



جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار زینان با استفاده از آبشار مربعی

فاطمه منصورزاده، جابر صفدری، علی اصغر قربانپور خمسه^{*}، محمدحسن ملاح
پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران

*Email: akhamesh@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۱۸

چکیده

از میان گازهای نجیب، ایزوتوپ‌های زینان بیش‌ترین کاربرد را دارند و تاکنون استراتژی مشخصی برای جداسازی تمام ایزوتوپ‌های پایدار زینان که بیش‌ترین تعداد ایزوتوپ پایدار را داشته منتشر نشده است. در این کار پژوهشی یک کد محاسباتی با نام SQCAS تهیه شده است که با استفاده از آن استراتژی جداسازی ایزوتوپ هدف در جریان سبک و یا سنگین مشخص می‌شود. کد تهیه شده با تغییر پارامترهای آبشار مربعی و مدل‌سازی آن در هرگام به جداسازی تمام ایزوتوپ‌های زینان طبیعی متناسب با ترکیب درصد ایزوتوپ‌ها در هرگام می‌پردازد. در این مقاله با استفاده از یک آبشار مربعی در ۳۲ گام برای خوراک با مقدار مشخص (۲۰۰kg) به جداسازی تمام ایزوتوپ‌های گاز زینان طبیعی پرداخته شده است. آبشار مربعی مورد بررسی دارای ۲۰ مرحله بوده که در هر مرحله از ۱۰ ماشین سانتریفیوژ استفاده شده است. هم‌چنین مقدار فاکتور جداسازی برای اختلاف جرم واحد در این تحقیق برابر با ۱٫۲ در نظر گرفته است. با استفاده از این استراتژی، غنای ایزوتوپ‌های اول تا نهم به ترتیب از مقادیر ۰٫۰۰۰۹۳، ۰٫۰۰۰۰۹، ۰٫۰۱۹۱۷، ۰٫۰۲۶۴۴، ۰٫۰۴۰۸، ۰٫۲۱۱۸، ۰٫۲۶۸۹، ۰٫۱۰۴۴ و ۰٫۸۸۷ به ۹۹٫۷۲٪، ۹۱٫۳٪، ۹۲٫۷۹٪، ۹۲٫۶۳٪، ۸۳٫۷۷٪، ۹۰٫۱۲٪، ۹۱٫۶۴٪، ۹۵٫۶۸٪ و ۹۹٫۰۴٪ افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین بازیابی مربوط به ایزوتوپ‌های انتهایی بوده و کم‌ترین مقدار بازیابی مربوط به ایزوتوپ Xe-۱۳۵ می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ایزوتوپ‌های پایدار، جداسازی، آبشار مربعی، سانتریفیوژ گازی، زینان، بازیابی

Separation of xenon stable isotopes using square cascade

F. Mansourzadeh, J. Safdari, A.A. Ghorbanpour Khamesh*, M.H. Mallah

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box:11365-8486, Tehran-Iran

Research Article

Received 19.4.2021, Accepted 8.6.2021

Abstract

Among the noble gases, Xenon isotopes are the most widely used. So far, no specific strategy has been published for separating all Xenon stable isotopes with the highest number of stable isotopes. In this research, a computational code, SQCAS, is prepared to determine the target isotope separation strategy in light or heavy current. The prepared code investigates the separation of the natural isotopes in proportion to the feed concentration by changing the parameters of the square cascade and modeling it at each step. All stable isotopes of natural xenon are separated using a square cascade in 32 steps for the certain feed (200kg). The proposed square cascade has 20 stages. In each stage, 10 centrifuges were used. Also, the separation factor for the unit mass difference in this research equals 1.2. Using this strategy, the enrichment of nine isotopes increases from 0.9393, 0.0009, 0.01917, 0.2644, 0.408, 0.2118, 0.2689, 0.1044, and 0.087 to 98.72%, 91.3%, 92.79%, 92.63%, 83.77%, 90.12%, 91.64%, 95.68%, and 99.04%, respectively. The results show that the highest recovery is related to the end isotopes, and the lowest recovery is related to Xe-135 isotope.

Keywords: Stable isotopes, Separation, Square cascade, Gas centrifuge, Xenon, Recovery

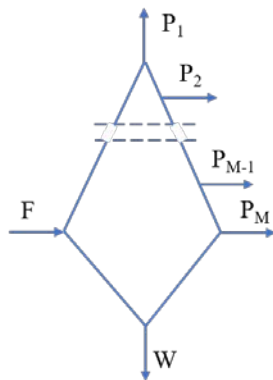


۱. مقدمه

سال ۲۰۱۳ توسط چیلستوف و همکاران [۱۲] و جداسازی ایزوتوپ‌های Ni-۵۸، Ni-۶۰، Ni-۶۱، Ni-۶۲، Ni-۶۴ توسط تیکلتسوف و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۳]. لازم به ذکر است که در تمام این موارد نیز تنها به نتایج تجربی اشاره شده و روش جداسازی در آن‌ها بیان نشده است.

به‌منظور افزایش غنای ایزوتوپ مطلوب تا مقدار مورد نظر راه‌کارهای متفاوتی وجود دارد. در بسیاری از موارد، بسته به غلظت ایزوتوپ هدف در خوراک و مقدار مورد نیاز آن در محصول و پسماند تنها استفاده از یک آبشار جواب‌گو نیست و باید با طراحی آبشارهای متفاوت و اتصال آن‌ها به یک‌دیگر عمل جداسازی تا خلوص بالا را انجام داد. بنابراین متناسب با تجربیات طراح و محاسبات انجام گرفته مربوط به جداسازی ایزوتوپ هدف، تکنیک‌های متفاوتی جهت جداسازی ایزوتوپ مورد نظر وجود دارد. خصوصاً در مورد ایزوتوپ‌های میانی، قرار دادن آن‌ها در گروه سبک و یا سنگین نتایج متفاوتی در پی خواهد داشت. در این راستا به‌منظور افزایش غنای ایزوتوپ مطلوب در یک مجموعه جداسازی، روش‌های مختلفی توسط محققان ارایه شده‌اند که در ادامه به نحوه استفاده از آبشارها اشاره می‌شود.

در رویکرد اول استفاده از آبشار مدل با یک جریان خوراک و چند جریان محصول پیشنهاد می‌شود. تغییرات غلظت ایزوتوپ‌های میانی در طول آبشار به گونه‌ای است که تا یک مقدار معینی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان در مرحله‌ای از آبشار که غلظت ایزوتوپ میانی به حداکثر مقدار خود می‌رسد یک خروجی محصول ایجاد کرده و محصولی که با حداکثر غلظت از ایزوتوپ هدف ایجاد می‌شود را از آبشار خارج نمود. شکل ۱ نمایی از یک آبشار با یک خوراک، یک پسماند و M خط محصول را نشان می‌دهد. این روش به شکل تئوری توسط محققان مختلفی از جمله پالکین و اسمیرنوف بررسی شده است [۱۴، ۱۵].

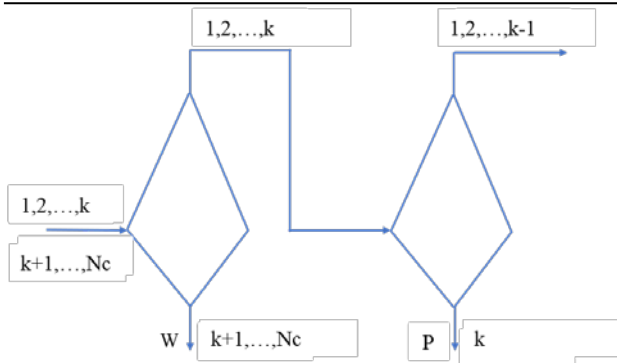


شکل ۱. نمایی از یک آبشار با یک خوراک، یک پسماند و M خط محصول.

از میان گازهای نجیب، ایزوتوپ‌های زینان بیش‌ترین کاربرد را دارند. در این بین ایزوتوپ Xe-۱۲۴ که از اهمیت بیش‌تری برخوردار است به‌عنوان هدف در سیکلوترون جهت تولید I-۱۲۳ استفاده می‌شود. هم‌چنین Xe-۱۲۴ برای تولید I-۱۲۵ در درمان سرطان کاربرد دارد. Xe-۱۲۶ به عنوان ردیاب در تحقیقات واپاشی جفت الکترونی بتا و تولید Ba-۱۲۸ در پزشکی کاربرد دارد. ایزوتوپ Xe-۱۲۹ در تصویربرداری رزونانسی مغناطیسی جریان گاز در شش‌ها استفاده می‌شود. ایزوتوپ Xe-۱۳۶ نیز در آشکارسازها به منظور بررسی خواص نوترونیک مواد استفاده می‌شود و دیگر ایزوتوپ‌های پایدار زینان نیز در توسعه لیزرهای توان بالا، تحقیقات فیزیک هسته‌ای و... کاربرد دارند. علی‌رغم تحقیقات تجربی انجام گرفته در خصوص جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار عناصر مختلف، تاکنون مرجعی برای ارایه نتایج جداسازی ایزوتوپ‌های زینان ذکر نشده است. تنها منابع موجود در مقیاس تک ماشین برای گاز زینان مربوط به مراکز تحقیقاتی ORNL و Tsinghua می‌باشد که در آن‌ها به پارامترهای ماشین سانتریفیوژ اشاره نشده است [۱]. در مرکز تحقیقاتی ORNL در سال ۱۹۸۹ اولین بار ماشین‌های سانتریفیوژ جهت جداسازی ایزوتوپ‌های زینان استفاده شدند که غلظت Xe-۱۳۶ با یک بار عبور از یک ماشین سانتریفیوژ، از ۸٫۹۵ درصد به ۶۳٫۱۰ درصد افزایش یافته است [۲].

بر اساس مطالعات انجام گرفته تاکنون استراتژی مشخصی برای جداسازی تمام ایزوتوپ‌های زینان که بیش‌ترین تعداد ایزوتوپ پایدار را داشته و در نتیجه همگرایی محاسبات در آن پیچیده‌تر می‌باشد منتشر نشده است. اما فعالیت‌هایی در زمینه جداسازی سایر ایزوتوپ‌ها انجام شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: جداسازی ایزوتوپ‌های Cr-۵۴، Cr-۵۰ در سال ۱۹۸۹ در مرکز تحقیقاتی ORNL [۳]، جداسازی ایزوتوپ Te-۱۲۳ در سال ۱۹۹۳ توسط تیکلتسوف و همکاران [۴]، جداسازی ایزوتوپ Cr-۵۰ در سال ۱۹۹۵ توسط پاپوف و همکاران [۵]، جداسازی ایزوتوپ‌های Sn-۱۱۸، Sn-۱۱۶ در سال ۲۰۰۲ توسط سوورف و همکاران [۶]، جداسازی ایزوتوپ‌های Te-۱۲۲، Te-۱۲۳، Se-۷۴، Se-۷۶، Se-۷۸، Zn-۶۶، Zn-۶۷، Zn-۶۸، Zn-۷۰ توسط تیکلتسوف و همکاران به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶ [۷-۹]، جداسازی ایزوتوپ Cd-۱۱۶ توسط بوریسویچ و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۱۰]، جداسازی ایزوتوپ‌های Hg-۱۹۲، Hg-۲۰۴، Hg-۲۰۲ توسط بابیوف و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۱۱]، جداسازی ایزوتوپ‌های S-۳۲، S-۳۳، S-۳۴، S-۳۶





شکل ۲. نمایی از جداسازی جزء میانی با استفاده از دو آبشار.

از میان آبشارهای موجود، استفاده از آبشار مربعی یکی از روش‌های متداول برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار است. با توجه به جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر، آبشارهای مربعی قابلیت بهره‌برداری در خوراک‌های با غنای پایین و هم‌چنین ضریب برش‌های مختلف را دارا می‌باشند که اصطلاحاً از انعطاف‌پذیری بالایی در بهره‌برداری برخوردار است. لذا آبشارهای مربعی به منظور جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار مناسب هستند.

تاکنون استراتژی مشخصی برای جداسازی تمام ایزوتوپ‌های زینان منتشر نشده است. بنابراین با توجه به کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار زینان در پزشکی، فیزیک هسته‌ای، لیزر و ... در این کار تحقیقاتی برای اولین بار به بیان استراتژی جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار زینان در یک آبشار مربعی انعطاف‌پذیر پرداخته شده است. در این راستا یک کد محاسباتی با عنوان "SQCAS" به زبان متلب تهیه شده است که با استفاده از آن می‌توان آبشار مربعی را مدل‌سازی کرده و در نتیجه جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار در شرایط مختلف را بررسی کرد.

۲. تئوری کار و معادلات حاکم

در این بخش به بیان معادلات حاکم بر آبشار مربعی و تئوری مورد استفاده جهت جداسازی پرداخته می‌شود.

۱.۲ آبشار مربعی

نمایی از یک آبشار مربعی در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق رابطه (۱) آبشار مربعی به آبشاری اشاره دارد که نرخ جریان ورودی به تمام مراحل ثابت باشد و مقدار آن در طول آبشار تغییر نکند [۱۸، ۱۹].

$$Z_1 = Z_2 = \dots = Z_s = Z \quad (1)$$

در رویکرد دوم از دسته‌بندی ایزوتوپ‌ها به دو گروه در آبشارهای مدل استفاده می‌شود. به این معنی که پس از عبور خوراک از آبشار تقریباً ایزوتوپ‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند و در محصول ایزوتوپ میانی به عنوان ایزوتوپ انتهایی مطرح می‌شود. پس از آن می‌توان یک آبشار دیگر برای خوراک با ترکیب درصد جدید طراحی نمود که در آن با ایزوتوپ میانی در مرحله قبل به عنوان ایزوتوپ انتهایی رفتار می‌شود و یا این که می‌توان با اعمال تغییراتی در آبشار اول مجدداً از آن استفاده نمود. در شکل ۲ جداسازی جزء میانی با استفاده از دو آبشار را نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، خوراک دارای N_c ایزوتوپ است و هدف، جدا کردن ایزوتوپ k می‌باشد. با استفاده از آبشار اول اجزای خوراک به دو گروه $(1, 2, \dots, k)$ و $(k+1, \dots, N_c)$ تقسیم می‌شوند. حال در گروه $(1, 2, \dots, k)$ ایزوتوپ k به عنوان ایزوتوپ انتهایی است. بنابراین خط محصول آبشار اول به عنوان خوراک به آبشار بعدی وارد می‌شود. از آنجا که ایزوتوپ k ام در این خوراک جدید به عنوان جزء سنگین انتهایی می‌باشد، می‌توان طراحی آبشار جدید را مجدداً به گونه‌ای انجام داد که ایزوتوپ‌ها به دو گروه (k) و $(1, 2, \dots, k-1)$ تقسیم شده و ایزوتوپ k از خط پسماند خارج شود. این روش توسط اکثر محققان از جمله سولابریدز برای آبشار مدل Q ارایه شده است [۱۴]. از معایب این روش، نیاز به طراحی و ساخت آبشار برای جداسازی هر ایزوتوپ و در هرگام می‌باشد که در هزینه ساخت و فراهم نمودن فضا برای جداسازی ایزوتوپ‌های مختلف مشکل‌ساز خواهد بود.

در رویکرد سوم که پرکاربردترین حالت می‌باشد، می‌توان با اعمال تغییراتی در آبشار اول، مجدداً از آن استفاده نمود. در این حالت تنها از یک آبشار و در دفعات مختلف استفاده می‌شود و کافی است که برش (Cut) آبشار را در مقدار مورد نیاز به منظور جداسازی ایزوتوپ مورد نظر تنظیم نمود [۱۶، ۱۷]. یعنی با تنظیم برش در مناسب‌ترین مقدار، از آبشار با بیش‌ترین بازده ممکن جهت جداسازی یک گستره زیادی از ایزوتوپ‌ها با جرم ایزوتوپی وسیعی استفاده نمود. این‌گونه آبشارها را اصطلاحاً انعطاف‌پذیر یا چند منظوره می‌نامند [۱۷، ۱۸]. رایچورا و همکاران از جمله محققانی هستند که به شکل عملی از این روش استفاده کرده‌اند [۱۷].



هم‌چنین با توجه به این‌که خوراک به چه مرحله‌ای وارد می‌شود نیز باید روابط زیر در آبشار مربعی برقرار باشند:

$$S_f = 1 \rightarrow 1 < \theta_1 + \theta_r < 1 + \frac{F}{Z}$$

$$S_f \neq 1 \rightarrow 1 - \frac{F}{Z} < \theta_1 + \theta_r < 1 \quad (10)$$

۲.۲ تئوری جداسازی

یکی از پارامترهای اصلی در جداسازی اجزای یک ترکیب چند جزئی در آبشارهای متداول، برش آبشار است که نسبت نرخ جریان محصول به نرخ جریان خوراک (P/F) می‌باشد [۱۸]. با تنظیم برش آبشار می‌توان تا حد امکان ایزوتوپ‌ها را به دو گروه دسته‌بندی کرد. در این شرایط بسته به این‌که کدام ایزوتوپ مورد نظر است در صورتی‌که ایزوتوپ هدف در گروه سنگین قرار گیرد، به‌عنوان سبک‌ترین جزء در آن گروه و اگر در گروه سبک قرار گیرد، به‌عنوان سنگین‌ترین جزء در آن گروه مطرح می‌شود. برای غنی‌سازی جزء میانی با شماره k ، حداکثر غلظت قابل استحصال در جریان محصول و یا جریان پسماند، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۶، ۱۸]:

$$(y_{N_c, P})_{lim} = \frac{Z_{N_c, F}}{\sum_{i=1}^{N_c} Z_{i, F}} \quad (11)$$

$$(x_{N_c, W})_{lim} = \frac{Z_{N_c, F}}{\sum_{i=N_c}^{N_c} Z_{i, F}} \quad (12)$$

در صورتی‌که مخلوط ایزوتوپ‌های چند جزئی در دو گروه سبک و سنگین به صورت کامل از یک‌دیگر جدا شوند، اجزای $1, 2, \dots, k$ در جریان محصول و اجزای $k+1, k+2, \dots, N_c$ در جریان پسماند قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر:

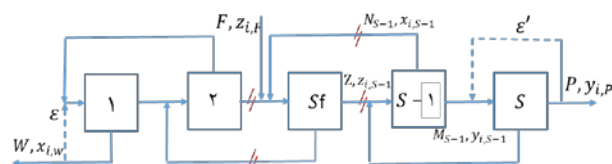
$$\sum_{i=1}^k y_{i, P} \rightarrow 1, \sum_{i=1}^k x_{i, W} \rightarrow 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i=k}^{N_c} y_{i, P} \rightarrow 0, \sum_{i=k}^{N_c} x_{i, W} \rightarrow 1 \quad (14)$$

با استفاده از روابط فوق و استفاده از معادلات بقا در آبشار طولیل روابط (۱۵) و (۱۶) را خواهیم داشت. در این صورت مطابق رابطه (۱۵)، اگر برش آبشار برابر با مجموع غلظت گروه سبک باشد آنگاه می‌توان دو گروه ایزوتوبی را با هدف جداسازی جزء k کاملاً از هم جدا نمود و برعکس [۱۶، ۱۸].

$$\frac{P}{F} \sum_{i=1}^k Z_{i, F} \quad (15)$$

$$\frac{W}{F} = \sum_{i=k+1}^{N_c} Z_{i, F} \quad (16)$$



شکل ۳. نمایی از یک آبشار مربعی.

در این شکل جریان خوراک با نرخ F در مرحله S_f با غنای $Z_{i, f}$ وارد آبشار می‌شود. جریان‌های میان مرحله‌ای با نرخ M_s و N_s و ترکیب درصدی $x_{i, s}$ و $y_{i, s}$ و جریان‌های محصول پسماند P و W به ترتیب با ترکیب درصد $y_{i, p}$ و $x_{i, w}$ بیان می‌شود. تعداد ایزوتوپ‌ها در جریان خوراک برابر N_c و تعداد کل مراحل آبشار برابر با S است. معادلات (۲) تا (۵) مربوط به موازنه جریان در تمام نقاط تلاقی جریان‌ها هستند. هم‌چنین با استفاده از تعریف برش و معادلات بقای جریان در هر مرحله روابط (۶) و (۷) برقرار خواهند بود. در این روابط M_s, N_s, θ_s و Z_s به ترتیب به برش مرحله S ، نرخ جریان پیش‌رونده، پس‌رونده و نرخ جریان ورودی به مرحله S اشاره دارند [۲۰]. پارامترهای ϵ و ϵ' نیز به ترتیب بیان‌گر جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر آبشار مربعی هستند.

$$Z = M_{s-1} + N_{s+1}, \quad S \neq s_f \quad (2)$$

$$Z = M_{s-1} + N_{s+1} + F, \quad S = s_f \quad (3)$$

$$Z = M_{s-1} + \epsilon', \quad S = s \quad (4)$$

$$Z = N_r + \epsilon, \quad S = 1 \quad (5)$$

$$M_s = Z \theta_s \quad (6)$$

$$N_s = Z (1 - \theta_s) \quad (7)$$

مطابق مرجع [۲۱] در یک آبشار مربعی حداکثر ۳ مقدار برش وجود دارد و به شکل کلی برای برش مراحل شرایط زیر حاکم است:

اگر مرحله ورود خوراک فرد باشد:

$$\theta_1 = \theta_r = \theta_s = \theta_{s_f} = \theta_{s_f+2} \dots$$

$$\theta_r = \theta_r = \dots = \theta_{s_f-1} = \theta_{s_f-1} - \frac{F}{Z} = \dots \quad (8)$$

اگر مرحله ورود خوراک زوج باشد:

$$\theta_1 = \theta_r = \dots = \theta_{s_f-1} = \theta_{s_f+1} - \frac{F}{Z} = \dots$$

$$\theta_r = \theta_r = \theta_r = \theta_{s_f} = \theta_{s_f+2} \dots \quad (9)$$



۳. روش کار

ایزوتوپ‌های $k < j \leq N_c$ متناسب با ترکیب درصد آن‌ها در جریان سنگین و ایزوتوپ‌های $1 < j \leq k$ در جریان سبک غنی می‌شوند. در این پژوهش چگونگی قرار گرفتن هر ایزوتوپ در جریان سبک یا سنگین نیز براساس روابط (۱۱) و (۱۲) انجام می‌شود. هنگامی که ایزوتوپ k در جریان سبک آبشار غنی می‌شود، حداکثر غلظت قابل استحصال در آن از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است. زمانی که ایزوتوپ k در جریان پسماند آبشار غنی می‌شود، برای ارزیابی حداکثر غلظت قابل استحصال در آن می‌توان از رابطه (۱۲) استفاده نمود.

پس از تولید محصول و پسماند در آبشار متناسب با غلظت مطلوب از جزء مورد نظر، مجدداً با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) مشخص می‌شود که آیا بهتر است ایزوتوپ k در جریان محصول و یا در جریان پسماند غنی شود و بر این اساس نیز مقدار برش آبشار محاسبه می‌شود. در صورتی که ایزوتوپ k در جریان محصول غنی شود، برش آبشار باید بر اساس رابطه (۱۵) برای ایزوتوپ‌های $1 < j \leq k$ تعیین شود و در صورتی که ایزوتوپ k در جریان پسماند غنی شود، برش آبشار بر اساس رابطه (۱۶) برای ایزوتوپ‌های $k-1 \leq j < 1$ تعیین می‌شود زیرا هدف غنی‌سازی ایزوتوپ‌های $k-1 \leq j < 1$ در جریان محصول است.

در این تحقیق یک کد محاسباتی با عنوان "SQCAS" "Square CASCADE" به زبان متلب در تقریباً ۶۰۰ خط تهیه شده است که با استفاده از آن مسیر جداسازی ایزوتوپ هدف در جریان سبک و یا سنگین مشخص می‌شود. کد SQCAS با مدل‌سازی آبشار مربعی در هرگام، تمام ایزوتوپ‌های پایدار زینان طبیعی را براساس روابط ارائه شده جداسازی می‌کند. شکل ۴ الگوریتم تهیه شده برای جداسازی هر ایزوتوپ در گام‌های مختلف جداسازی را نشان می‌دهد. این الگوریتم علاوه بر ایزوتوپ‌های زینان، قابلیت جداسازی هر ایزوتوپ و تا هر مقدار غنایی را دارد. در مدل‌سازی آبشار مربعی از معادلات (۱) تا (۱۰) برای تعیین نرخ جریان مراحل استفاده می‌شود و با استفاده از روش تکرار Q مقدار غلظت هر ایزوتوپ در تمام مراحل تعیین می‌شود [۲۲]. در این روش که اطلاعات کامل آن در مرجع [۲۲] آمده است، با استفاده از معادلات بقای جرم در مراحل و نقاط اتصال، و با در نظر گرفتن فاکتور جداسازی (رابطه (۱۷)) محاسبات قابل انجام است. در روش تکرار Q ، با تعریف نسبت غلظت جریان بالارونده به جریان پایین‌رونده برای جزء i ام $q_{i,s} = y_{i,s} / x_{i,s}$ تمام معادلات غیرخطی به معادلات خطی تبدیل شده و به ترتیب با استفاده از تکنیک‌های تکرار و اصلاح مقدار q در هر گام غلظت تمام ایزوتوپ‌ها قابل محاسبه است.

$$\alpha_{i,j,s} = \frac{y_{i,s} / y_{j,s}}{x_{i,s} / x_{j,s}} \equiv \alpha_{o,s}^{M_j - M_i} \quad (i = j - 1, j = 2, \dots, N_c) \quad (17)$$

در جدول ۱ مقدار غنای ایزوتوپ‌های زینان در خوراک طبیعی آورده شده است. مقدار جرم خوراک به عنوان نمونه برابر با ۲۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است و بر اساس غنای هر ایزوتوپ در جریان خوراک، حداکثر مقدار قابل دستیابی هر یک از آن‌ها در این مقدار نشان داده شده است.

مشخصات آبشار مربعی مورد بررسی در جدول ۲ آورده شده است. این آبشار دارای ۲۰ مرحله است که نسبت Z/F در آن مطابق مرجع [۲۰] برابر با ۱۰ انتخاب شده است. مطابق این مرجع هراندازه که مقدار Z/F در آبشار مربعی زیاد باشد، جداسازی بهتر انجام می‌شود. برای جداسازی در این بررسی مقدار فاکتور جداسازی برابر با ۱/۲ می‌باشد و با توجه به این که تعداد کل ماشین‌های سانتریفیوژ در این تحقیق ۲۰۰ عدد در نظر گرفته شده است، تعداد ماشین سانتریفیوژ در هر مرحله برابر ۱۰ است.

لازم به ذکر است که در این مقاله تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ، تعداد مراحل و مقدار فاکتور جداسازی، فرضی بوده و تنها به منظور نشان دادن روش کار می‌باشد.

۱۰.۳ استراتژی جداسازی اجزاء خوراک برای دستیابی به غنای بالا

جداسازی اجزاء مختلف در خوراک به این ترتیب انجام می‌شود که ابتدا خوراک با هدف جداسازی دو گروه ایزوتوپی به آبشار وارد شده و با مشخص نمودن ایزوتوپ میانی هدف (k)، دو گروهی کردن اجزاء انجام می‌شود. برای این منظور برش آبشار مطابق روابط (۱۵) و (۱۶) تنظیم می‌شود.

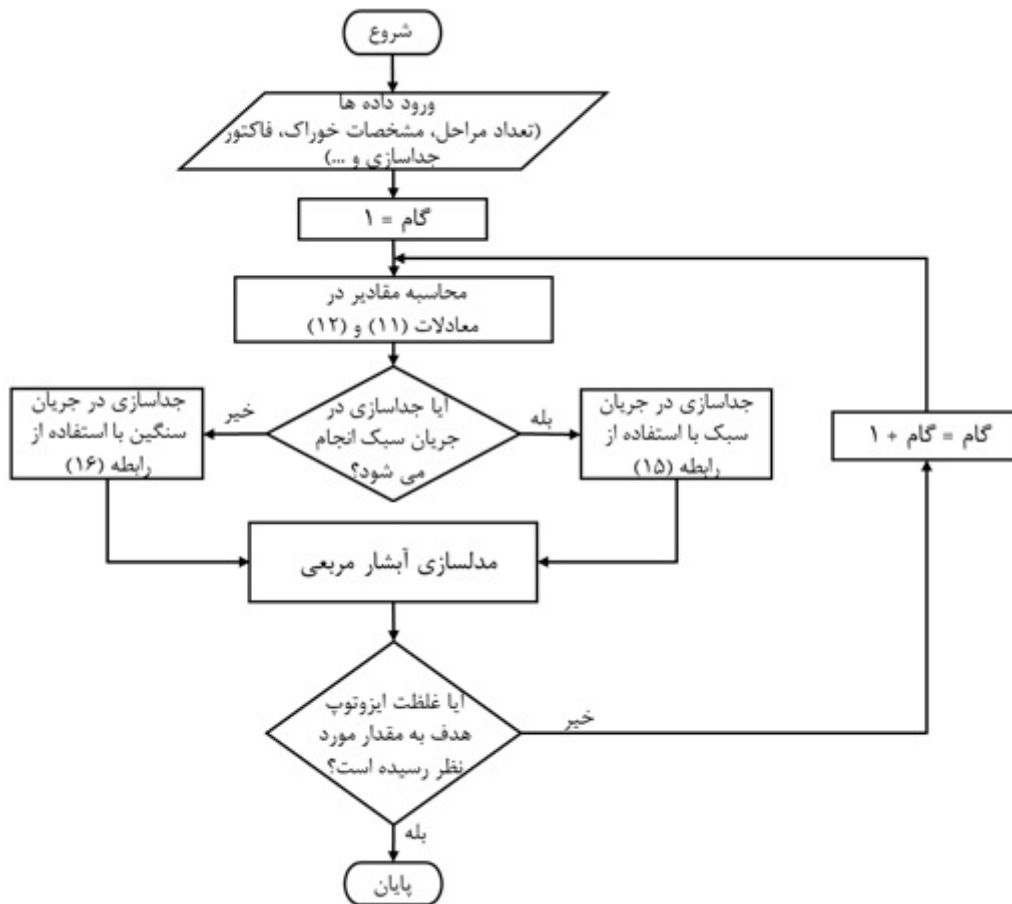
جدول ۱. ترکیب درصد ایزوتوپ‌های زینان در جریان خوراک و مقدار هر یک در خوراک

ایزوتوپ	غنای اجزاء در خوراک طبیعی	مقدار ایزوتوپ در ۲۰۰ کیلوگرم
Xe-۱۲۴	۰٫۰۰۰۹۳	۱۸۶ g
Xe-۱۲۶	۰٫۰۰۰۹۰	۱۸۰ g
Xe-۱۲۸	۰٫۰۱۹۱۷	۳٫۸۳ kg
Xe-۱۲۹	۰٫۲۶۴۴۰	۵۲٫۸۸ kg
Xe-۱۳۰	۰٫۴۰۸۰	۸۱٫۶ kg
Xe-۱۳۱	۰٫۲۱۱۸۰	۴۲٫۳۶ kg
Xe-۱۳۲	۰٫۲۶۸۹۰	۵۳٫۷۸ kg
Xe-۱۳۴	۰٫۱۰۴۴۰	۲۰٫۸۸ kg
Xe-۱۳۶	۰٫۰۸۸۲۰	۱۷٫۷۴ kg

جدول ۲. پارامترهای اصلی آبشار مربعی برای جداسازی ایزوتوپ‌های زینان

Z/F	تعداد ماشین در آبشار	α_o	تعداد مراحل
۱۰	۲۰۰	۱/۲	۲۰





شکل ۴. الگوریتم تهیه شده برای جداسازی هر ایزوتوپ در گام‌های مختلف جداسازی.

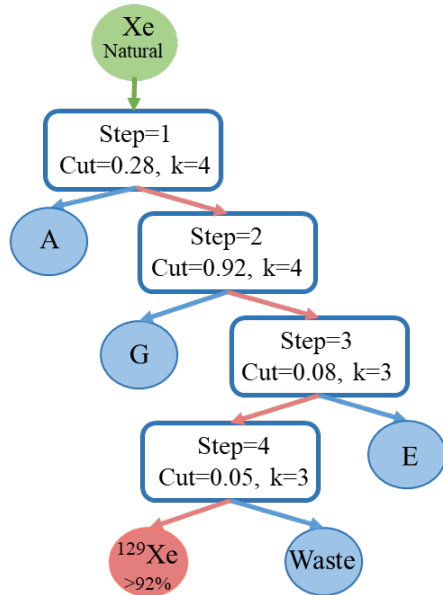
۴. نتایج

تعداد کل آبشارها جهت جداسازی تمام ایزوتوپ‌های زینان، ۳۲ عدد است که در جدول ۳ به شکل مختصر تعداد گام‌های استفاده شده، غنای نهایی استحصال شده و همچنین مقدار جرم برای جریان‌های نهایی آورده شده است. مطابق بررسی‌های انجام شده ایزوتوپ‌های انتهایی راحت‌تر به غنای ۰.۹۹٪ نزدیک می‌شوند، در صورتی که جداسازی ایزوتوپ‌های میانی علاوه بر پیچیدگی‌های بیشتر به تعداد دفعات (گام‌های) جداسازی بیشتر نیاز دارند. در این مورد می‌توان به دو ایزوتوپ انتهایی و میانی $Xe-136$ و $Xe-131$ اشاره نمود. همان‌طور که از جدول ۳ ملاحظه می‌شود غنای این دو ایزوتوپ به ترتیب از ۰.۸۸۷٪ و ۰.۲۱۱۸٪ به ۰.۹۹۰۴٪ و ۰.۹۰۱۲٪ می‌رسد. همچنین مقدار ماده قابل استحصال از ایزوتوپ‌های انتهایی بیشتر از ایزوتوپ‌های میانی است. در مورد ایزوتوپ $Xe-131$ که در خوراک ۴۲/۳۶ kg موجود است تنها ۲۲/۶ kg دست می‌آید اما در مورد ایزوتوپ $Xe-136$ که مقدار آن در خوراک ۱۷/۷۴ kg است، تقریباً ۱۶/۵۶ kg قابل استحصال است. از جمله ایزوتوپ‌هایی که جداسازی آن‌ها پیچیدگی بیشتری دارد می‌توان به $Xe-130$ اشاره نمود. چرا که این ایزوتوپ هم میانی

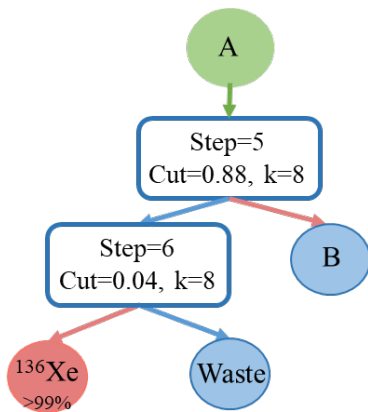
بوده و هم این‌که غلظت آن نسبت به دو ایزوتوپ مجاور کم‌تر است و ایزوتوپ‌های مجاور در تعداد دفعات مکرر غنی‌سازی به عنوان مزاحم عمل می‌کنند. اما توجه به این نکته مهم است که غنی‌سازی ایزوتوپ‌های میانی با توجه مقدار جرم آن‌ها تنها از یک مسیر انجام شده است. مقدار جرم به‌دست آمده از گام ۳۰ ام برای این ایزوتوپ کم است و مقدار جداسازی آن تا غنای ۰/۸۳٪ گزارش شده است. در صورتی که دیگر جریان‌های بررسی نشده نیز ارزیابی شوند مقدار ماده قابل استحصال بیشتر می‌شود که این امر منوط به استفاده بیشتر از آبشار مربعی می‌باشد. همچنین جهت افزایش غنای به دست آمده می‌توان مقدار جرم خوراک اولیه را بیشتر گرفت.

نکته مهم دیگر علاوه بر میانی و یا انتهایی بودن ایزوتوپ‌ها، مقدار غلظت آن‌ها در جریان خوراک ورودی است که بر مقدار غلظت نهایی قابل استحصال و تعداد دفعات مورد نیاز استفاده از آبشار اثر می‌گذارد. در این مورد می‌توان به $Xe-129$ اشاره نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود غنای این ایزوتوپ در خوراک نسبت به سه ایزوتوپ سبک‌تر از خود بسیار بیشتر بوده و این امر منجر می‌شود به این‌که با چهار بار استفاده از آبشار مقدار غنای آن به ۰/۹۲۶۳٪ برسد که مقدار قابل استحصال آن نیز نسبتاً بالا است. شکل ۵ ارتباط غنای ایزوتوپ‌ها در خوراک و

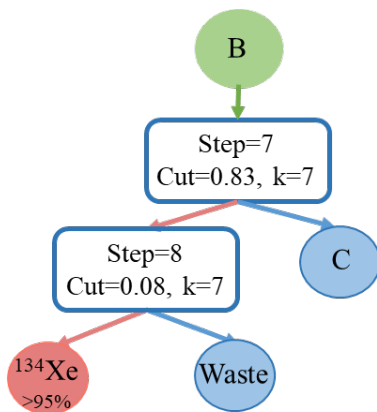




شکل ۶. مراحل جداسازی ایزوتوپ چهارم.



شکل ۷. مراحل جداسازی ایزوتوپ نهم.



شکل ۸. مراحل جداسازی ایزوتوپ هشتم.

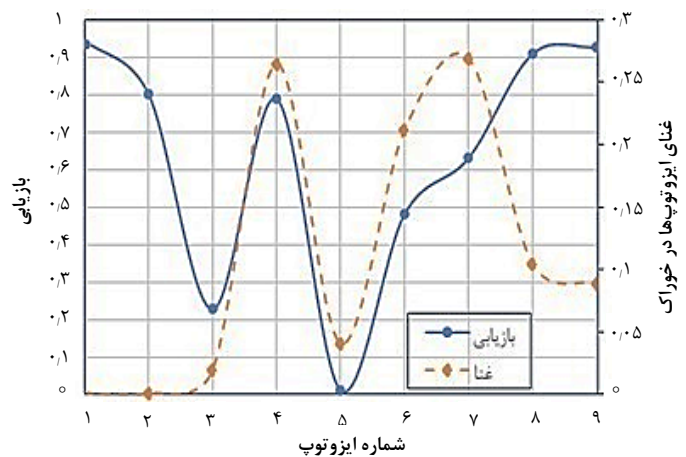
میزان بازیابی هر یک از آن‌ها را در تمام گام‌های جداسازی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود میزان بازیابی ایزوتوپ‌های میانی کمتر از ایزوتوپ‌های انتهایی بوده و تنها استثنا در این جا $Xe-129$ می‌باشد و چون غنای این ایزوتوپ از سه ایزوتوپ اول بیشتر است همان‌طور که گفته شد مانند ایزوتوپ ابتدایی عمل کرده و غنای آن در گام‌های کمتر به مقدار بیشتری می‌رسد.

شکل‌های ۶ تا ۱۳ نیز به ترتیب مسیر جداسازی ایزوتوپ‌های چهارم، نهم، هشتم، هفتم، ششم، پنجم، سوم، اول و دوم را نشان می‌دهند.

این مقاله به منظور ارایه و بیان استراتژی جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تهیه شده است و در صورتی که بتوان از آبشار با تعداد مراحل بیشتر استفاده کرد و یا این که ماشین سانتریفیوژ با فاکتور جداسازی بالا در دسترس باشد، تعداد گام‌های جداسازی کمتر و در نتیجه مقدار محصول به دست آمده بیشتر شده و به عبارت دیگر بازیابی آبشار زیاد می‌شود.

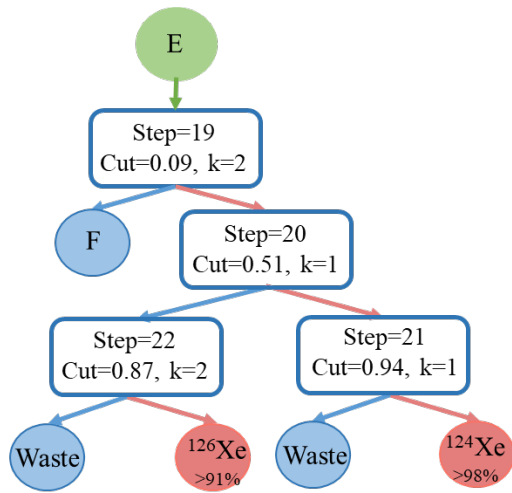
جدول ۳. ترکیب درصد ایزوتوپ‌های زینان در جریان خوراک، محصول و مقدار هر یک از ایزوتوپ‌ها

ایزوتوپ	تعداد گام‌های استفاده شده	غنای نهایی استحصال شده	مقدار جرم حاصل از ۲۰۰ kg	بازیابی
Xe-124	۶	۰.۹۸۷۲	۱۷۸ g	۰.۹۴
Xe-126	۶	۰.۹۱۳۰	۱۵۸ g	۰.۸۰
Xe-128	۸	۰.۹۲۷۹	۹۴۳ g	۰.۲۳
Xe-129	۴	۰.۹۲۶۳	۴۵.۰۲ kg	۰.۷۹
Xe-130	۸	۰.۸۳۷۷	۱۲۱ g	۰.۰۱
Xe-131	۹	۰.۹۰۱۲	۲۲.۶ kg	۰.۴۸
Xe-132	۷	۰.۹۱۶۴	۳۷.۰۲ kg	۰.۶۳
Xe-134	۴	۰.۹۵۶۸	۱۹.۸۲ kg	۰.۹۱
Xe-136	۳	۰.۹۹۰۴	۱۶.۵۶ kg	۰.۹۳

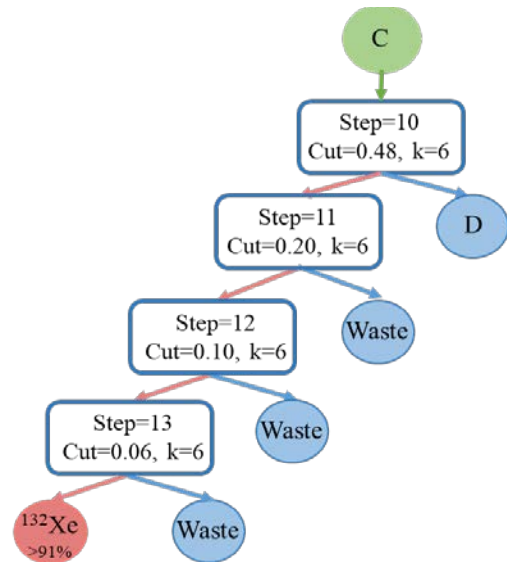


شکل ۵. مقایسه تغییرات غنای ایزوتوپ‌ها و میزان بازیابی هر یک در تمام گام‌های جداسازی.

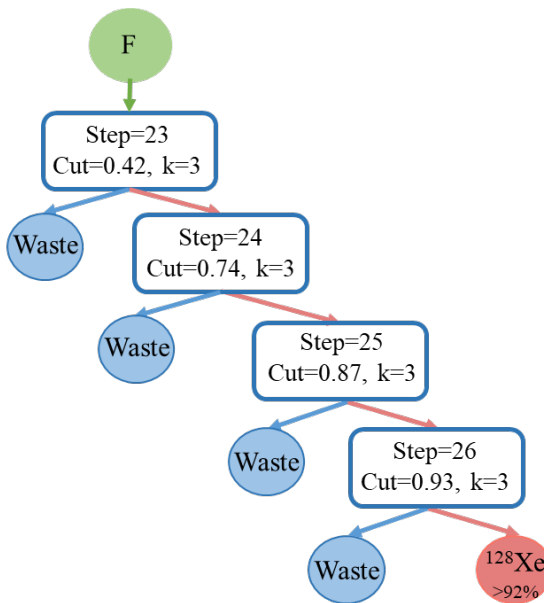




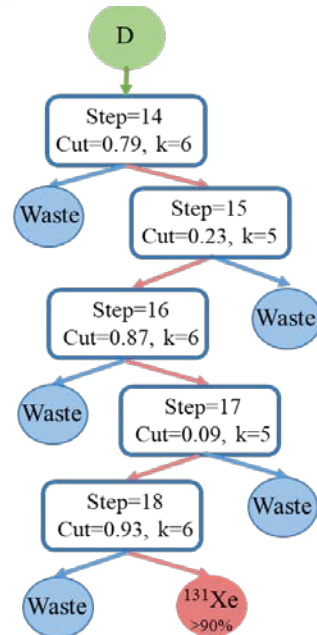
شکل ۱۲. مراحل جداسازی ایزوتوپ‌های اول و دوم.



شکل ۹. مراحل جداسازی ایزوتوپ هفتم.



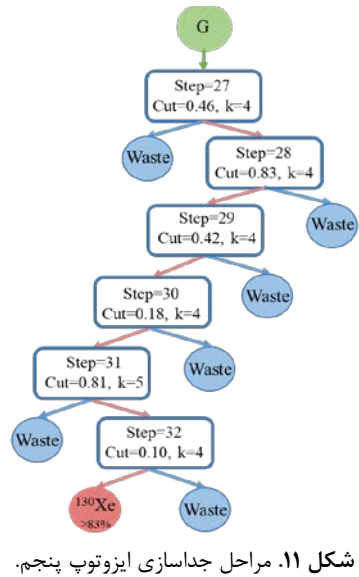
شکل ۱۳. مراحل جداسازی ایزوتوپ سوم.



شکل ۱۰. مراحل جداسازی ایزوتوپ ششم.

۵. جمع‌بندی

در این کار تحقیقاتی یک کد محاسباتی تهیه شده است که با استفاده از آن استراتژی جداسازی ایزوتوپ هدف در جریان سبک و یا سنگین مشخص می‌شود. کد تهیه شده با تغییر پارامترهای آبشار مربعی به مدل‌سازی آن در هرگام و جداسازی تمام ایزوتوپ‌های زینان طبیعی متناسب با ترکیب درصد ایزوتوپ‌ها می‌پردازد. در این تحقیق جداسازی ایزوتوپ‌ها در ۳۲ گام انجام شده است. آبشار مورد استفاده دارای ۲۰ مرحله بوده و مقدار فاکتور جداسازی در ماشین سانتریفیوژ برابر با ۱٫۲ در نظر گرفته شده است. با استفاده از استراتژی ارایه شده غنای ایزوتوپ‌های اول تا نهم به مقادیر بیش‌تر از ۸۰٪ افزایش یافت. تعداد گام‌های مورد نیاز برای جداسازی تمام ایزوتوپ‌ها به ترتیب ۶، ۶، ۸، ۴، ۸، ۹، ۵ و ۳ می‌باشد. این استراتژی برای



شکل ۱۱. مراحل جداسازی ایزوتوپ پنجم.



10. V.D. Borisevich, *Calculation Study of the enrichment of Cadmium Isotopes in Gas Centrifuges*, *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*, **41**, 851-858 (2007).
11. N.S. Babaev, et al., *Centrifugal enrichment of mercury isotopes*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **613**, 473-476 (2010).
12. A.N. Cheltsov, et al., *Centrifugal enrichment of sulfur isotopes*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **299**, 989-993 (2014).
13. A.N. Tcheltsov, L.Yu. Sosnin, V.K. Khamylov, *Centrifugal enrichment of nickel isotopes and their application to the development of new technologies*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **299**, 981-987 (2014).
14. G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich, *Cascade for Separation of Multicomponent Isotope Mixtures*, *J. Sep. Sci. Tech*, **36**, 1769-1817 (2001).
15. V.A. Palkin, E.V. Maslyukov, *Purification of Reprocessed Uranium in an Additional Product Flow of a Matched Abundance Ratio Cascade and Its Enrichment in an Ordinary Cascade*, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **50**, 711-717 (2016).
16. S. Zeng, Y. Chuntong, *A method of separating a middle component in multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge cascades*, *Sep. Sci. Tech*, **35**, 2173-2186 (2000).
17. R.C. Raichura, M.A.M. Al-Janabi, G.M. Langbein, *The effect of the 'KEY' molar mass on the design of a cascade handling a multi-isotopic mixture*, *Annals of Nuclear Energy*, **18(6)**, 327-356 (1991).
18. A.Y. Smirnov, G.A. Sulaberidze, *Features of mass transfer of intermediate components in square gas centrifuge cascade for separating multicomponent mixtures*, *Theo. Found. Chem. Eng.*, **48**, 629-636 (2014).
19. S. Villani, *Enrichment of Uranium*, Springer, New York, (1979).
20. F. Mansourzadeh, et al., *Comparison of optimum tapered cascade and optimal square cascade for separation of xenon isotopes using enhanced TLBO algorithm*, *Journal of Separation Science and Technology*, **53**, 2074-2087 (2018).
21. F. Mansourzadeh, *Investigation of gas centrifuge counter current cascades for separation of Xe stable isotopes*, PhD Thesis, *Research Institute of Nuclear Sciences and Technologies*, (1397) In Persian.
22. S. Zeng, Y. Chuntong, *A Robust and Efficient Calculation Procedure for Determining Concentration Distribution of Multicomponent Mixtures*, *Sep. Sci. Tech*, **35**, 613-622 (2000).

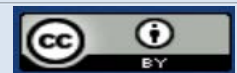
غنی‌سازی تمام ایزوتوپ‌های پایدار قابل استفاده بوده و در صورتی که بتوان از آبشار با تعداد مراحل بیشتر استفاده کرد و یا این‌که ماشین سانتریفیوژ با فاکتور جداسازی بالا در دسترس باشد، تعداد گام‌های جداسازی کم‌تر و در نتیجه مقدار محصول به دست آمده بیشتر شده و به عبارت دیگر بازیابی آبشار زیاد می‌شود.

مراجع

1. M. Zhou, Ch. Ying, Yu. Nie, *Experimental Study of Stable Isotope Separation*, **RU0310910**.
2. W.L. Roberts, *Gas Centrifugation of Research Isotopes*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **282**, 271-276 (1989).
3. A.J. Szady, *Enrichment of chromium isotopes by gas centrifugation*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **282.1**, 277-280 (1989).
4. I.A. Suvorov, A.N. Tcheltsov, *Enrichment of tellurium isotopes for pure I-123, production using gas ultra-centrifuges*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **334**, 33-36 (1993).
5. G.E. Popov, et al., *Centrifugal enrichment of chromium-50 for experiments on detecting solar neutrinos*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **362**, 533-537 (1995).
6. I.A. Suvorov, A.N. Tcheltsov, L.Y. Sosnin, *Centrifugal Extraction of Highly Enriched Tin Isotopes And Increase of Specific Activity Of The Radionuclide 119m-Sn on The Gas Centrifuge Cascade*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **480**, 22-28 (2002).
7. A.N. Tcheltsov, *Centrifugal extraction of highly enriched 120Te and 122Te using the non-steady state method of separation*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **480**, 36-39 (2002).
8. A.N. Tcheltsov, *Centrifugal enrichment of selenium isotopes and their application to the development of new technologies and to the experiments on physics of weak interaction*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **521**, 156-160 (2004).
9. A.N. Tcheltsov, L.Y. Sosnin, Y.D. Shipilov, *Centrifugal enrichment of zinc isotopes, their application in medicine and in increasing radiation safety in nuclear power plants*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **561**, 52-57 (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

فاطمه منصورزاده، جابر صفدری، علی اصغر قربانپور خمسه، محمدحسن ملاح (۱۴۰۱)، جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار زینان با استفاده از آبشار مربعی، ۱۰۲، ۱۰۹-۱۱۷

DOI: 10.24200/nst.2022.1473

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1224.html

