



بررسی اثر برش بر جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار میانی گاز زینان در آبشار مربعی

فاطمه منصورزاده^۱، علی اصغر قربانپور خمسه^{۱*}، سید جابر صفدری^۱، علی نوروزی^۲، مجید خواجه‌نوری^۲

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران-ایران

۲. شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹۵-۵۹۳۱، تهران-ایران

*Email: akhamseh@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۷/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۲/۱۰

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در آبشار مربعی که تأثیر زیادی بر عملکرد آن در جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی دارد، برش آبشار می‌باشد. در این پژوهش ابتدا به بررسی اثر برش بر جداسازی ایزوتوپ‌های میانی گاز زینان در یک آبشار مربعی با ۲۰ مرحله پرداخته شده است. این مطالعات برای دو حالت که در آن فاکتور جداسازی ماشین سانتریفیوژ برابر ۱/۲ و ۱/۱ باشد، انجام گرفته است. پس از آن کم‌ترین طول لازم برای ایجاد یک آبشار طویل با تغییر نسبت Z/F و برش آبشار با این دو فاکتور جداسازی تعیین شده است. بر اساس محاسبات انجام گرفته، در صورتی که فاکتور جداسازی برابر ۱/۲ و ۱/۱ باشد، کم‌ترین تعداد مراحل آبشار به ترتیب برابر با ۵۵ و ۱۱۰ مرحله خواهد شد که عملیاتی نمودن آن به سادگی امکان‌پذیر نیست. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقدار برش مناسب برای دستیابی به بیش‌ترین مقدار غلظت ایزوتوپ هدف در آبشار طویل با آبشار کوتاه متفاوت است. در صورتی که آبشار کوتاه باشد، با استفاده از مطالعات پارامتریک می‌توان مناسب‌ترین برشی را که در آن غلظت ایزوتوپ موردنظر به بیشینه خود می‌رسد تعیین کرده و بیش‌ترین بهره را از آبشار موجود داشت. مقدار برش آبشار برای دستیابی به بیش‌ترین مقدار $Xe-129$ در یک آبشار ۲۰ مرحله‌ای برابر با ۰/۲ در فاکتور جداسازی ۱/۲ و ۰/۱۵ در فاکتور جداسازی ۱/۱ می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ایزوتوپ‌های پایدار، آبشار مربعی، برش آبشار، جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزئی، زینان

Investigation of the cut on the separation of xenon stable isotopes in the square cascade

F. Mansourzadeh¹, A.A. Ghorbanpour Khamseh^{1*}, J. Safdari¹, A. Norouzi², M. Khajenouri²

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

2. Iran Advanced Technologies Company, AEOI, P.O.Box: 143995-5931, Tehran-Iran

Research Article

Received 1.10.2020, Accepted 28.2.2021

Abstract

One of the important parameters in the square cascade, which has a great influence on its performance in the separation of multicomponent isotopes, is the cascade cut. In this research work, at first, the effect of cascade cut on the separation of xenon middle isotopes in a square cascade with 20 stages was studied. These studies were carried out for two cases in which the separation factor was 1.2 and 1.1. Moreover, the minimum length for creating a long cascade by changing the Z/F value and cascade cut has been determined. Based on the calculations, if the separation factor is 1.2 and 1.1, the minimum number of cascade stages will be 55 and 110, that's not simply possible. The results showed that the appropriate cascade cut in the long cascade is different from the short cascade. Using the parametric studies of the short cascade, it is possible to determine the most appropriate cascade cut in which the desired isotope concentration reaches its maximum. In order to maximize the amount of $Xe-129$ in a 20 stages cascade, the suitable cut is 0.2 in the separation factor of 1.2 and 0.15 in the separation factor of 1.1.

Keywords: Stable isotopes, Square cascade, Cascade cut, Multicomponent isotope separation, Xenon



۱. مقدمه

در سال‌های اخیر تقاضا برای دستیابی به ایزوتوپ‌های پایدار با غلظت بالا افزایش یافته است [۱]. بیش‌ترین کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار از جمله زینان در تولید رادیوایزوتوپ‌ها، استفاده در دستگاه MRI، پژوهش‌های فیزیک کاربردی، الکترونیک و صنعت هسته‌ای می‌باشد [۲، ۳]. روش‌های مختلفی برای جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی معرفی شده است [۴] که از میان آن‌ها استفاده از آبشار مربعی [۵، ۶]، یکی از متداول‌ترین این روش‌ها می‌باشد. به غیر از دو ایزوتوپ ابتدایی و انتهایی، جداسازی ایزوتوپ‌های میانی نیاز به رویکردی متفاوت داشته و برای غنی نمودن آن‌ها تا غلظت‌های بالا، چالش‌های زیادی وجود دارد. مطالعات و پژوهش‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که معمولاً برای هر ایزوتوپ طراحی و راه‌اندازی آبشار به‌طور مجزا صورت نمی‌گیرد؛ زیرا کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار متنوع و فراوان بوده و ممکن است در زمان‌ها و شرایط متفاوت نیاز به جدا کردن ایزوتوپ‌های عناصر مختلف باشد [۳، ۷، ۸]. همچنین ایزوتوپ موردنظر معمولاً باید تا بیش از ۹۵٪ غنی شود و از سوی دیگر، مقدار جرم موردنیاز از این ایزوتوپ نسبت به اورانیم بسیار کم‌تر بوده و در مقیاس کم‌تری تولید می‌شود. بنابراین طراحی یک آبشار جداگانه برای جداسازی هر ایزوتوپ از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست [۳، ۸]. با توجه به موارد اشاره شده، طراحی و ساخت آبشار در مصارف تجاری به سمتی پیش می‌رود که بتوان از یک آبشار در جداسازی گستره زیادی از ایزوتوپ‌های پایدار استفاده نمود. در این صورت آبشار را چندمنظوره یا انعطاف‌پذیر می‌نامند [۳، ۷]. در آبشارهای انعطاف‌پذیر، جهت غنی‌سازی ایزوتوپ‌های پایدار مختلف می‌توان خوراک ورودی به آبشار را به‌طور متناوب تغییر داد. در این حالت، علی‌رغم تکرار دفعات زیاد راه‌اندازی آبشار به منظور جدا نمودن ایزوتوپ‌های میانی، به استفاده از یک آبشار خاص نیاز نیست. در جداکردن ایزوتوپ‌های میانی لازم است تا ترکیب چندجزیی در خوراک را به دو گروه دسته‌بندی نمود. تابع D به عنوان معیاری جهت جداسازی دو گروه ایزوتوپی در آبشارهای طویل توسط زنگ و همکاران معرفی شده است [۸]. با این روش می‌توان ایزوتوپ‌ها را تا حد ممکن از طریق تنظیم برش آبشار به دو گروه دسته‌بندی کرد [۷، ۸]. با تنظیم برش آبشار که یکی از پارامترهای اصلی در جداسازی می‌باشد، یک یا چند ایزوتوپ سبک‌تر یا سنگین‌تر در چندبار راه‌اندازی آبشار حذف شده و ایزوتوپ میانی به عنوان ایزوتوپ انتهایی مطرح می‌شود تا جایی که غلظت ایزوتوپ میانی به مقدار مورد نیاز برسد [۷-۹]. در سال ۲۰۰۰، زنگ و همکاران تنها به بررسی اثر برش آبشار بر پارامتر D پرداختند و تغییرات غلظت در شرایط مختلف ارزیابی نشد [۸]. بر این اساس در صورتی که

در یک آبشار طویل برش آبشار برابر با مجموع غلظت ایزوتوپ‌ها در گروه سبک بوده و به عبارت دیگر، مقدار D برابر با یک باشد، می‌توان دو گروه ایزوتوپی را به‌طور کامل از یک‌دیگر جدا نمود. همچنین در سال ۲۰۱۴ اسمیرنوف و همکاران به بررسی تغییرات غلظت متناسب با برش در آبشار طویل پرداختند [۷]. منصورزاده و همکاران نیز در سال ۲۰۱۸ به بهینه‌سازی تابع هدف D در آبشار مخروطی و مقایسه نتایج با آبشار مربعی در فاکتور جداسازی بالا پرداختند [۱۰]. اما در حالتی که آبشار کوتاه و فاکتور جداسازی کم باشد، استفاده از پارامتر D به عنوان تنها مبنای جداسازی کافی نیست و مقدار برش مناسب آبشار باید محاسبه شود. نتایج ارائه شده در تمام مراجع مذکور، به محاسبات انجام گرفته در آبشار طویل می‌پردازد و در هیچ‌یک از آن‌ها، بررسی تغییرات غلظت و برش در آبشار کوتاه با فاکتور جداسازی کم مورد بررسی قرار نگرفته است.

در این مطالعه، هدف بررسی اثر برش آبشار بر تغییرات غلظت اجزاء میانی زینان در جریان‌های محصول و پسماند برای فاکتورهای جداسازی ۱/۲ و ۱/۱ در آبشار کوتاه می‌باشد. همچنین کم‌ترین طول آبشار مربعی جهت دسترسی به یک آبشار طویل با این ضرایب جداسازی تعیین می‌شود. در این پژوهش ابتدا یک آبشار مربعی با یک ساختار مشخص در ۲۰ مرحله برای جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی زینان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سپس نتایج به‌دست آمده از تغییرات غلظت ایزوتوپ موردنظر در جریان‌های محصول و پسماند، با تغییر تعداد مراحل و نسبت Z/F برحسب برش‌های مختلف بررسی شده و کم‌ترین طول آبشار جهت دسترسی به یک آبشار طویل با ضرایب جداسازی برای اختلاف جرم واحد ۱/۱ و ۱/۲ در آبشار مربعی تعیین شده و مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند. در ادامه نیز مجدداً در آبشارهای طویل، تغییرات غلظت ایزوتوپ موردنظر در جریان‌های محصول و پسماند با برش آبشار به منظور مقایسه صحیح با آبشار ۲۰ مرحله‌ای و نتیجه‌گیری مناسب بررسی می‌شود. در این پژوهش، بررسی‌ها در دو حالت برای ایزوتوپ چهارم و پنجم انجام شده است.

پارامترهای معلوم در این پژوهش عبارتند از نرخ جریان خوراک ورودی به مراحل آبشار، مقدار نرخ جریان خوراک اصلی آبشار و مرحله ورود آن به آبشار، ترکیب درصد اجزاء خوراک و فاکتور جداسازی برای اختلاف جرم واحد در مراحل. پارامترهای غلظت ایزوتوپ موردنظر در جریان محصول، جریان پسماند و مقدار تابع D متناسب با برش مراحل نیز باید تعیین شوند.



روابط ۹ تا ۱۲، پایستگی جرم در نقاط اختلاط جریان‌ها را نشان می‌دهد.

$$z_{i,n} Z_n - y_{i,n-1} M_{n-1} - x_{i,n+1} N_{n+1} = z_i^F F, \quad n = nf \quad (۸)$$

$$z_{i,n} Z_n - y_{i,n-1} M_{n-1} - x_{i,n+1} N_{n+1} = 0, \quad n \neq nf \quad (۹)$$

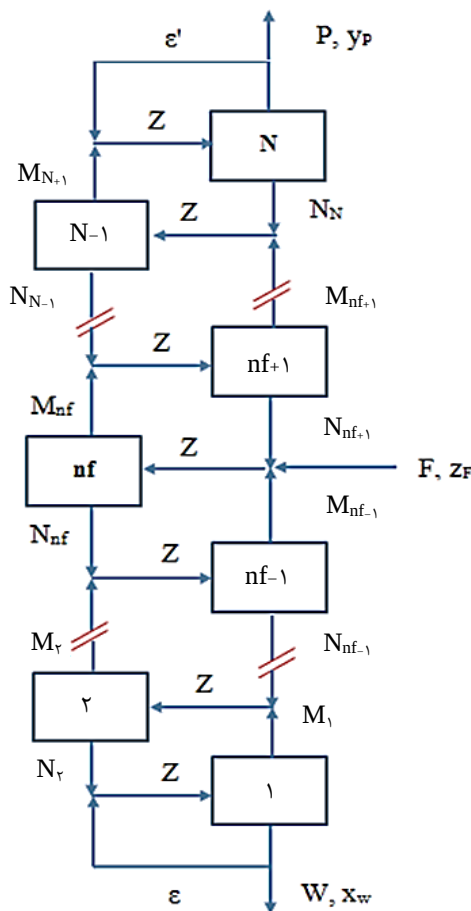
$$z_{i,n} Z_n - y_{i,n-1} M_{n-1} - y_{i,p} \varepsilon' = 0, \quad n = N \quad (۱۰)$$

$$z_{i,n} Z_n - x_{i,n+1} N_{n+1} - x_{i,w} \varepsilon = 0, \quad n = ۱ \quad (۱۱)$$

رابطه فاکتور جداسازی برای استفاده در آبشار جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی به فرم رابطه ۱۳ است و با کمک رابطه ۱۴ نیز، شرط محدودیت غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام مراحل اعمال می‌شود.

$$\alpha_{ij,n} = \frac{(y_{i,n}/y_{j,n})}{(x_{i,n}/x_{j,n})} = \alpha_{o,n}^{(M_j - M_i)} \quad (i = j - ۱, j = ۲, \dots, N_c) \quad (۱۲)$$

$$\sum_{i=1}^{N_c} z_{i,n} = \sum_{i=1}^{N_c} y_{i,n} = \sum_{i=1}^{N_c} x_{i,n} = ۱ \quad (۱۳)$$



شکل ۱. نمایی از یک آبشار مربعی با یک جریان خوراک و دو جریان پسماند و محصول.

۲. تئوری جداسازی و معادلات حاکم

در این بخش به بیان معادلات حاکم بر آبشار مربعی و تئوری‌های مورد استفاده در آن جهت جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی پرداخته می‌شود. پس از آن تابع D و ارتباط آن با برش آبشار بیان می‌گردد.

۱.۲ معادلات حاکم بر آبشار مربعی جهت جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی

نمایی از آبشار مربعی در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق رابطه ۱، در یک آبشار مربعی نرخ جریان ورودی به تمام مراحل ثابت بوده و مقدار آن در طول آبشار تغییر نمی‌کند [۴]. تعداد ایزوتوپ‌ها در جریان خوراک برابر N_c و تعداد کل مراحل آبشار برابر با N در نظر گرفته شده است. جریان خوراک با نرخ F در مرحله nf با غنای $z_{i,n}$ وارد آبشار می‌شود. جریان‌های میان مرحله‌ای با نرخ جریان M_n و N_n و ترکیب درصدهای $x_{i,n}$ و $y_{i,n}$ و جریان‌های پسماند و محصول W و P به ترتیب با ترکیب درصد $x_{i,w}$ و $y_{i,p}$ بیان می‌گردد ($i = ۱, ۲, \dots, N_c$). معادلات ۲ تا ۶ مربوط به موازنه جریان در تمام مراحل آبشار و نیز نقاط تلاقی جریان‌ها می‌باشند. در این روابط θ_n ، M_n و N_n به ترتیب به برش مرحله n ، نرخ جریان پیش‌رونده مرحله n ، نرخ جریان پس‌رونده مرحله n و نرخ جریان ورودی به مرحله n اشاره دارند. برش مراحل مطابق رابطه ۷ تعریف می‌شود. پارامترهای ε و ε' نیز به ترتیب بیان‌گر جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر می‌باشند [۱۱-۱۵].

$$Z_1 = Z_2 = \dots = Z_N = Z \quad (۱)$$

$$Z_n = M_{n-1} + N_{n+1}, \quad n \neq nf \quad (۲-الف)$$

$$Z_n = M_{n-1} + N_{n+1} + F, \quad n = nf \quad (۲-ب)$$

$$Z_N = M_{N-1} + \varepsilon' \quad (۳)$$

$$Z_1 = N_1 + \varepsilon \quad (۴)$$

$$N_n = (1 - \theta_n) Z_n, \quad n = ۱, \dots, N \quad (۵)$$

$$M_n = \theta_n Z_n, \quad n = ۱, \dots, N \quad (۶)$$

رابطه ۸ مربوط به پایستگی جرم برای جزء i ام ($i = ۱, ۲, \dots, N_c$) در مرحله n ام می‌باشد.

$$z_{i,n} Z_n - y_{i,n} M_n - x_{i,n} N_n = 0 \quad (۷)$$



مطابق رابطه ۲۰، اگر یک ترکیب ایزوتوپی چند جزیی به دو گروه سبک و سنگین تقسیم شوند، در صورتی که در یک آبشار طویل برش آبشار برابر با مجموع غلظت گروه سبک در بخش سبک محصول باشد، آن گاه می‌توان این دو گروه را به‌طور کامل از هم جدا نمود. به منظور ارزیابی این که دو گروه سبک و سنگین ایزوتوپ‌ها تا چه حدی از یکدیگر جدا می‌شوند، از تابع D استفاده می‌شود. این تابع به عنوان معیاری از جداسازی دو گروه ایزوتوپ‌ها توسط زنگ و همکاران مطرح شده است [۸]. بهترین مقدار برای این تابع عدد یک و مربوط به حالتی است که در آن دو گروه به‌طور کامل از یکدیگر جدا شوند. بیان ریاضی تابع D به‌صورت زیر است:

$$D = \frac{P}{F} \sum_{i=1}^{N'_c} y_{i,P} + \frac{W}{F} \sum_{i=N'_c+1}^{N_c} x_{i,W} \quad (20)$$

در حالتی که شرایط رابطه ۲۰ به‌طور هم‌زمان اجرا شوند، تابع D مطابق رابطه ۲۲ به مقدار بیشینه خود، یعنی یک، می‌رسد. بنابراین برای هر جزء میانی N'_c ، مقدار برشی وجود دارد که در آن جزء N'_c در صورت جداسازی کامل خوراک به گروه‌های سبک و سنگین به عنوان ایزوتوپ انتهایی مطرح می‌شود.

$$D = \frac{P}{F} \sum_{i=1}^{N'_c} y_{i,P} + \frac{W}{F} \sum_{i=N'_c+1}^{N_c} x_{i,W} = \frac{P+W}{F} = 1 \quad (21)$$

با توجه به موارد مطرح شده، اگر دو گروه سبک و سنگین به‌صورت جزیی یا کامل جدا شوند، مقدار تابع D همواره به‌صورت زیر خواهد بود:

$$D \leq 1 \quad (22)$$

علامت برابری در رابطه ۲۳ به جداسازی کامل دو گروه سبک و سنگین در جریان محصول و پسماند اشاره دارد.

۳. روش کار

تا زمانی که یک آبشار به اندازه کافی طویل باشد، امکان جداسازی مخلوط چند جزیی به دو گروه مجزا وجود دارد. از آن‌جا که امکان افزایش تعداد مراحل آبشار و نیز نسبت Z/F در شرایط عملیاتی و تا هر اندازه‌ای امکان‌پذیر نیست، لازم است تا نحوه تغییرات غلظت ایزوتوپ موردنظر با برش آبشار نیز مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان متناسب با برش آبشار، بیش‌ترین مقدار غلظت ایزوتوپ موردنظر را در جریان محصول فراهم نمود. در این مقاله به تعیین تعداد مراحل در آبشار طویل پرداخته می‌شود.

مراحل کار در این پژوهش شامل سه بخش است. ابتدا به بررسی اثر برش بر جداسازی ایزوتوپ‌های میانی گاز زینان در یک آبشار مربعی کوتاه ($N=20$ ، $Z/F=10$ و $n_f=10$) پرداخته

۲.۲ برش آبشار و اثر آن بر جداسازی ایزوتوپ‌ها

به منظور جداسازی اجزای میانی، باید ایزوتوپ‌ها را به دو گروه تقسیم کرد به‌طوری‌که ایزوتوپ میانی مطلوب به عنوان ایزوتوپ انتهایی یکی از گروه‌ها مطرح شود [۴، ۷-۹]. اگرچه در آبشارهای طویل، با تنظیم برش آبشار (P/F) می‌توان به راحتی دو گروه را به‌طور کامل از یکدیگر جدا نمود، جداسازی در آبشارهای کوتاه پیچیده است [۸، ۷]. در این روش بسته به این که کدام ایزوتوپ موردنظر است، در صورتی که ایزوتوپ هدف در گروه سنگین قرار گیرد به عنوان سبک‌ترین جزء در آن گروه مطرح می‌شود و اگر در گروه سبک قرار گیرد، به عنوان سنگین‌ترین جزء در آن گروه می‌باشد. بنابراین در صورتی که بتوان دو گروه را به‌طور کامل از یکدیگر جدا نمود، ایزوتوپ میانی در گروه سبک یا سنگین به عنوان ایزوتوپ انتهایی مطرح می‌شود. بیش‌ترین غلظت قابل استحصال ممکن برای جزء میانی با شماره N'_c در جریان محصول آبشار با توجه به رابطه ۱۵ برآورد می‌شود [۸]:

$$(y_{N'_c}^P)_{\lim} = \frac{Z_{N'_c}^F}{\sum_{i=1}^{N'_c} Z_i^F} \quad (14)$$

هنگامی که ایزوتوپ N'_c در جریان سنگین آبشار غنی می‌شود، برای ارزیابی بیش‌ترین غلظت قابل استحصال در آن می‌توان از رابطه ۱۶ استفاده کرد:

$$(x_{N'_c}^W)_{\lim} = \frac{Z_{N'_c}^F}{\sum_{i=N'_c+1}^{N_c} Z_i^F} \quad (15)$$

رابطه پایستگی کلی و جزیی جریان‌های خارجی در آبشار به ترتیب زیر هستند:

$$P+W=F \quad (16)$$

$$Py_{i,P} + Wx_{i,W} = Fz_{i,F} \quad (17)$$

در صورتی که آبشار به اندازه کافی طویل باشد، ترکیب چند جزیی در دو گروه سبک و سنگین به صورت کامل از یکدیگر جدا می‌شوند که در جریان محصول، تنها اجزای ۱، ۲، ...، N'_c غنی می‌شوند و در جریان پسماند، فقط اجزای N'_c+1 ، N'_c+2 ، ...، N_c قرار می‌گیرند. در این شرایط پس از ترکیب N'_c معادله اول از رابطه‌های ۱۸ و با در نظر گرفتن شرایط رابطه ۱۹، روابط ۲۰ قابل محاسبه می‌باشند [۸-۷]:

$$\sum_{i=1}^{N'_c} y_{i,P} \rightarrow 1, \sum_{i=1}^{N'_c} x_{i,W} \rightarrow 0 \quad (18)$$

$$\frac{P}{F} = \sum_{i=1}^{N'_c} z_i^F, \frac{W}{F} = \sum_{i=N'_c+1}^{N_c} z_i^F \quad (19)$$



۴. نتایج و بحث

نرخ جریان خوراک ورودی به آشبار (F)، نسبت جریان ورودی به مراحل به خوراک آشبار (Z/F)، تعداد مراحل کل آشبار (N)، مرحله ورود خوراک به آشبار و غلظت ایزوتوپ‌های زینان در خوراک در جدول‌های ۱ و ۲ گزارش شده است.

۴.۴ بررسی عملکرد آشبار مربعی در جداسازی ایزوتوپ‌های میانی زینان با تغییر برش آن

در ابتدا بررسی‌ها برای دو حالت با فاکتور جداسازی $1/2$ و $1/1$ به منظور افزایش غلظت ایزوتوپ چهارم در جریان محصول یک آشبار مربعی با 20 مرحله انجام شد. در این شرایط انتظار می‌رود که در برش 0.2854 مقدار تابع D و غلظت ایزوتوپ چهارم به بیشینه ممکن برسد. همان‌طور که در شکل ۲ برای آشبار مربعی با فاکتور جداسازی برابر با $1/1$ مشاهده می‌شود، اگرچه در برش آشبار برابر با 0.2854 مقدار D بیشینه شده است، غلظت ایزوتوپ چهارم در این برش به بیشینه خود نمی‌رسد. در این شرایط بیش‌ترین مقدار قابل محاسبه برای D برابر 0.86804 می‌باشد. در حالتی که فاکتور جداسازی برابر با $1/2$ در نظر گرفته شود، مطابق شکل ۳ مقدار بیشینه D برابر با 0.95676 خواهد بود که در این حالت، مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم در برش آشبار برابر با 0.2854 به بیش‌ترین مقدار خود نمی‌رسد. بنابراین با فاکتورهای جداسازی $1/2$ و $1/1$ ، تعداد مراحل 20 و نسبت Z/F برابر 10 نمی‌توان انتظار داشت که دو گروه ایزوتوپی به‌طور کامل در یک بار راه‌اندازی آشبار از یکدیگر جدا شوند. به عبارت دیگر، آشبار با چنین مشخصاتی را نمی‌توان آشبار طولیل در نظر گرفت. بنابراین در این صورت باید با توجه به امکانات موجود، محصول به‌دست آمده را مجدداً به عنوان خوراک به آشبار وارد نموده و غنی‌سازی را برای آن انجام داد. در ضمن نکته قابل توجه در این نمودارها این است که در آشبار با 20 مرحله، به منظور بیشینه بهره‌وری از آشبار می‌توان مقدار برش آن را برابر 0.2 برای فاکتور جداسازی $1/2$ و 0.15 برای فاکتور جداسازی $1/1$ در نظر گرفت. در این صورت اگر برش آشبار مطابق شکل ۲ برابر با 0.15 باشد، مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم نسبت به حالتی که برش آشبار برابر با 0.2854 است، در محصول از 0.7 به 0.75 تغییر می‌کند. در شکل ۳ نیز مقدار غلظت در برش 0.2854 برابر با 0.8 و در برش 0.2 برابر با 0.85 می‌شود. این محاسبات مجدداً برای ایزوتوپ پنجم انجام شده است. شکل‌های ۴ و ۵ نیز تغییرات غلظت ایزوتوپ پنجم و مقدار D را بر اساس تغییرات برش آشبار نشان می‌دهند. در این مورد مقدار برشی که در آن D بیشینه است برابر با 0.3262 می‌باشد، اما در این برش مقدار غلظت ایزوتوپ پنجم در جریان محصول به بیشینه خود نمی‌رسد.

جدل ۱. مشخصات اصلی ماشین و آشبار برای استفاده در محاسبات

نرخ خوراک آشبار / نرخ خوراک ورودی به مراحل	تعداد مراحل	مرحله ورود خوراک	نرخ خوراک آشبار (gr/hr)
۱۰	۲۰	۱۱	۸۰

شده است. این مطالعات برای دو حالت که فاکتور جداسازی ماشین سانتریفیوژ برابر $1/2$ و $1/1$ باشد، انجام گرفته است. پس از آن نتایج با بررسی‌های انجام گرفته در آشبار طولیل مقایسه شد. در این راستا نیز کم‌ترین طول برای ایجاد یک آشبار طولیل با تغییر نسبت Z/F و تعداد مراحل آشبار با این دو فاکتور جداسازی تعیین شد؛ به این ترتیب که نسبت Z/F و تعداد مراحل آشبار در یک گستره مشخص به ترتیب برای α های $1/1$ و $1/2$ تغییر داده شد تا برش‌هایی که در آن مقدار تابع D در آشبار مربعی و میزان غلظت ایزوتوپ موردنظر بیشینه است، بررسی شوند. با تغییر تعداد مراحل آشبار و نسبت Z/F در مقادیر مختلف برش آشبار، تغییرات غلظت ایزوتوپ موردنظر بررسی می‌شود. در هریک از این شرایط، مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم برای آشبار با برش‌های 0.1 ، 0.15 ، 0.2 ، 0.25 ، 0.26 ، 0.27 و 0.2854 مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. در تمام بررسی‌های انجام گرفته در آشبار مربعی با فاکتورهای جداسازی $1/2$ و $1/1$ ، نسبت Z/F و تعداد مراحل به ترتیب در محدوده $5-20$ و $20-120$ تغییر داده شده است. بدین ترتیب پس از بررسی تمام موارد فوق، در نقطه‌ای که مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم در آشبار با برش 0.2854 (مجموع غلظت چهار ایزوتوپ اول در خوراک) نسبت به دیگر برش‌ها به بیشینه خود برسد، آشبار طولیل با طول کافی قابل محاسبه می‌باشد.

در شبیه‌سازی آشبار مربعی نیز با فرض این که برش مراحل در بخش تهی‌سازی از رابطه ۲۳ محاسبه شوند، می‌توان نرخ تمام جریان‌ها را محاسبه نمود. از آن جاکه آشبارهای مربعی بر اساس مقدار برش مراحل حالت‌های مختلفی را دارند، در این پژوهش آشبار مربعی که برش مراحل تهی‌سازی آن از رابطه ۲۳ محاسبه شود، استفاده شده است [۷-۸، ۱۳-۱۴]. در این حالت تغییرات برش مراحل آشبار به دو مقدار محدود می‌شود و در نتیجه پیاده‌سازی آن از نظر عملیاتی راحت‌تر است.

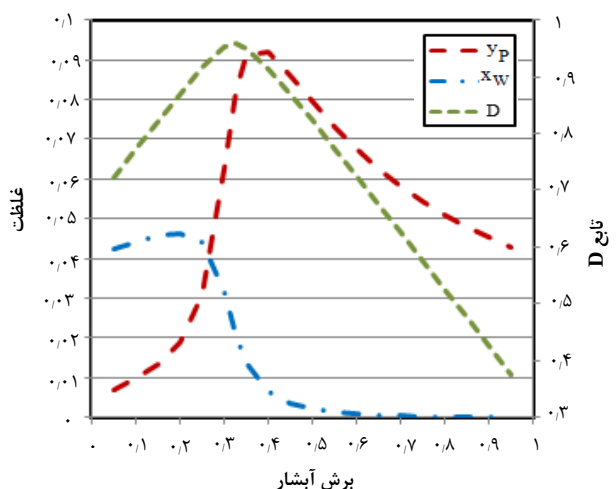
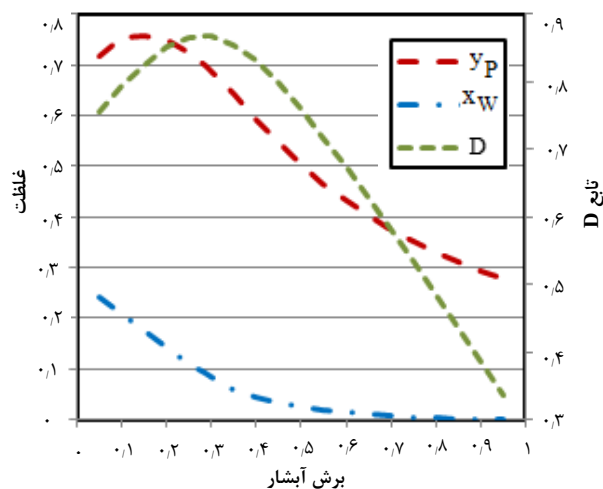
$$\theta = 0.5 \left(1 - \frac{W}{Z} \right) \quad (23)$$

سپس مقدار غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام مراحل با توجه به نرخ جریان‌های به دست آمده تعیین می‌شود [۱۵-۱۶]. پس از محاسبه نرخ جریان و غلظت تمام ایزوتوپ‌ها در مراحل مختلف، مقدار پارامتر D از رابطه ۲۱ محاسبه شده و تغییرات غلظت ایزوتوپ موردنظر در برش‌های مختلف آشبار و همچنین مراحل آشبار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

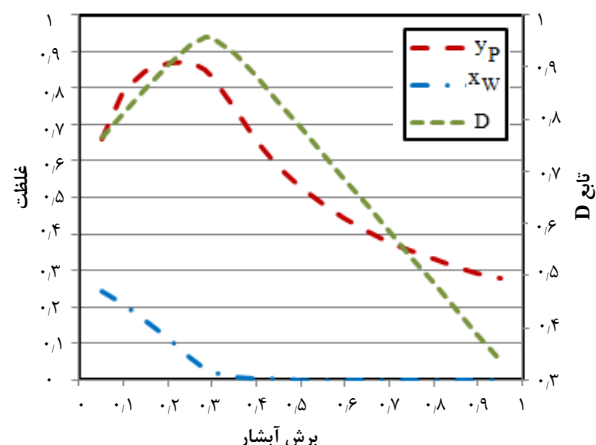
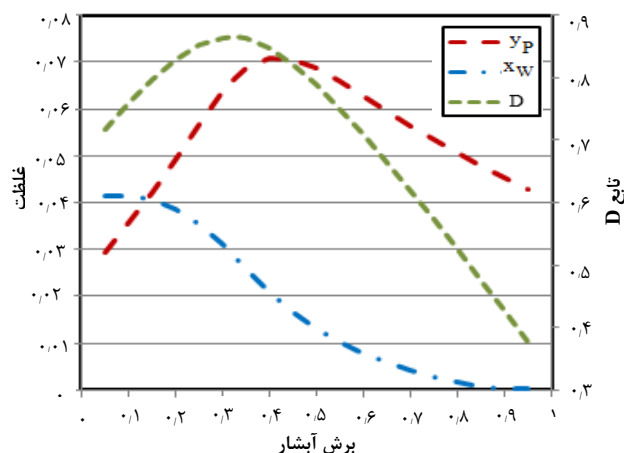


جدول ۲. غلظت ایزوتوپ‌های زینان طبیعی در جریان خوراک آبشار [۸]

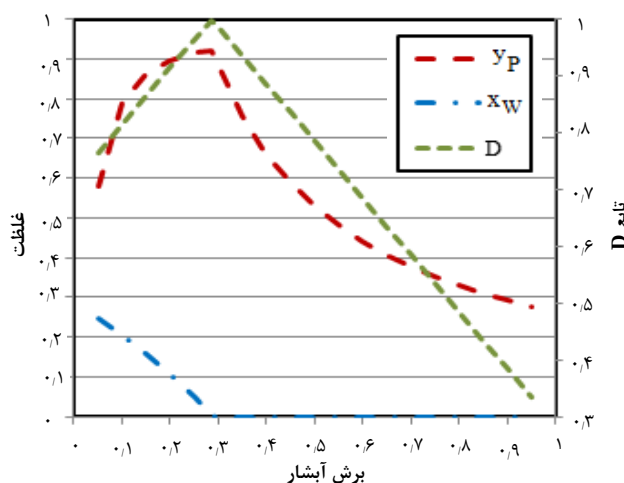
شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
ایزوتوپ	Xe-۱۲۴	Xe-۱۲۶	Xe-۱۲۸	Xe-۱۲۹	Xe-۱۳۰	Xe-۱۳۱	Xe-۱۳۲	Xe-۱۳۴	Xe-۱۳۶
غلظت (%)	۰/۰۹۳	۰/۰۹	۱/۹۱۷	۲۶/۴۴	۴/۰۸	۲۱/۱۸	۲۶/۸۹	۱۰/۴۴	۸/۸۷


 شکل ۵. تغییرات تابع D ، غلظت ایزوتوپ پنجم در جریان محصول و پسماند در آبشار ۲۰ مرحله‌ای با فاکتور جداسازی ۱/۲.

 شکل ۲. تغییرات تابع D ، غلظت ایزوتوپ چهارم در جریان محصول و پسماند در آبشار ۲۰ مرحله‌ای با فاکتور جداسازی ۱/۱.

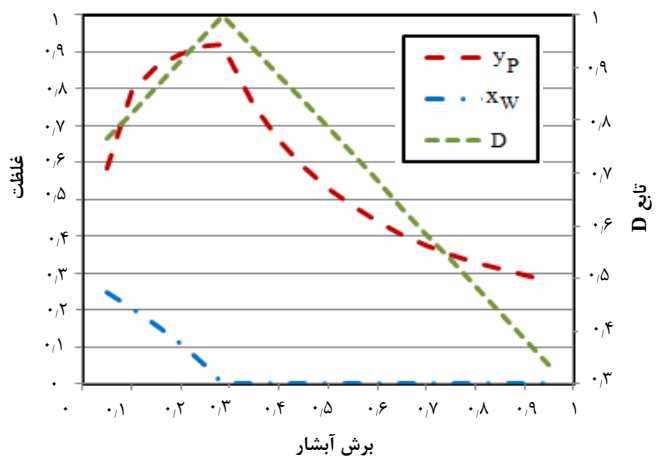
۲.۴ تعیین کم‌ترین تعداد مراحل و نسبت Z/F در یک آبشار مربعی طویل بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد مراحل آبشار و نسبت Z/F ، مقدار برش در آبشار که در آن غلظت ایزوتوپ چهارم به بیشینه خود می‌رسد، به $۰/۲۸۵۴$ نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر همان‌طور که پیش‌تر نیز مطرح شد، در صورتی که تعداد مراحل آبشار و نسبت Z/F از مقدار مشخصی کمتر باشند، نمی‌توان انتظار داشت که غلظت ایزوتوپ چهارم در برش آبشار برابر با $۰/۲۸۵۴$ به بیشینه خود برسد. یعنی تنها در یک آبشار طویل با طول مناسب می‌توان چنین انتظاری داشت. در شکل ۶ الف تغییرات غلظت ایزوتوپ چهارم برای تعداد مراحل مختلف آبشار با نسبت‌های Z/F برای آبشار در دو برش متفاوت نشان داده شده است. در شکل ۶ ب نیز مشابه ۶ الف، تغییرات برای برش‌های دیگر آبشار ارائه شده است. در این مورد فاکتور جداسازی برابر با $۱/۲$ می‌باشد. همان‌طور که از برآیند دو نمودار قابل ملاحظه است، آبشار با تعداد مراحل بیش‌تر از ۵۵ و نسبت Z/F بیش‌تر از ۱۱، کمینه شرایط ممکن برای ایجاد یک آبشار طویل را فراهم می‌کند. زیرا برای اعداد بزرگ‌تر، مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم در برش $۰/۲۸۵۴$ نسبت به سایر برش‌ها بیش‌تر می‌شود اما در مقادیر کم‌تر از آن، تعداد مراحل و نسبت Z/F مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم در برش‌های کم‌تر بیش‌ترین مقدار را دارد. مطابق شکل ۷ نیز که تغییرات تنها برای دو برش ترسیم شده است، در صورتی که فاکتور جداسازی برابر با $۱/۱$ باشد، برای مراحل بیش‌تر از ۱۱۰ و با نسبت Z/F بیش‌تر از ۱۲ دسترسی


 شکل ۳. تغییرات تابع D ، غلظت ایزوتوپ چهارم در جریان محصول و پسماند در آبشار ۲۰ مرحله‌ای با فاکتور جداسازی ۱/۲.

 شکل ۴. تغییرات تابع D ، غلظت ایزوتوپ پنجم در جریان محصول و پسماند در آبشار ۲۰ مرحله‌ای با فاکتور جداسازی ۱/۱.


در ادامه تغییرات غلظت ایزوتوپ چهارم در جریان محصول، پسماند و مقدار D برای آبشارهای طویل نشان داده شده‌اند. شکل ۸ مربوط به آبشار با تعداد ۵۵ مرحله و نسبت Z/F برابر ۱۱، با فاکتور جداسازی ۱/۲ می‌باشد. از مقایسه این شکل با نمودار شکل ۳ ملاحظه می‌شود که مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم دقیقاً در برش آبشار برابر با ۰/۲۸۵۴ به بیشینه مقدار خود در جریان محصول می‌رسد. در این حالت مقدار بیشینه غلظت ایزوتوپ چهارم در جریان محصول برابر با ۰/۹۲۲۱ می‌باشد. شکل ۹ نیز مربوط به آبشار با تعداد ۱۱۰ مرحله، نسبت Z/F برابر ۱۲ و فاکتور جداسازی ۱/۱ می‌باشد. از مقایسه این شکل با نمودار شکل ۲، ملاحظه می‌شود که مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم دقیقاً در محصول در برش آبشار برابر با ۰/۲۸۵۴ به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در این حالت نیز بیشینه مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم در جریان محصول برابر با ۰/۹۲۱۰ می‌باشد. همین کار برای حالتی که ایزوتوپ پنجم در جریان محصول مدنظر باشد نیز انجام شده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات غلظت ایزوتوپ پنجم و مقدار D را بر اساس تغییرات برش آبشار برای فاکتورهای جداسازی ۱/۲ و ۱/۱ نشان می‌دهند. در این موارد مقدار برشی که در آن D بیشینه است برابر با ۰/۳۲۶۲ می‌باشد.

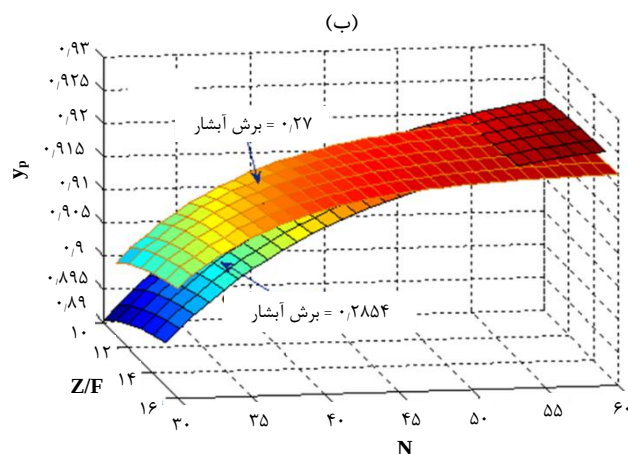
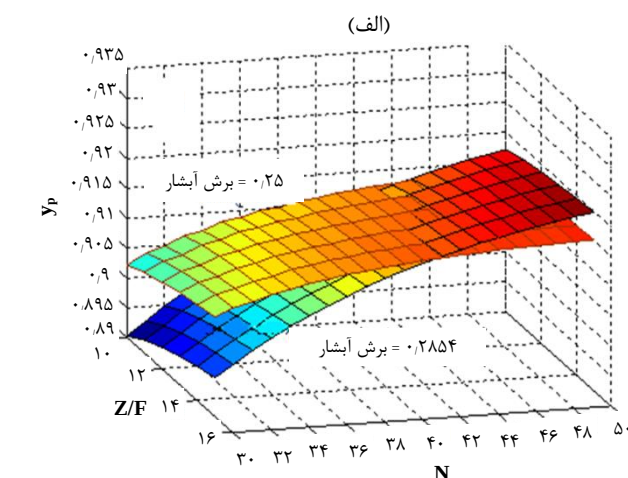


شکل ۸. تغییرات غلظت ایزوتوپ چهارم و مقدار D (۵۵ N ، $Z/F=11$ ، $\alpha_0=1/2$).

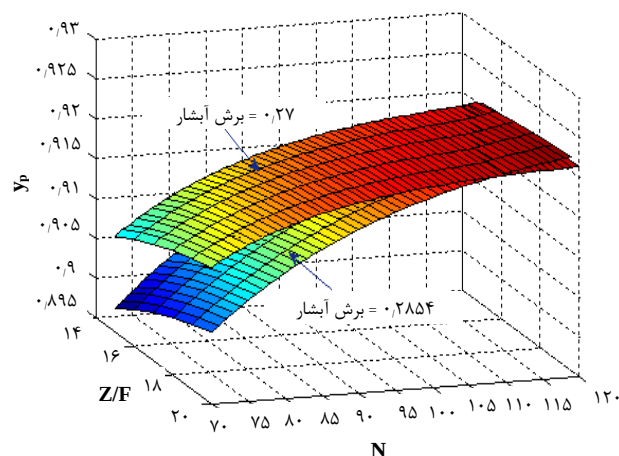


شکل ۹. تغییرات غلظت ایزوتوپ چهارم و مقدار D (۱۱۵ N ، $Z/F=12$ ، $\alpha_0=1/1$).

به آبشار طویل با کمینه شرایط ممکن فراهم می‌باشد. به عبارت دیگر، در شرایطی که آبشار طویل دسترسی خواهیم داشت که مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم در برش ۰/۲۸۵۴ نسبت به دیگر مقادیر برش به بیشترین مقدار خود برسد.



شکل ۶. تعیین مشخصات آبشار طویل در فاکتور جداسازی ۱/۲ با قطع برش‌های الف) ۰/۲۵ و ۰/۲۸۵۴ (ب) ۰/۲۷ و ۰/۲۸۵۴ برای جزء چهارم.



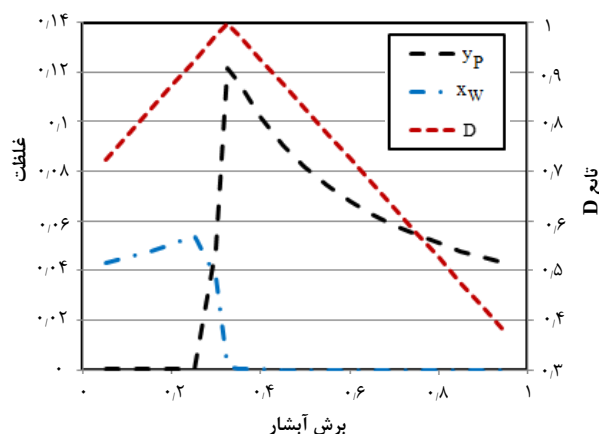
شکل ۷. تعیین مشخصات آبشار طویل در فاکتور جداسازی ۱/۱ با قطع برش‌های ۰/۲۷ و ۰/۲۸۵۴ برای جزء چهارم.



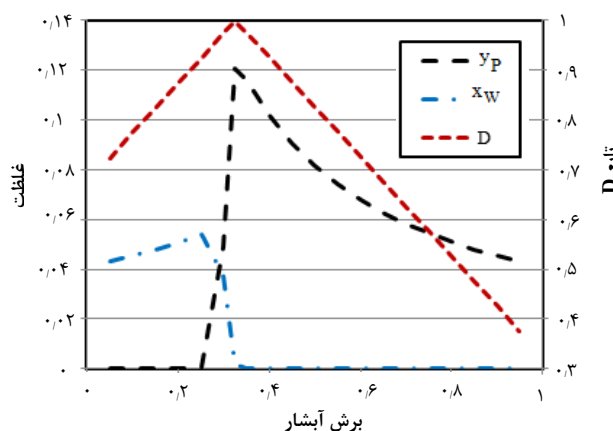
محصول یا پسماند در آبشاری با تعداد مراحل کم‌تر و وارد نمودن مجدد آن به عنوان خوراک به آبشار نسبت به استفاده از یک آبشار با تعداد مراحل بسیار زیاد به صرفه‌تر است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد جداسازی آبشار مربعی برای غنی‌سازی جزء میانی زینان با تغییر برش آبشار تحت شرایط مشخص از نظر نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار و محل ورود آن به آبشار مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که برخلاف محاسبات انجام شده توسط زنگ و همکاران [۸] که در آبشار طولیل (می‌توان با افزایش تعداد مراحل و نسبت Z/F به آبشار طولیل دست یافت) هم‌زمان با افزایش تابع D مقدار غلظت ایزوتوپ موردنظر در جریان محصول نیز به بیش‌ترین مقدار ممکن خود می‌رسد، در آبشار کوتاه باید مقدار برش مناسب را برای دستیابی به بیش‌ترین غلظت از ایزوتوپ هدف محاسبه کرد و مقدار برشی که در آن غلظت ایزوتوپ موردنظر به بیشینه خود می‌رسد، متفاوت از مجموع غلظت ایزوتوپ‌ها در جریان خوراک است. بررسی‌ها برای ایزوتوپ چهارم زینان نشان می‌دهد با توجه به این‌که در فاکتورهای جداسازی $۱/۲$ و $۱/۱$ ، آبشار با ۲۰ مرحله به اندازه کافی طولانی نیست، در برش آبشار $۰/۲۸۵۴$ که مقدار تابع D در آن بیشینه است، مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم بیشینه نبوده و می‌توان به منظور بیش‌ترین بهره‌وری از آبشار، مقدار برش آن را برابر $۰/۲$ برای فاکتور جداسازی $۱/۲$ و $۰/۱۵$ برای فاکتور جداسازی $۱/۱$ در نظر گرفت. در این صورت اگر برش آبشار برابر با $۰/۱۵$ باشد، مقدار غلظت ایزوتوپ چهارم در محصول نسبت به حالتی که برش آبشار برابر با $۰/۲۸۵۴$ است از $۰/۷۰$ به $۰/۷۵$ تغییر می‌کند. در آبشار با فاکتور جداسازی $۱/۲$ نیز مقدار غلظت در برش $۰/۲۸۵۴$ برابر با $۰/۸$ و در برش $۰/۲$ برابر با $۰/۸۵$ می‌شود.



شکل ۱۰. تغییرات غلظت ایزوتوپ پنجم و مقدار D ($N=58$, $Z/F=12$) ($\alpha_0=1/2$).



شکل ۱۱. تغییرات غلظت ایزوتوپ پنجم و مقدار D ($N=115$, $Z/F=17$) ($\alpha_0=1/1$).

از آن‌جا که عملیاتی کردن آبشارهایی با تعداد مراحل بالا جهت استفاده از ماشین‌های سانتریفیوژ به سادگی امکان‌پذیر نیست، بهتر است از آبشارهایی با تعداد مراحل کم‌تر استفاده شود. به خصوص در شرایطی که فاکتور جداسازی ماشین سانتریفیوژ کم باشد، دستیابی به آبشار طولیل با طول مناسب نیازمند استفاده از ماشین‌های سانتریفیوژ به تعداد بسیار زیاد است که منجر به تحمیل هزینه بسیار سنگین خواهد شد. علاوه بر هزینه ساخت بسیار بالا، مقدار خوراک مورد نیاز در این آبشار جهت راه‌اندازی آن نیز به شدت افزایش می‌یابد [۱۷] که به هیچ عنوان به صرفه نیست. از سوی دیگر با افزایش تعداد مراحل آبشار، نه تنها هزینه‌های ثابت و عملیاتی سنگینی به سازندگان تحمیل می‌شود، بلکه اختلاف چشمگیری در مقدار غلظت ایزوتوپ موردنظر در جریان محصول نیز ایجاد خواهد شد. به عنوان مثال در صورتی که فاکتور جداسازی برابر $۱/۲$ باشد، بیشینه غلظت قابل دستیابی برای ایزوتوپ چهارم زینان در آبشار طولیل با ۵۵ مرحله برابر ۹۲% و در آبشار با ۲۰ مرحله برابر ۸۵% درصد می‌باشد. بنابراین خارج کردن ایزوتوپ موردنظر از جریان

مراجع

1. M. Ragheb, *Isotopic Separation and Enrichment, Nuclear, Plasma and Radiation Science: Inventing the Future*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Nuclear, Plasma, (2012).
2. A. Kudziev, *Production and application of stable enriched isotopes in the USSR*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **282**, 267-270 (1989).
3. C. Mol, H. Rakhorst, *Production of stable isotopes at Urenco: 10 years of progress*, Journal of Radio Analytical and Nuclear Chemistry, **257**, 165-168 (2003).
4. G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich, *Cascades for separation of multicomponent isotope mixtures*, Separation Science and Technology, **36**, 1769-1817 (2001).
5. M. Benedict, T.H. Pigford, H.W. Levi, *Nuclear Chemical Engineering*, (McGraw-Hill series in nuclear engineering), (1957).
6. S. Villani, *Enrichment of uranium*, Moscow: Energoatomizdat, (1983).
7. A.Y. Smirnov, G. Sulaberidze, *Features of mass transfer of intermediate components in square gas centrifuge cascade for separating multicomponent mixtures*, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, **48**, 629-636 (2014).
8. S. Zeng, C. Ying, *A method of separating a middle component in multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge cascades*, Separation Science and Technology, **35**, 2173-2186 (2000).
9. R. Raichura, M. Al-Janabi, G. Langbein, *The effects of the 'key' molar mass on the design of a cascade handling a multi-isotopic mixture*, Annals of Nuclear Energy, **18**, 327-356 (1991).
10. F. Mansourzadeh, et al, *Comparison of optimum tapered cascade and optimal square cascade for separation of xenon isotopes using enhanced TLBO algorithm*, Separation Science and Technology, (2018).
11. V. Borisevich, Y.V. Litvin, G. Sulaberidze, *Calculational study of the enrichment of cadmium isotopes in gas centrifuges*, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, **41**, 851-858 (2007).
12. I. Filippov, G. Sulaberidze, V. Chuzhinov, *Orthogonal-collocation calculation of fractionation cascades*, Atomic Energy, **72**, 29-34 (1992).
13. L. Kholpanov, et al, *On the calculation of a squared-off cascade for multicomponent isotope separation*, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, **37**, 359-365 (1998).
14. D. Potapov, G. Sulaberidze, L. Kholpanov, *Designing a rectangular sectioned cascade by approximating the separation factor*, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, **34**, 129-133 (2000).
15. H. Wu, C. Ying, G. Liu, *Calculational methods for determining the distribution of components in a separation cascade for multicomponent mixture*, Separation Science and Technology, **33**, 877 (1998).
16. S. Zeng, C. YING, *A robust and efficient calculation procedure for determining concentration distribution of multicomponent mixtures*, Separation Science and Technology, **35**, 613-622 (2000).
17. G. Popov, et al, *Centrifugal enrichment of chromium-50 for experiments on detecting solar neutrinos*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **362**, 532-537 (1995).

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، علی اصغر قربانیپور، سیدجابر صفدری، علی نوروزی، مجید خواجه‌نوری (۱۴۰۰)، بررسی اثر برش بر جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار میانی گاز زینان در آبشار مربعی، ۹۵، ۷۳-۸۱

DOI: 10.24200/nst.2021.1187

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1187.html

