



## بومی سازی تولید و تخلیص رادیوایزوتوپ آهن-۵۵ برای استفاده در چشمه‌های باز و بسته

پرویز اشتری\*، سید یوسف فضائلی حسینی نژاد، غلامرضا اصلانی

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران- ایران

\*Email: Pashtari@aeoi.org.ir

### مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۵/۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۶/۱۶

### چکیده

هدف این تحقیق بررسی امکان تولید آهن-۵۵ به عنوان یک چشمه گسیلنده پرتو ایکس در مصارف علمی و صنعتی می‌باشد. مزیت این روش، حذف مراحل آب‌کاری و انحلال منگنز فلزی در تولید هدف و عدم نیاز به مراحل پیچیده خالص‌سازی شیمیایی و رادیوشیمیایی است. محاسبات مربوط به انرژی پروتون مورد استفاده برای بمباران هدف با روش ALICE/ASH انجام شد. نمونه‌ها برای تعیین مقدار آهن-۵۵ تولیدی با روش طیف‌سنجی پرتو ایکس و گاما مورد ارزیابی قرار گرفتند. منگنز-۵۴ به عنوان ناخالصی عمده در تولید آهن-۵۵ تولید می‌شود. جداسازی و تخلیص آهن-۵۵ از منگنز با تلفیق روش رسوب‌گیری و استخراج مایع-مایع انجام شد. مقدار منگنز و نیز مقدار تبدیل شده به منگنز-۵۴ قابل توجه است اما نتایج نشان می‌دهد، جداسازی منگنز-۵۴ از آهن-۵۵ به طور کامل انجام شده است. هم‌چنین نتایج نشان داد، تولید رادیوایزوتوپ آهن-۵۵ و خالص‌سازی آن برای مصارف داخل ایران با روش ارایه شده امکان‌پذیر می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** چشمه باز و بسته، تولید و تخلیص رادیوایزوتوپ آهن-۵۵، ALICE/ASH

## Localization of the production and purification of Fe-55-radioisotope for the use in open and closed sources

P. Ashtari\*, Y. Fazaeli, Gh. Aslani

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 1339-14155, Tehran - Iran

### Technical Paper

Received 28.7.2020, Accepted 6.9.2020

### Abstract

The purpose of this study is to investigate the possibility of producing iron-55 as an X-ray source for the scientific and industrial applications. There are some advantages for this method: the elimination of the manganese electro-plating, dissolving process in the target production step, and the need for the complex stages of chemical and radio-chemical purification. The calculations of proton energy for the target bombardment was performed using the ALICE/ASH method. The samples were evaluated to produce iron-55 determination by X-ray and gamma spectroscopy. Manganese-54 was produced as a major impurity in the production of iron-55. The Separation and purification phase of iron-55 from manganese was carried out by combining of precipitation and liquid-liquid extraction. The amount of manganese and manganese-54 was significant, but the results showed that the separation of manganese from iron-55 has been performed efficiently. Also, results agreed that the production and purification of iron-55 radioisotope for territorial use in Iran is possible with the proposed method.

**Keywords:** Open and closed sources, Production and purification of Fe-55-radioisotope, ALICE/ASH



## ۱. مقدمه

رادیوایزوتوپ‌های مورد استفاده به‌عنوان چشمه‌های استاندارد انرژی برای سنج‌بندی دستگاه‌ها اغلب دارای نیمه‌عمر بلند بوده و بیش‌تر توسط رآکتورهای هسته‌ای و برخی نیز توسط سیکلوترون‌ها تولید می‌شوند. در تولید رادیوایزوتوپ‌ها یا مواد رادیواکتیو مصنوعی با استفاده از شتاب‌دهنده سیکلوترون، معمولاً از ذرات باردار پروتون و دوترون برای بمباران هدف مورد نظر استفاده می‌شود. این ذرات باردار در سیکلوترون شتاب داده شده و به انرژی مؤثر برای ایجاد اندرکنش مورد نظر در هسته هدف می‌رسند، سپس ماده هدف با آن پرتو دهی شده و رادیوایزوتوپ دلخواه تولید می‌شود. آهن به‌طور طبیعی شامل چهار ایزوتوپ است: آهن-۵۴ (۸۴.۵٪)، آهن-۵۶ (۰.۲۵۴٪)، آهن-۵۷ (۲.۱۱۹٪) و آهن-۵۸ (۰.۲۸۲٪). هم‌چنین سه ایزوتوپ آن، آهن-۵۵، آهن-۵۹ و آهن-۶۰ که به‌صورت مصنوعی سنتز می‌شوند، دارای کاربردهای مختلفی می‌باشند. علاوه بر این‌ها، ۲۱ ایزوتوپ دیگر از آهن شناسایی شده‌اند که اغلب رادیواکتیو بوده و نیمه‌عمر بسیار کمی دارند [۱-۵]. آهن-۵۵ یکی از رادیوایزوتوپ‌هایی است که به‌طور طبیعی وجود ندارد و توسط بمباران هدف منگنزی با ذرات باردار پروتون، در سیکلوترون طی اندرکنش  $^{55}\text{Fe}(p, n)^{55}\text{Fe}$  و یا با استفاده از بمباران نوترونی ایزوتوپ آهن-۵۴ یا آهن-۵۶ در رآکتور تولید می‌شود. در روش تولید رادیوایزوتوپ‌ها توسط رآکتور از نوترون حرارتی، با شار بالای حاصل از شکافت هسته‌ای برای بمباران هدف و انجام واکنش جذب گاما از  $^{55}\text{Fe}(n, \gamma)^{55}\text{Fe}$  استفاده می‌شود.

واکنش‌های هسته‌ای دیگری از قبیل  $(n, \alpha)$ ،  $(n, p)$ ،  $(n, 2n)$  نیز می‌تواند با استفاده از نوترون‌های سریع با انرژی بالا طی اندرکنش  $^{55}\text{Fe}(n, 2n)^{56}\text{Fe}$  انجام شود.

روش تولید آهن-۵۵ با رآکتور از دو جهت مقبولیت ندارد. ۱) جداسازی ایزوتوپی آهن-۵۵ از آهن-۵۴ یا آهن-۵۶ از لحاظ فیزیکی بسیار دشوار بوده و از لحاظ شیمیایی امکان‌پذیر نمی‌باشد. ۲) هزینه ایزوتوپ غنی شده آهن-۵۴ یا آهن-۵۶ به‌عنوان پیش‌ماده برای تهیه این ایزوتوپ بسیار بالا است که امکان بازیابی آن نیز متصور نمی‌باشد.

بنابراین، تهیه این رادیوایزوتوپ در ایران با استفاده از سیکلوترون بهترین گزینه بوده و در اولویت است، زیرا منگنز به صورت خالص و طبیعی دارای تنها یک ایزوتوپ (منگنز-۵۵) است. هم‌چنین، جداسازی محصول آهن از منگنز به راحتی و با روش‌های شیمیایی موجود امکان‌پذیر می‌باشد. بنابراین با توجه به امکانات موجود و امکان وجود بمباران پروتونی توسط

سیکلوترون، روش اول در این پژوهش انتخاب و مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

در پزشکی، ترکیبات نشان‌دار با این رادیوایزوتوپ برای جذب آهن در بدن و مطالعه متابولیسم مورد استفاده قرار می‌گیرند. از کاربردهای دیگر آن می‌توان به بررسی محلول‌های آب‌کاری و تعیین میزان گوگرد در هوا اشاره کرد. هم‌چنین، چشمه آهن-۵۵ گسیلنده پرتو ایکس با انرژی حدود  $6\text{ keV}$  است و کاربردهای زیادی به‌عنوان چشمه‌های سنج‌بندی دستگاه‌های بسیار حساس دارند [۲]. با توجه به نقش حساس آهن در بدن و چرخه سوخت و ساز مواد غذایی ضرورت بررسی نحوه انتقال خون و نیز فراورده‌های آن، هم‌چنین نقش مهم آهن در فن‌آوری و مهندسی، تحقیق برای تولید این رادیوایزوتوپ ضروری می‌نماید [۶].

از مهم‌ترین روش‌های جداسازی و تخلیص شیمیایی آهن از منگنز و سایر عناصر می‌توان به روش‌های رسوب‌گیری و هم‌رسوبی، استخراج مایع-مایع و استفاده از مبادله‌کننده‌های یونی اشاره کرد [۷]. روش جداسازی و خالص‌سازی مورد استفاده در این تحقیق روش ایکروم (Eichrom) است. این روش تلفیقی از رسوب‌گیری اولیه آهن و در ادامه آن استخراج مایع-مایع است. به اختصار، پس از انحلال نمونه (قرص منگنز هدف) حاوی آهن-۵۵، مقدار  $5\text{ mg}$  حامل آهن طبیعی به صورت نمک سولفات به آن افزوده می‌شود. سپس با افزودن اکسید کننده، آهن (II) به صورت آهن (III) تبدیل می‌شود. در ادامه با افزودن قلیا، عملیات رسوب‌گیری شیمیایی کامل می‌شود. رسوبات در اسید کلریدریک حل شده و با دی‌ایزوپروپیل اتر اشباع از اسید استخراج و استخراج برگشتی آن با استفاده از آب بدون یون انجام می‌شود.

جزئیات روش تهیه هدف منگنز به‌صورت قرص [۸] در غلاف مسی، جزئیات شاتل مورد استفاده برای بمباران قرص تهیه شده، محاسبه انرژی بهینه مورد نیاز برای بمباران، جزئیات بمباران هدف تهیه شده، روش باز کردن قرص و تهیه محلول، افزودن حامل آهن، جزئیات مراحل جداسازی شیمیایی ناخالصی‌ها و محصول آهن-۵۵، روش اندازه‌گیری محصول و ناخالصی‌های شیمیایی و رادیوشیمیایی در محلول‌ها و محصول به تفصیل در ادامه بیان شده است.

## ۲. بخش تجربی

## ۲.۱ وسایل و مواد

اکسید منگنز، آب اکسیژنه، آمونیاک، اسید کلریدریک، دی‌اتیل‌اتر، سولفات آهن (III)، پودر منگنز از شرکت مرک (Merck) تهیه شد. سیکلوترون  $30\text{ MeV}$  JBA، گلاوباکس

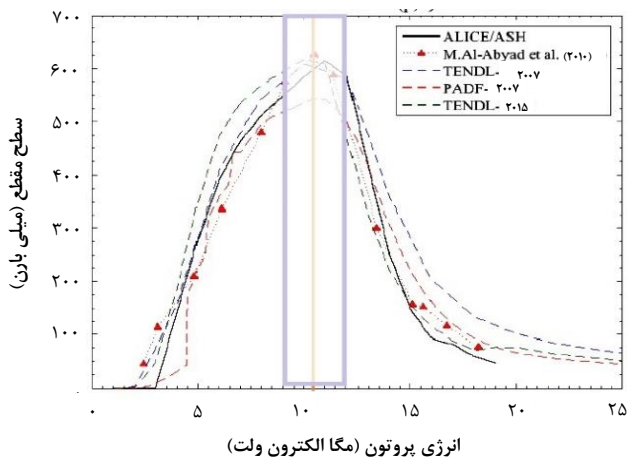


در نهايت درپوش (کلاه) بر روی قرص قرار داده شد و با استفاده از دستگاه مخصوص پرس ۱۰ تنی و خلأ شد. هدف قرصی با باریکه پروتونی با انرژی ورودی به هدف ۱۱ MeV با جریان ۴۰ میکروآمپر و به مدت زمان ۴ ساعت بمباران شد. عملیات باز کردن قرص و سایر کارهای مشترک برای کار با هدف‌های قرصی در مرجع [۸] به تفصیل آمده است.

### ۳.۲ شرح نتایج

برای تولید آهن-۵۵ از هدف پودر منگنز استفاده شد. انرژی بهینه پروتون بمباران طبق محاسبات شبیه‌سازی با کدهای محاسباتی در محدوده ۷-۱۳ MeV (در محدوده بنفش) و انرژی متوسط ۱۱ MeV (خط نارنجی) می‌باشد. سطح مقطع برهم‌کنش ایزوتوپ‌های حاصل از این آزمایش در شکل ۲ آمده است.

پروتون برای رسیدن به هدف منگنزی، بایستی از لایه‌های پنجره آلومینیمی (۰/۶ mm)، آب خنک‌کننده (۲/۷ mm) و درپوش مسی (۰/۳ mm) عبور نماید. مجموع افت انرژی برای این ۳ لایه در حدود ۱۵/۵ MeV است که با نرم‌افزار SRIM محاسبه شد. شکل ۱ شاتل نگه‌دارنده هدف قرصی برای بمباران در سیکلوترون و اجزاء مربوطه را نشان می‌دهد. نتایج محاسبات مربوطه با استفاده از نرم‌افزار SRIM در شکل ۳ آمده است.



شکل ۲. سطح مقطع اندرکنش تولید آهن-۵۵ با استفاده از منگنز با کد محاسباتی.

با حفاظ سربی، طیف‌سنج گاما با آشکارساز ژرمانیم فوق خالص مجهز به تحلیل‌گر چند کاناله کانبرا (Canberra)، دستگاه تهیه آب مقطر فوق خالص سرالپر (Seralpur)، سنج‌بند دز، دکانتور، ویال شیشه‌ای، نمونه‌بردار اپندرف و غلاف مسی در مراحل تولید و کنترل کیفی این تحقیق استفاده شد. محاسبات مربوط به تعیین انرژی مورد نظر برای انجام اندرکنش مورد نظر و نیز برد پرتابه با استفاده از نرم‌افزارهای ALICE/ASH و SRIM انجام شد [۹، ۱۰]. به منظور طیف‌سنجی پرتو X در محدوده کم‌انرژی (۰-۶۰ keV) از آشکارساز SDD استفاده شد (FWHM@ ۵/۹ keV تقریباً برابر با ۲۳۰ eV).

### ۳.۲ تولید آهن-۵۵

ابتدا انرژی لازم برای بمباران هدف منگنزی با استفاده از محاسبات هسته‌ای و کد محاسباتی ALICE/ASH، و انرژی بهینه پروتون‌های مورد استفاده برای بمباران هدف منگنز و انجام اندرکنش مطلوب محاسبه شد. هدف منگنز، قرصی شکل و دارای پوشش است، بنابراین پروتون‌ها از لایه‌های مختلفی از قبیل آلومینیم، آب و مس عبور می‌کنند که موجب افت انرژی پروتون می‌شود و این افت انرژی باید در انرژی اولیه پروتون لحاظ شود. بعد از تأیید تولید آهن-۵۵ و حصول نتایج اولیه، هدف اصلی با همان مشخصات تهیه شده و به مدت زمان طولانی‌تری بمباران شد. پس از انجام جداسازی و تخلیص نمونه‌ها، سنجش پرتو ایکس در واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شد. نتایج حاصل تولید و تخلیص آهن-۵۵ را نشان دادند. از آنجایی که ناخالصی منگنز-۵۴ با نیمه‌عمر طولانی نیز تولید می‌شود، با ردیابی و حذف قله منگنز-۵۴ در مراحل جداسازی، جداسازی کامل منگنز از آهن قابل ردیابی است.

برای تهیه هدف قرصی، با استفاده از دستگاه مخصوص قرص‌سازی، قرص منگنز از پودر مربوطه تهیه شد. شکل ۱ نمونه‌ای از قرص تهیه شده به همراه غلاف مسی مربوطه جهت پرس و شاتل مخصوص بمباران را نشان می‌دهد.

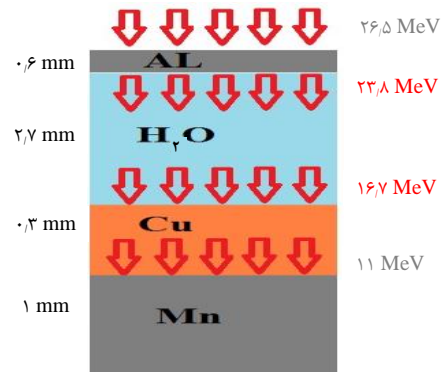


شکل ۱. نمونه قرص هدف تهیه شده به همراه شاتل.



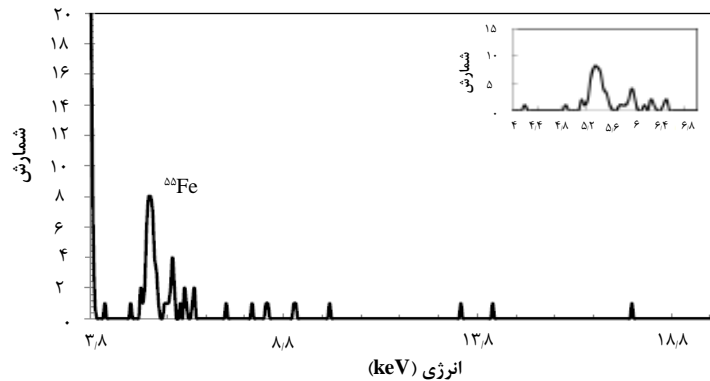
پس از تخلیه محتویات داخل ویال و سپری شدن ۳ روز برای واپاشی و کاهش پرتوزایی عناصر مزاحم تولید شده با نیمه عمر کوتاه، نمونه‌ها با استفاده از طیف سنجی گاما و آشکارساز ژرمانیم فوق خالص و طیف‌سنجی اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی نشان داد که منگنز-۵۴ نیز تولید شده است. هم‌چنین مقداری ناخالصی کبالت-۵۷ از منبع ناشناخته (آلودگی احتمالی هات سل‌ها و آشکارساز دستگاه) و روی-۶۵ از غلاف مسی در نمونه وجود دارد. اندازه‌گیری آهن-۵۵ با طیف‌سنجی گاما به دلیل شدت کم گامای کم‌انرژی، در حضور این رادیوایزوتوپ‌ها در نمونه امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین عملیات جداسازی شیمیایی و رادیوشیمیایی انجام شد و در نهایت نمونه برای اندازه‌گیری آهن-۵۵ با طیف‌سنجی اشعه ایکس و طیف‌سنجی گاما مورد سنجش قرار گرفت. طیف اشعه ایکس و طیف گامای نمونه آهن-۵۵ در شکل‌های ۴ و ۵ آمده است. در شکل ۶ پیگیری مراحل جداسازی ناخالصی‌های غلاف فلزی و هدف (منگنز) با استفاده از طیف‌سنجی گاما نشان داده شده است.

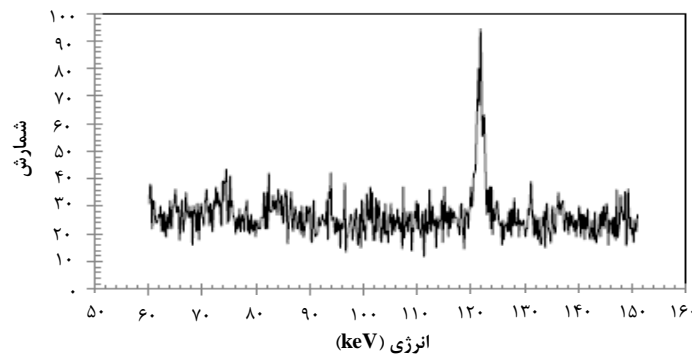


شکل ۳. نتایج کد محاسباتی SRIM برای کاهش انرژی پروتون در شاتل تا رسیدن به هدف.

افت انرژی پروتون حین عبور از محیط‌های مختلف (۳ لایه) تا رسیدن به هدف حدود  $15.5 \text{ MeV}$  می‌باشد. با لحاظ کردن این افت‌های انرژی، انرژی بهینه  $26.5 \text{ MeV}$  برای پروتون خروجی از سیکلوترون به دست آمد. انرژی ورودی پروتون به هدف با خط نارنجی در روی شکل ۲ نشان داده شد.



شکل ۴. نتایج طیف‌سنجی اشعه ایکس نمونه آهن-۵۵ تولید شده.

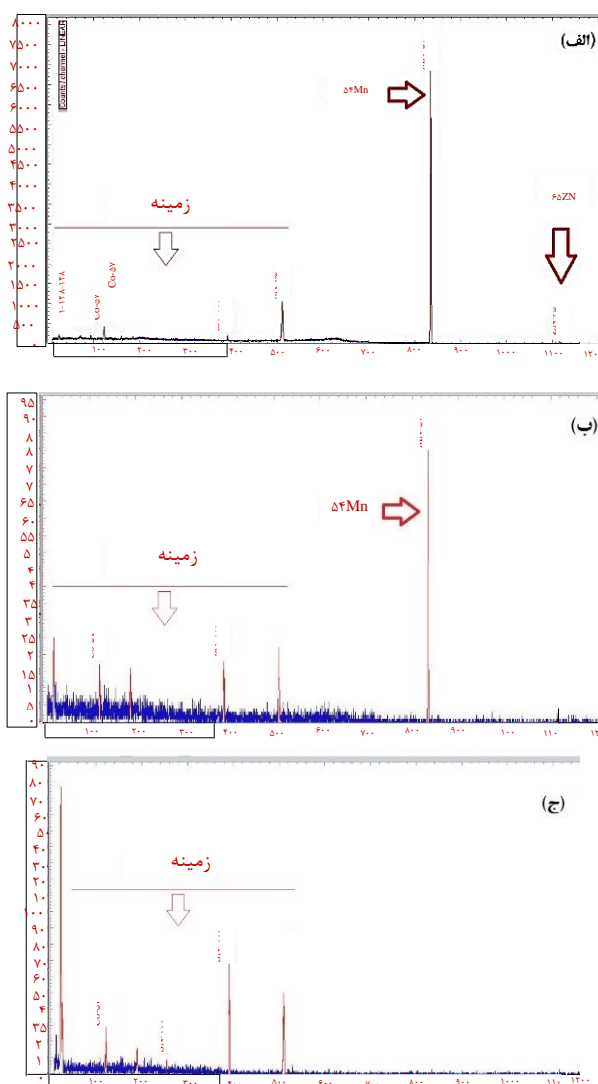


شکل ۵. نتایج طیف‌سنجی اشعه گاما نمونه آهن-۵۵ تولید شده.



عمل می‌کند و می‌توان با ردیابی آن کارآیی روش جداسازی و تخلیص مورد استفاده را تعیین نمود.

در این روش جداسازی که برای مقادیر نیمه کمی (قابل انجام در مقیاس بزرگ‌تر نیز می‌باشد) انجام شد، قابلیت و توانایی روش رسوب‌گیری با کمک روش استخراج مایع-مایع تکمیل می‌شود. برای این که جداسازی به روش چشمی و معمول قابل پیگیری باشد به آن حامل (Carrier) اضافه شد و جداسازی انجام شد. در این تحقیق حامل مورد استفاده آهن طبیعی است که به صورت نمک سولفات آهن استفاده شد. با توجه به مقدار بسیار زیاد منگنز که مقداری از آن نیز تبدیل به منگنز-۵۴ شده است، آن چه از شواهد پس از جداسازی بر می‌آید، جداسازی منگنز-۵۴ از آهن-۵۵ به طور کامل انجام شده است. با مقایسه طیف اشعه ایکس نمونه با چشمه استاندارد بازدهی تولید در حدود  $0.25 \mu\text{Ci}/\mu\text{Ah}$  است. این مقدار برابر با  $1.67 \times 10^{-5}$  گرم آهن-۵۵ تولید شده.



شکل ۶. نتایج طیف‌سنجی اشعه گاما مراحل جداسازی ناخالصی‌ها (الف) نمونه اولیه هدف پرتودهی شده، (ب) حذف  $^{65}\text{Zn}$  با جداسازی غلاف، (ج) جداسازی شیمیایی  $^{54}\text{Mn}$ .

### ۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی کارآمد برای افزایش سرعت جداسازی و به دنبال آن کاهش زمان جداسازی توسعه داده شده است تا در نهایت روشی ارابه شود که هم‌زمان مزایای تخلیص و جداسازی را دارا باشد. در این روش آهن-۵۵ با استفاده از بمباران منگنز طبیعی و تهیه قرص با روکش مسی تهیه شد. محاسبات مربوط به انرژی و زمان بمباران انجام شد. نمونه‌های تولید شده توسط بمباران پروتونی در سیکلوترون با انرژی  $26.5 \text{ MeV}$  نشان از تولید مقادیر قابل توجهی از منگنز-۵۴ و روی-۶۵ داشت. ناخالصی روی-۶۵ حاصل از غلاف مسی است که به راحتی از محصول جدا می‌شود. ناخالصی منگنز-۵۴ به عنوان یک ردیاب



## مراجع

1. L.E. Preuss, W.S. Toothacker, C.K. Bugenis, *Demonstration of X-ray diffraction by LiF using the Mn Ka X-rays resulting from 55Fe decay*, *Appl. Phys. Lett.* **9**, 159 (1966), <https://doi.org/10.1063/1.1754691>.
2. L. Marinangeli, et al, *Mars-Xrd Team (March 12–16, 2007). An European XRD/XRF Instrument for the ExoMars Mission. 38th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference (1338). League City, Texas. 1322. Bibcode (2007).*
3. D.J. Dwight, E.A. Lorch, J.E. Lovelock, *Iron-55 as an auger electron emitter: Novel source for gas chromatography detectors*, *J. Chrom. A.* **116**, 257-261 (1976). doi:10.1016/S0021-9673(00)89896-9.
4. C. Augeray, et al, *Development of a protocol to measure iron-55 in solid matrices in the environment*, *J. Environ.l Radioactivity*, **141**, 164-173 (2015).
5. Esam M.A. Hussein, *Handbook on radiation probing, gauging, imaging and analysis*. Springer. P. 26. ISBN 978-1-4020-1294-5 (2003).
6. O. Stehling, et al, *Biochemical Analyses of Human Iron–Sulfur Protein Biogenesis and of Related Diseases, Chapter 8, Methods in Enzymology*, Academic Press, **599**, 227-263 (2018).
7. T.N. Van Der Walt, F.W.E. Strelow, F.J. Haasbroek, *Separation of iron-55 from manganese cyclotron target material on a 2% cross-linked anion exchanger in hydrochloric acid*. *Inter. J. Appl. Radi. Isotopes*, **36**, 159-161 (1985).
8. Y. Fazaeli, et al, *A new approach to targetry and cyclotron production of 45Ti by proton irradiation of 45Sc*, *Nucl. Tech. & Radi. Protection J.*, **29**, 28-33 (2014).
9. A. Konobeyev, A. Korovin, P.E. Pereslavtsev, *Code ALICE/ASH for Calculation of Excitation Functions, Energy and Angular Distributions of Emitted Particles in Nuclear Reactions*, Institute of Nuclear Power Engineering, *Obninsk, Russia*, (1997).
10. J.F. Zeigler, J.P. Biersack, U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Matter, SRIM Code, USA*, (2006).

## 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

پرویز اشتری، سید یوسف فضائی حسینی نژاد، غلامرضا اصلانی (۱۴۰۰)، بومی سازی تولید و تخلیص رادیوایزوتوپ آهن-۵۵ برای استفاده در چشمه های باز و بسته، ۹۵، ۱۱۷-۱۲۲

DOI: 10.24200/nst.2021.1192

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1192.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1192.html)

