تولید شده در اثر فرآیند فعال‌سازی هدف‌های استیل ضدزنگ، نمک و سکه ۲۰۰ تومانی توسط چشمه نوترون کرمان [۱۱-۱۷].

رادیوایزوتوپ	بهره تولید	ماده تحت تابش	نیمه عمر
$^{35}\text{S}$	۰٪/۰۰۶	نمک	۸۷/۳۲ روز
$^{36}\text{Cl}$	٪/۰۱۴	نمک	۳۰۰ هزار سال
$^{37}\text{Ar}$	٪/۰۰۰۰۰۱	نمک	۳۵ روز
$^{59}\text{Fe}$	۰٪/۰۰۰۸	استیل ضدزنگ	۲/۷ سال
$^{58}\text{Co}$	۰٪/۰۰۶۳	استیل ضدزنگ	۷۰ روز
$^{59}\text{Ni}$	۰٪/۰۰۱۲	استیل ضدزنگ	۷۶ هزار سال
$^{65}\text{Zn}$	٪/۰۰۳۷	سکه ۲۰۰ تومانی	۲۴۴ روز

با توجه به بهره تولید عناصر رادیواکتیو تولید شده توسط چشمه نوترون کرمان می‌توان اهمیت تولید این عناصر را بررسی کرد.  $^{36}\text{Cl}$  یک ردیاب ایده‌آل در هیدرولوژی است و نمونه‌برداری از آن بسیار راحت است و هم‌چنین دارای نیمه عمر طولانی است که در نتیجه می‌توان از آن برای سن‌یابی آب‌های زیرزمینی بسیار قدیمی استفاده کرد [۱۱].  $^{59}\text{Ni}$  رادیوایزوتوپی با داشتن نیمه عمر طولانی، یک رادیوایزوتوپ مهم در مدیریت پسماند هسته‌ای است [۱۲]. توصیف و اندازه‌گیری میزان اشعه ایکس از منابع اختریفیزیکی نیاز به آشکارسازهای اشعه ایکس کالیبره شده دارد. به‌منظور کالیبره کردن ردیاب‌های اشعه ایکس برای استفاده از چنین برنامه‌ای، به یک منبع رادیواکتیو خارجی همانند  $^{59}\text{Fe}$  که یک ساطع‌کننده اشعه ایکس با نیمه عمر ۲/۷۵ سال است، نیاز داریم. علاوه‌براین اشعه ایکس ساطع شده کم‌انرژی بوده و از نظر حفاظت در برابر اشعه مناسب است [۱۳]. توالی‌یابی DNA روشی برای تشخیص جهش‌ها است. می‌توان از روش تعیین توالی رادیوایزوتوپی با استفاده از  $^{35}\text{S}$  به‌عنوان یک گزینه مقرون‌به‌صرفه استفاده کرد. از طرفی این رادیونوکلید در گروه مسمومیت رادیویی در حد متوسط قرار می‌گیرد [۱۴]. نفوذ و توزیع رادیوایزوتوپ‌ها و هم‌چنین کاهش آن از طریق بازگشت

جدول (۱): مواد تحت تابش چشمه نوترون کرمان.

ماده	نمک	استیل ضدزنگ	سکه ۲۰۰ تومانی
چگالی $\text{g/cm}^3$	۲/۱۷	۷/۸۷	۸/۵۸

## ۱.۲. توزیع انرژی چشمه نوترون کرمان

انرژی چشمه در محدوده ۲/۵ کیلوالکترون‌ولت تا ۱۱ مگاالکترون‌ولت است. توزیع مکانی چشمه به‌صورت همسان‌گرد تا شعاع یک سانتی‌متری است تا ماده را به‌طور کامل تحت تابش قرار دهد.



شکل (۱): محفظه چشمه نوترونی Am-Be در کرمان.

برای تعیین درصد عناصر از دستگاه XRD استفاده می‌کنیم و طبق اطلاعات فوق کد اجرا شده است. برای محاسبه اسپالیشن و فعال‌سازی نوترونی از تالی F8 استفاده می‌شود. برهم‌کنش ذرات پرنرژی با هسته‌های هدف باعث تولید بسیاری از هسته‌های دیگر می‌شود. هسته‌های باقیمانده تولیدشده را می‌توان در صورت استفاده از تالی F8 ثبت کرد [۱۰].

## ۳. نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی رادیوایزوتوپ‌های تولید شده از مواد جدول ۱ که تحت تابش چشمه نوترون کرمان قرار گرفته‌اند در جدول ۲ آورده شده است. هرکدام از این رادیوایزوتوپ‌ها با یک بهره خاص تولید می‌شوند که از طریق این بهره می‌توان جرم تولیدی رادیوایزوتوپ را نسبت به جرم مواد تحت تابش تعیین کرد.

در این تحقیق سعی شد فعال‌سازی نوترونی توسط چشمه نوترون کرمان بررسی شود. نتیجه بررسی با استفاده از کد MCNP نشان می‌دهد که امکان تولید چشمه رادیواکتیو توسط چشمه نوترون کرمان وجود دارد. رادیوایزوتوپ  $^{36}\text{Cl}$  بیش‌ترین بهره تولید را بین مواد تحت تابش چشمه نوترون کرمان دارد. بنابراین از چشمه نوترون کرمان می‌توان برای تولید رادیوایزوتوپ‌های مناسب آزمایشگاه‌های هسته‌ای استفاده کرد.

به خاک حائز اهمیت است؛ مانند جمع شدن رادیونوکلید  $^{60}\text{Co}$  در ریشه گیاهان که باعث افزایش مویرگ گیاه می‌شود و تکثیر به ساقه‌ها و قسمت‌های مختلف گیاه را غیرممکن می‌سازد [۱۸]. تولید  $^{65}\text{Zn}$  به دلیل داشتن نیمه عمر و خواص تابش مناسب در پزشکی، زیست‌پزشکی، کشاورزی و صنعتی حائز اهمیت است [۱۹]. از  $^{37}\text{Ar}$  به‌عنوان رادیوردیاب برای انفجار هسته‌ای زیرزمینی استفاده می‌شود [۲۰].

#### ۴. مراجع

1. S. J. Adelstein, F. J. Manning (eds.). *Isotopes for Medicine and the Life Sciences*. National Academy of Sciences, Washington, DC (United States). Board on Engineering Education. Funding organisation: USDOE, Washington, DC (United States), 1995.
2. J. G. Hamilton, R. S. Stone. Excretion of radio-sodium following intravenous administration to man. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 35 (1937) 595-598.
3. S. Hertz, A. Roberts, R. D. Evans. Radioactive iodine as an indicator in the study of thyroid physiology. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 38 (1938) 617-619.
4. J. H. Lawrence, L. W. Tuttle, K. C. Scott, C. L. Conner. Studies on neoplasms with aid of radioactive phosphorus. I. total phosphorus metabolism of normal and leukemic mice. *J. Clin. Invest.* 19 (2) (1940) 267-271.
5. Neutrons - an overview. ScienceDirect Topics.
6. M. D. Glascock. An overview of neutron activation analysis. Research Reactor, University of Missouri, Columbia, MO, U.S.A. (2006) p. 9.
7. F. Marticke, G. Montémont, C. Paulus, O. Michel, J. I. Mars, L. Verger. Simulation study of an X-ray diffraction system for breast tumordetection. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* 867 (2017) 20-31.
8. Los Alamos National Laboratory: MCNP Home Page. <https://mcnp.lanl.gov/>.
9. J. Zhang, Y. Cai, N. Chen. Development of research on code MCNP. *Nucl. Phys. Rev.* 25 (1) (2008) 48-51.
10. J. S. Hendricks, G. W. McKinney, L. S. Waters, T. L. Roberts, H. W. Egdorf, J. P. Finch, H. R. Trelleue, E. J. Pitche, D. R. Mayo, M. T. Swinhoe, S. J. Tobin, J. W. Durkee. MCNPX EXTENSIONS, VERSION 2.5.0. Technical Report LA-UR-05-2675, Los Alamos National Lab. (2005) p. 65.
11. Y. Tosaki, N. Tase, G. Massmann, Y. Nagashima, R. Seki, T. Takahashi, K. Sasa, K. Sueki, T. Matsuhiro, T. Miura, K. Bessho, H. Matsumura, M. He. Application of  $^{36}\text{Cl}$  as a dating tool for modern groundwater. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.* 259 (1) (2007) 479-485.
12. P. Persson. Development of the Lund AMS Facility for the Detection of  $^{59}\text{Ni}$  – with Applications in the Nuclear Industry. Thesis/doccomp, Lund University Pub., Sweden, 2002.
13. M. Kumar, S. S. Gandhi, J. Udhayakumar, A. K. Satpati, R. Shukla, A. K. Tyagi, A. Dash. An electrochemical technique to prepare  $^{55}\text{Fe}$  source for the calibration of the X-ray detectors. *Radiochim. Acta* 101 (3) (2013) 185-194.
14. Internationale Atomenergie Organisation. *Organization of a radioisotope Based Molecular Biology Laboratory*. Vienna, Austria, 2006.
15. F. DiFilippo. Estimating  $^{56}\text{Co}$  and  $^{58}\text{Co}$  contaminants in a  $^{57}\text{Co}$  flood source by PET/CT. *J. Nucl. Med.* 55 (2014) 2150.
16. C. E. Aalseth, A. R. Day, D. A. Haas, E. W. Hoppe, B. J. Hyronimus, M. E. Keillor, E. K. Mace, J. L. Orrell, A. Seifert, V. T. Woods. Measurement of  $^{37}\text{Ar}$  to support technology for On-Site Inspection under the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. Sect. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 652 (1) (2011) 58-61.
17. R. Van Ammel, S. Pommé, G. Sibbens. Experimental verification of the half-life of  $^{65}\text{Zn}$ . *Appl. Radiat. Isot.* 60 (2) (2004) 337-339.
18. B. O. Homidov, M. Rajabova, J. A. Salomov. Investigation of vertical migration of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ , and  $^{55}\text{Fe}$  in the soil-water-plants system. International Conference on the Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation 303 (2003) 193-195.
19. P. Rowshanfarzad, A. Jalilian, M. Sabet, Production and quality control of  $^{65}\text{Zn}$  radioisotope. *Nukleonika* 50 (2005) 97-103.
20. A. G. Fay, S. R. Biegalski, Contributions to the  $^{37}\text{Ar}$  background by research reactor operations. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 296 (1) (2013) 273-277.