



## مقایسه عملکرد یک آبشار مدل تطبیق یافته R با شرایط بهینه آن برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار زینان

فاطمه منصورزاده<sup>۱</sup>، سید جابر صفدری<sup>۱</sup>، علی اصغر قربانپور خمسه<sup>۱\*</sup>، علی نوروزی<sup>۲</sup>، مجید خواجه‌نوری<sup>۲</sup>

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: ۹۸/۴/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۹/۲۹

### چکیده

در این پژوهش برای اولین بار با استفاده از خوراک طبیعی زینان، عملکرد یک آبشار مدل تطبیق یافته R با شرایط بهینه آن در حالتی که تعداد مراحل، نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار، فاکتور جداسازی و نرخ بهینه خوراک ورودی به هر ماشین مشخص و ثابت باشد، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پارامترهای محاسبه شده عبارتند از نرخ جریان ورودی و خروجی مراحل، ظرفیت جداسازی آبشار، تعداد ماشین‌های استفاده شده در هر مرحله و برش مراحل در دو حالت بهینه و غیربهینه. الگوریتم استفاده شده در بهینه‌سازی، الگوریتم بر مبنای آموزش و یادگیری (TLBO) بوده و تابع هدف به صورت تابعی از توان جداسازی برای تک ماشین و پارامتر تطبیق یافته R در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که توان جداسازی در حالت بهینه نسبت به حالت غیربهینه بیش تر است. توان جداسازی در شرایط تطبیق یافته برای جزءهای «اول و سوم» و «دوم و سوم» در حالت بهینه به ترتیب ۱٪ و ۹٪ بیش تر از حالت غیربهینه می‌باشد. همچنین یک کد محاسباتی با عنوان MISCC برای تعیین پارامترهای آبشار در شرایط بهینه و غیربهینه ارائه شده که از آن برای تجزیه و تحلیل آبشار تطبیق یافته R استفاده می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** ایزوتوپ‌های پایدار، آبشار تطبیق یافته مدل R، توان جداسازی، بهینه‌سازی، آبشار بهینه تطبیق یافته R

## Performance comparison of match abundance ratio cascade with optimal conditions for the separation of stable xenon isotopes

F. Mansourzadeh<sup>1</sup>, J. Safdari<sup>1</sup>, A.A. Ghorbanpour Khamseh<sup>\*1</sup>, A. Noroozy<sup>2</sup>, M. Khajenoori<sup>2</sup>

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

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

### Research Article

Received 5.7.2019, Accepted 20.12.2019

### Abstract

In the present study, for the first time the R cascade under normal and optimal conditions with the constant and specified total number of cascade stages, the feed flow rate to the cascade, the factor of separation based on the unit mass difference, and the maximum and optimal of the feed flow into the centrifuge machine is assessed. The algorithm used for optimization is TLBO algorithm and the objective function is considered as a function of separation work for a single machine and match abundance ratio. The results show that in the cascade with the match abundance ratio for isotopes  $k_1$  and  $k_2$  the separation work in optimal cascade is more than conventional. If the abundance ratio is adapted for two pair of components, i.e., the "first and third" and the "second and third", the separation power in the optimal mode for the first and second cases is 1% and 9% more than those of conventional, respectively. Finally, a computational code named MISCC is written to determine and analyze the parameters of the match abundance ratio cascade in optimal and normal conditions.

**Keywords:** Stable isotopes, Match abundance ratio cascade, Separation work, Optimization, Optimum match abundance ratio cascade



## ۱. مقدمه

امروزه کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار در علوم مختلف از جمله داروسازی، پزشکی و صنعت جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است [۱-۲]. ایزوتوپ‌های پایدار را براساس کاربردشان می‌توان به ایزوتوپ‌های صنعتی، پزشکی (تشخیص، درمان و تسکین بیماری)، کشاورزی و تحقیقاتی طبقه‌بندی نمود [۳]. لازم به ذکر است که جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار با توجه به اهمیت و کاربرد فراوان آن‌ها در داخل کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تئوری جداسازی مخلوط ایزوتوپ‌های چندجزیی به دلیل لزوم بررسی و محاسبات مربوط به اثر همه ایزوتوپ‌ها بر جداسازی ایزوتوپ هدف، پیچیده بوده و در مقایسه با جداسازی مخلوط‌های دوجزیی (مثل اورانیم) دارای ابعاد گسترده‌تری می‌باشد. برخلاف سبک‌ترین و سنگین‌ترین ایزوتوپ‌ها که در طول آبشار<sup>۱</sup> رفتار یکنواختی را دارند و هر کدام به سمت خروجی محصول و پسماند در حال افزایش‌اند، غنی‌سازی اجزاء میانی به ترکیب درصد مخلوط بستگی دارد. تاکنون مدل‌های مختلفی برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار معرفی شده است. در ابتدا آبشار تطبیق‌یافته مدل<sup>۲</sup> R توسط دلاگازا برای جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی اورانیم مطرح شد [۴]. آبشار تطبیق‌یافته<sup>۳</sup> X نیز اولین بار توسط دلاگازا و همکاران در سال ۱۹۶۱ معرفی گردید [۵]. تئوری آبشار<sup>۴</sup> Q توسط کوچرو و مینکو در سال ۱۹۶۵ مورد مطالعه قرار گرفت [۶]. آبشار شبه ایده‌آل<sup>۵</sup> اولین بار توسط ایلمد لهر و ایلبلات در سال ۱۹۶۸ معرفی گردید [۷]. پس از آن پارامترهای مربوط به هر یک از آبشارهای مدل اشاره شده در فوق توسط پژوهشگران زیادی جهت جداسازی ایزوتوپ‌های مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند که در هر یک از آن‌ها، فرض‌هایی جهت اعمال شرایط جداسازی در نظر گرفته شده است. به‌عنوان مثال در سال ۲۰۱۰ تیان مین سونگ و همکاران با تغییر پارامتر<sup>۶</sup> M\* در جداسازی ایزوتوپ‌های کریبتون، امکان تعیین جریان میان‌مرحله‌ای کمینه در آبشار تطبیق‌یافته را بررسی کرده‌اند [۸]. هم‌چنین آبشار تطبیق‌یافته R با آبشاری که کم‌ترین جریان میان‌مرحله‌ای دارد توسط سولابریدز و همکاران مقایسه شده است [۹]. آبشار تطبیق‌یافته R با چند جریان خروجی و یا ورودی نیز به‌منظور جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی اورانیم توسط پژوهشگران مورد بررسی

قرار گرفته است [۱۰-۱۲]. در هیچ‌یک از این موارد از روش‌های بهینه‌سازی استفاده نشده است و با تغییر یک پارامتر، کمینه نمودن جریان میان‌مرحله‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. بهینه‌سازی پارامترهای آبشار اولین بار توسط پالکین مورد مطالعه قرار گرفت [۱۳]. پارامترهای یک آبشار بهینه<sup>۶</sup> متناسب با تابع هدف موردنظر تعیین می‌شوند که از میان آن‌ها می‌توان به کاهش نرخ جریان کل میان‌مرحله‌ای<sup>۷</sup> در آبشار، افزایش توان جداسازی در آبشار و یا کاهش تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ اشاره نمود [۱۴-۱۵]. تاکنون هیچ تعریف مشخصی از آبشار بهینه در فرایند جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی ارایه نشده است [۱۶]. بنابراین بررسی بیشتر و معرفی آبشاری جدید با عملکردی بهتر مستلزم انجام محاسبات پیچیده و پژوهش‌های فراوان است.

در پژوهش حاضر، برای اولین بار عملکرد جداسازی یک آبشار مدل تطبیق‌یافته R با شرایط بهینه آن برای دو جزء کلیدی  $k_1$  و  $k_2$  با استفاده از خوراک زینان طبیعی، تحت شرایط یکسان از لحاظ تعداد کل مراحل آبشار، مرحله ورود خوراک به آبشار و غلظت و نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. برای تعیین پارامترهای آبشار تطبیق‌یافته R در شرایط بهینه و غیربهینه، یک کد محاسباتی با عنوان MISC<sup>۸</sup> نوشته شده است. این کد از دو بخش مجزا جهت شبیه‌سازی و تعیین پارامترهای آبشار تطبیق‌یافته R در شرایط بهینه و معمولی تشکیل شده است. در این کد از الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای آموزش و یادگیری<sup>۹</sup> (TLBO) برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود. هم‌چنین جهت حل معادلات غیرخطی در آبشار مدل R غیربهینه از روش حل ناحیه اطمینان<sup>۱۰</sup> به‌منظور همگرایی بهتر در کد استفاده شده است. دو جزء  $k_1$  و  $k_2$  در این بررسی اجزاء «اول و سوم» و «دوم و سوم» انتخاب شده‌اند.

## ۲. تئوری

در این بخش به بیان معادلات حاکم بر آبشار جداسازی و تئوری‌های مورد استفاده در آن جهت جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی با مدل R پرداخته می‌شود. پس از آن، آبشار بهینه و تابع هدف تعریف شده در این تحقیق معرفی می‌گردد.

6. Optimum Cascade  
7. Total Flow Rate  
8. Multi-component Isotope Separation Cascade Code  
9. Teaching Learning Based Optimization  
10. Trust Region

1. Cascade  
2. Matched Abundance Ratio Cascade  
3. Match Abundance X Cascade  
4. Q Cascade  
5. Quasi Ideal Cascade



باشد،  $M_i < M_j$  است. همچنین  $\alpha_{i,n}$  فاکتور جداسازی کلی برای اختلاف جرم واحد ( $M_j - M_i = 1$ ) می باشد. اگرچه مقدار  $\alpha_{i,n}$  می تواند از یک مرحله به مرحله دیگر تغییر کند، با این حال برای سادگی روش حل، این مقدار ثابت و برابر  $\alpha$  در نظر گرفته می شود. با کمک رابطه ۱۱ نیز شرط محدودیت غلظت ایزوتوپها در تمام مراحل اعمال می شود.

$$\sum_{i=1}^{N_c} z_{i,n} = \sum_{i=1}^{N_c} y_{i,n} = \sum_{i=1}^{N_c} x_{i,n} = 1 \quad (11)$$

**۲.۲ آبشار تطبیق یافته مدل R**

آبشار تطبیق یافته مدل R برای دو جزء  $k_1$  و  $k_2$  که در آن جرم مولی جزء  $k_1$  از جزء  $k_2$  بیش تر است، مطرح می شود. متناسب با پارامترهای موجود در آبشار، جزء  $k_1$  و ایزوتوپهای سبک تر از آن در بخش محصول غنی می شوند. جزء  $k_2$  و ایزوتوپهای سنگین تر از آن نیز در بخش پسماند غنی می شوند. در این آبشار شرط انطباقی زیر بین نسبت های فراوانی اجزاء  $k_1$  و  $k_2$  در یک نقطه تلاقی در نظر گرفته می شود [۱۶-۲۰]:

$$R'_{(k_1, k_2), n-1} = R''_{(k_1, k_2), n+1} = R_{(k_1, k_2), n} \quad (12)$$

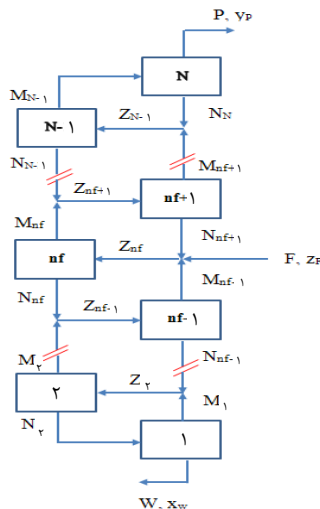
که در آن:

$$R_{(k_1, k_2)} = \frac{z_{k_1}}{z_{k_2}} \quad (13)$$

$$R'_{(k_1, k_2)} = \frac{y_{k_1}}{y_{k_2}} \quad \text{و} \quad R''_{(k_1, k_2)} = \frac{x_{k_1}}{x_{k_2}}$$

با در نظر گرفتن جداسازی به شکل مقارن بین جزءهای  $k_1$  و  $k_2$  خواهیم داشت:

$$\beta_{(k_1, k_2)} = \gamma_{(k_1, k_2)} \quad (14)$$



۱.۲ معادلات حاکم بر آبشارهای جداسازی ایزوتوپهای چندجزیی یک آبشار برای جداسازی سیستم چندجزئی در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۷]. تعداد اجزاء برابر  $N_c$  و تعداد مراحل آبشار برابر  $N$  است. جریان خوراک با نرخ  $F$  در مرحله  $nf$  با غنای  $z_F$  وارد آبشار می شود. جریان های میان مرحله ای با نرخ جریان  $M_n$  و  $N_n$  و ترکیب درصدهای  $x_{i,n}$  و  $y_{i,n}$  و جریان های پسماند و محصول  $W$  و  $P$  با ترکیب درصد  $x_w$  و  $y_p$  بیان می گردد

$$M_n = \theta_n Z_n, n = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$N_n = (1 - \theta_n) Z_n, n = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$Z_{n+1} = M_n + N_{n+1}, n = 1, \dots, N - 2, n \neq nf \quad (3)$$

$$Z_n = M_{n-1} + N_{n+1} + F, n = nf \quad (4)$$

$$Z_N = M_{N-1} \quad (5)$$

$$Z_1 = N_2 \quad (6)$$

( $i=1, 2, \dots, N_c$ ). رابطه های ۱ تا ۶ مربوط به موازنه جریان در تمام مراحل آبشار و نیز نقاط تلاقی در گره ها می باشند. در این روابط  $\theta_n, M_n, N_n$  و  $Z_n$  به ترتیب به برش مرحله  $n$  نرخ جریان محصول مرحله  $n$  نرخ جریان پسماند مرحله  $n$  و نرخ جریان ورودی به مرحله  $n$  اشاره دارند.

رابطه ۷ مربوط به پایستگی جرم برای جزء  $i$ ام ( $i=1, 2, \dots, N_c$ )، در هر مرحله است [۱۶ و ۱۷]:

$$z_{i,n} Z_n - y_{i,n} M_n - x_{i,n} N_n = 0 \quad (7)$$

پایستگی جرم در نقاط اختلاط جریانها با رابطه ۸ نشان داده می شود:

$$z_{i,n} Z_n - y_{i,n-1} M_{n-1} - x_{i,n+1} N_{n+1} = \delta(n, nf) z_{i,F} F \quad (8)$$

$$\delta(n, nf) = \begin{cases} 0, & (n \neq nf) \\ 1, & (n = nf) \end{cases} \quad (9)$$

رابطه فاکتور جداسازی در آبشار جداسازی چندجزیی به فرم رابطه ۱۰ می باشد:

$$\alpha_{ij,n} = \frac{(y_{i,n} / y_{j,n})}{(x_{i,n} / x_{j,n})} = \alpha_{i,n}^{(M_j - M_i)}, (i = j - 1, j = 2, \dots, N_c) \quad (10)$$

در این رابطه،  $i$  همان جزء کلیدی است که معمولاً به عنوان جزء سبک تر در نظر گرفته می شود.  $M_j$  و  $M_i$  به ترتیب جرم مولکولی جزءهای  $i$  و  $j$  می باشند. اجزاء طوری مرتب شده اند که اگر  $i < j$



شکل ۱. نمایی از یک آبخار متقارن جریان برگشتی با یک جریان خوراک و دو جریان پسماند و محصول [۱۷].  
که تعریف  $\beta$  و  $\gamma$  برابر است با:

$$\beta_{(k_1, k_2)} = \frac{y_{k_1}/y_{k_2}}{z_{k_1}/z_{k_2}} \quad (15)$$

$$\gamma_{(k_1, k_2)} = \frac{z_{k_1}/z_{k_2}}{x_{k_1}/x_{k_2}} \quad (16)$$

در این حالت با تجمیع شرط انطباقی و الزام تقارن برای هر مرحله، رابطه ۱۷ برقرار است:

$$\beta_{(k_1, k_2)} = \gamma_{(k_1, k_2)} = \sqrt{\alpha_{(k_1, k_2)}} \quad (17)$$

### ۳.۲ آبخار بهینه تطبیق یافته R

آبخار بهینه تطبیق یافته R به آبخاری اشاره دارد که در درجه اول، شرایط تطبیقی برای دو ایزوتوپ مورد نظر در جریان خوراک ورودی به مراحل را مطابق رابطه ۱۲ داشته باشد؛ این شرط دقیقاً مطابق با شرایط آبخار مدل تطبیق یافته R است. هم چنین آبخار تطبیق یافته R در حالت بهینه نسبت به آبخار مدل R غیر بهینه دارای توان جداسازی بیشتری و در عین حال نرخ جریان های میان مرحله ای کمتری است. توان جداسازی و نرخ جریان های میان مرحله ای از پارامترهای مهم در طراحی آبخار هستند. هر چه مقدار نرخ کل جریان های میان مرحله ای در آبخار کاهش بیشتری داشته باشد، نه تنها هزینه مرتبط با مقدار خوراک طبیعی مصرفی به نسبت کاهش موجودی در آبخار کم تر می شود، بلکه تعداد ماشین های سانتریفیوژ مورد استفاده نیز کم می شوند که از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است. افزایش توان جداسازی در آبخار نیز بدین معناست که ماشین سانتریفیوژ بیشترین توان جداسازی را برای جداسازی ایزوتوپ مورد نظر فراهم نموده است.

### ۴.۲ الگوریتم بهینه سازی بر مبنای آموزش و یادگیری<sup>۱</sup>

یکی از الگوریتم های مورد استفاده برای انجام محاسبات بهینه سازی، الگوریتم بهینه سازی بر مبنای آموزش و یادگیری (TLBO) است. در این قسمت به معرفی این الگوریتم و در نهایت معرفی تابع هدف پرداخته می شود. الگوریتم TLBO بر مبنای آموزش دانش آموزان در کلاس درس می باشد و از دو فاز آموزش و یادگیری تشکیل می شود [۲۱-۲۲].

### ۱.۴.۲ فاز آموزش

یک گام در ارتقاء سطح علمی دانش آموزان در هر کلاس این است که معلم دانش آموزان را تا حد ممکن به سطح علمی خود نزدیک کند. در این فاز  $T_i$ ،  $M_i$  به ترتیب به عنوان معلم و میانگین جمعیت در تکرار  $i$ ام تعریف می شوند. معلم  $T_i$  تلاش می کند تا میانگین  $M_i$  را به سطح خود برساند. بنابراین معلم می تواند مقدار میانگین را از سطح اولیه  $M_i$  به سطح جدید میانگین برساند. بنابراین راه حل در این روش بر اساس اختلاف بین میانگین فعلی و میانگین جدید با استفاده از رابطه زیر ادامه پیدا می کند:

$$Mean_i = r_i(M_{new} - T_i M_i) \quad (18)$$

در این رابطه  $r_i$  یک عدد تصادفی بین صفر تا یک است و  $T_F$  نیز فاکتور آموزش است که در هر تکرار یکی از اعداد ۱ و ۲ را به خود اختصاص می دهد.  $Mean_i$  از رابطه (۱۸) مقادیر بردار جمعیت  $X_{old,i}$  را با استفاده از رابطه (۱۹) به  $X_{new,i}$  در تکرار  $i$ ام منتقل می کند. در تکرار اول، معلم عبارت است از بردار جمعیتی که بهترین مقدار تابع هدف را به خود اختصاص داده است. بنابراین  $T_i = M_{new}$

$$X_{new,i} = X_{old,i} + Mean_i \quad (19)$$

### ۲.۴.۲ فاز یادگیری

گام دیگر در ارتقاء سطح علمی دانش آموزان در کلاس درس، ارتباط بین آن هاست؛ به طوری که دانش آموزانی که سطح علمی بالاتری دارند دانش آموز با کیفیت پایین تر را به سطح خود برسانند. دانش آموزان سطح علمی خود را از طریق ارتباط با یکدیگر، جلسات و سمینارها به طور تصادفی ارتقاء می دهند. در این فاز به شکل تصادفی دو بردار جمعیت انتخاب می شوند. اگر  $f(X_i) < f(X_j)$ ، یعنی بردار جمعیت  $X_j$  بهتر از بردار جمعیت  $X_i$  می باشد. به عبارت دیگر، مقدار تابع هدف  $X_j$  از مقدار تابع هدف  $X_i$  بیشتر است. در این حالت از رابطه ۲۰ برای تولید بردار جمعیت جدید استفاده می شود و در غیر این صورت از رابطه ۲۱ استفاده می شود.

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r_i(X_i - X_j) \quad (20)$$

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r_i(X_j - X_i) \quad (21)$$



توان جداسازی نیز طبق رابطه ۲۵ قابل محاسبه است که در آن پارامترهای  $Z_{i,F}$  و  $Y_{i,P}$ ،  $X_{i,W}$  به ترتیب به مقدار غلظت ایزوتوپ نام در جریان پسماند، محصول و خوراک آشبار اشاره دارند [۱۶-۱۵]. در این روش، مقدار تابع ارزش از رابطه ۲۶ به دست می آید که در آن  $C$  کسر وزنی هر یک از اجزاء در جریان خوراک، محصول و یا پسماند و  $\Delta M$  اختلاف جرم اتمی می باشد.

$$(26) V(c_1, c_2, \dots, c_{N_c}) = \left( \frac{\Delta M_{N_c,1}}{\Delta M_{k_1 k_2}} \right)^2 (c_{k_1} - c_{k_2})$$

$$\ln(c_{k_1} / c_{k_2}) + \sum_{k=1, k \neq k_1, k_2}^{N_c} \left( \frac{\Delta M_{N_c,1}}{\Delta M_{kk_1}} \right)^2 c_k \ln(c_k / c_{k_1})$$

### ۳. روش کار

#### ۳.۱ روش تعیین پارامترهای آشبار تطبیق یافته R

در الگوریتم آشبار تطبیق یافته مدل R، ابتدا نرخ جریان کل مراحل براساس رابطه های ۱ تا ۶ حدس زده می شود. سپس غلظت ایزوتوپ های زینان در تمام مراحل آشبار، با توجه به نرخ جریان های به دست آمده از حدس اولیه تعیین می شود. با توجه به رابطه بین غلظت هر ایزوتوپ در محصول و پسماند هر مرحله که در رابطه ۱۱ به آن اشاره شد، معادلات غلظت یک دسته معادلات غیرخطی می باشند و روش های مختلفی برای حل آن ها ارائه شده است [۲۳-۲۵]. در این پژوهش از روش تکرار  $Q^1$  استفاده می شود [۲۵]. پس از آن با استفاده از روش های ریاضیاتی که مربوط به حل معادلات غیرخطی است، با کمک روابط ارائه شده در معادلات ۷ تا ۱۱ و ۱۷، شرایط آشبار تطبیق یافته مدل R برای دو ایزوتوپ  $k_1$  و  $k_2$  محاسبه می شود. در کد تهیه شده، جهت حل معادلات غیرخطی از الگوریتم حل عددی ناحیه اطمینان استفاده شده است. در الگوریتم آشبار مدل R، پارامتر  $\varepsilon$  به عنوان شرط پایان الگوریتم با استفاده از رابطه ۲۷ تعیین می شود و مقدار آن باید کم تر از  $10^{-7}$  باشد. توضیحات کامل در این رابطه در مرجع [۱۶] آمده است.

$$(27) \varepsilon = m_{n \in N} \left( \left| \frac{Z_n^{(n_i)} - Z_n^{(n_i-1)}}{Z_n^{(n_i)}} \right|, \left| \frac{M_n^{(n_i)} - M_n^{(n_i-1)}}{M_n^{(n_i)}} \right|, \left| \frac{N_n^{(n_i)} - N_n^{(n_i-1)}}{N_n^{(n_i)}} \right|, \left| \sum_{i \in N_c} z_{i,n}^{(n_i)} - 1 \right|, \left| \sum_{i \in N_c} y_{i,n}^{(n_i)} - 1 \right|, \left| \sum_{i \in N_c} x_{i,n}^{(n_i)} - 1 \right| \right)$$

در این فاز نیز متناسب با روابط ارائه شده، مقادیر بردارهای جمعیت تغییر می کنند و فازهای یک و دو تا تعداد تکرار مشخصی ادامه می دهند تا به شرایط بهینه برسند. متناسب با بیشترین

#### ۳.۴.۲ تابع هدف

یکی از معیارهای اصلی انتخاب تابع هدف در یک آشبار، ظرفیت جداسازی کل به تعداد ماشین های استفاده شده  $\left( \frac{\delta U}{n} \right)$  در آن آشبار می باشد. از آن جا که در این پژوهش، مدل انتخابی برای تحلیل عملکرد آشبار در حالت بهینه، مدل تطبیق یافته R انتخاب شده است لذا برقرای شرایط مدل مربوطه  $(R'_{(k_1, k_2), n-1} = R''_{(k_1, k_2), n+1} = R_{(k_1, k_2), n})$  هم زمان با بیشینه نمودن  $\left( \frac{\delta U}{n} \right)$  در تعمیم تابع هدف نهایی الزامی است. بنابراین تابع هدف، مطابق رابطه ۲۲ تعریف شده است که رابطه مستقیمی با شرط تطبیق یافته R و توان جداسازی دارد.

$$(22) Object\_Function = f(Match\_R, \delta U)$$

با توجه به تأثیر وزنی هر یک از این پارامترها، رابطه خطی ۲۳ با ضرایب ۱۰۰۰ برای شرط تطبیق یافته R و ۱ برای کار جداسازی به منظور تعیین تابع هدف در نظر گرفته شد:

$$(23) Object\_Function = 1000 \cdot Match\_R + \delta U / n$$

در رابطه فوق  $n$  بیان گر تعداد ماشین های سانتریفیوژ در آشبار است.  $\delta U$  مقدار توان جداسازی در کل آشبار و Match\_R شرط تطبیق یافته برای دو جزء  $k_1$  و  $k_2$  در تمام مراحل است که از رابطه ۲۴ به دست می آید:

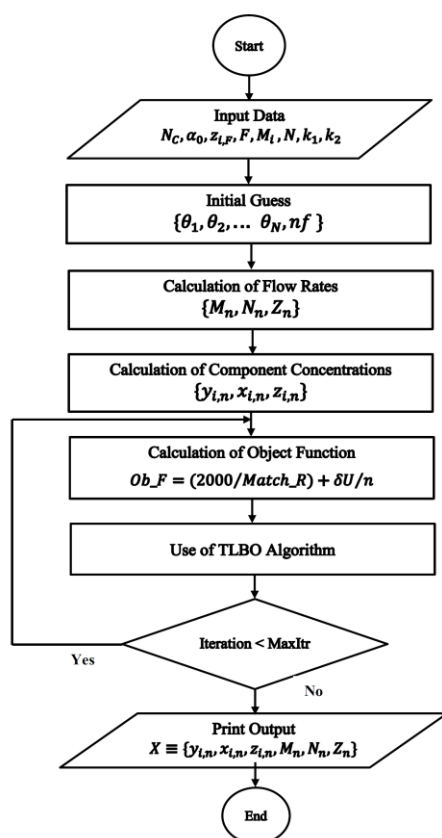
$$(24) Match\_R = 1 / \sum_{n=2}^{N-1} \left( \left| R_{(k_1, k_2), n} - R'_{(k_1, k_2), n-1} \right| + \left| R_{(k_1, k_2), n} - R''_{(k_1, k_2), n+1} \right| + \left| R''_{(k_1, k_2), n+1} - R'_{(k_1, k_2), n-1} \right| \right)$$

$$(25) \delta U = P_{V,P} V_{P,c} \cdot Y_{P,c} \cdot \left( \sum_{i \in N_c} x_{i,W} \cdot x_{i,W} \cdot x_{i,W} \right) - N \cdot FV \cdot (z_{W,c} \cdot z_{i,c} \cdot z_{N_c,F})$$



استفاده از الگوریتم آبشار تطبیق یافته R در شرایط بهینه، محل ورود خوراک تعیین شده و کد برای هر دو حالت بهینه و غیر بهینه اجرا می شود. سپس، نتایج مربوط به غلظت ایزوتوپها، برش مراحل، نرخ جریانهای میان مرحله ای، توان جداسازی، تعداد ماشینهای سانتریفیوژ در هر مرحله و شرایط تطبیق یافته R برای آبشار مدل با حالت بهینه مقایسه می گردند. تعداد ماشینهای سانتریفیوژ در هر مرحله نیز از تقسیم نرخ جریان ورودی به مراحل به نرخ خوراک بهینه ماشین قابل محاسبه است.

برای آبشار تطبیق یافته R در شرایط بهینه و غیر بهینه، از خوراک گاز زینان طبیعی استفاده شده است. نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار ( $F$ )، پارامتر جداسازی بر مبنای اختلاف جرم واحد ( $\alpha$ )، تعداد مراحل کل آبشار ( $N$ ) و نرخ بهینه خوراک برای هر ماشین سانتریفیوژ به ترتیب برابر با  $15$ ،  $1$ ،  $1$  و  $80$  g/h در نظر گرفته شده است. غلظت ایزوتوپهای زینان در خوراک نیز در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲. الگوریتم مورد استفاده در تعیین پارامترهای آبشار بهینه تطبیق یافته R.

جدول ۱. غلظت ایزوتوپهای زینان طبیعی در جریان خوراک آبشار.

شماره ایزوتوپ	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
---------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---

تعداد مجهولات موجود در تعیین تمام پارامترهای آبشار عبارتند از  $3N_c$  مجهول به ازای غلظت ایزوتوپها در جریانهای ورودی،

پسماند و محصول ۵  
1. Q Iteration

ورودی و خروجی هر تمام مراحل برابر با  $(3N_c+3)N$  است اما تعداد معادلاتی که از معادلات ۷ تا ۱۱ به دست می آید برابر با  $(3N_c+2)N$  می باشد. حال در صورتی که هدف، ایجاد آبشار با شرایط تطبیق یافته مدل R باشد، با استفاده از رابطه ۱۷ برای دو جزء  $k_1$  و  $k_2$  در تمام مراحل،  $N$  معادله دیگر نیز تولید می شود. بدین ترتیب با کمک روشهای حل عددی می توان به آبشار تطبیق یافته R دست یافت.

۲.۲ روش تعیین پارامترهای آبشار تطبیق یافته R در شرایط بهینه ابتدا با حدس اولیه مقادیر برش برای تمام مراحل و محل ورود خوراک، نرخ جریان مراحل تعیین می شود. رابطه ۲۸ بردار متغیرها را که در محاسبات بهینه سازی مورد استفاده و اصلاح قرار می گیرد، نشان می دهد. در بردار متغیرها،  $N$  درایه اول مربوط به برش مراحل است و درایه آخر مربوط به محل ورود خوراک می باشد. در ابتدای محاسبات بهینه سازی، این بردار به شکل تصادفی انتخاب می شود که پس از محاسبه نرخ جریانها و غلظت ایزوتوپها در مراحل مختلف طی فرایند بهینه سازی، اصلاح شده و به سمت بهترین مقادیری که در آن تابع هدف بیشترین مقدار را دارد حرکت می کند.

$$Pop = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n, \dots, \theta_N, nf] \quad (28)$$

با نوشتن مقادیر  $M_n$ ،  $N_n$  برحسب برش مراحل  $\theta_n$  و جایگذاری رابطه های ۱ و ۲ در روابط ۳ و ۴ تمام معادلات برحسب برش، نرخ جریان خوراک آبشار و همچنین مرحله ورود خوراک آبشار قابل محاسبه هستند. بنابراین در روش مربوط به آبشار بهینه با حدس اولیه برای مقادیر برش و محل ورود خوراک، می توان نرخ تمام جریانها را محاسبه نمود. سپس با مقدار غلظت ایزوتوپها در تمام مراحل براساس حدس اولیه به دست می آید. در الگوریتم بهینه سازی آبشار تطبیق یافته R نیز، از روش Q جهت محاسبه غلظت ایزوتوپها در تمام مراحل آبشار استفاده می شود. همان طور که در الگوریتم شکل ۲ نشان داده شده است، این محاسبات برای تعدادی تکرار معین تا زمانی که بهینه سازی پایان یابد، انجام می شود.

مراحل کار در این تحقیق به این ترتیب است که ابتدا با



کل در آن نسبت به آبشار مدل R کم تر می باشد. محل ورود خوراک در آبشار بهینه برابر با ۱۱ به دست آمده که در آبشار تطبیق یافته R نیز این مقدار برای آن در نظر گرفته می شود. در حالت بهینه، مقدار نرخ جریان محصول و پسماند آبشار نسبت به خوراک با نرخ ۸۰ g/h به ترتیب برابر با ۱۸/۳ g/h و ۶۱/۷ g/h می باشد؛ در حالی که مقدار نرخ جریان محصول و پسماند برای آبشار مدل R به ترتیب برابر با ۱۴/۰۴ g/h و ۶۵/۹۶ می باشد. تعداد کل ماشین های سانتریفیوژ در شرایط بهینه برابر ۱۷۰ و در آبشار مدل R برابر با ۱۷۱ می باشد. مشخصات و پارامترهای به دست آمده برای آبشار تطبیق یافته R بر اساس جزء دوم و سوم گاز زینان برای شرایط بهینه و غیر بهینه در جدول ۳ گزارش شده است.

به منظور مقایسه بهتر دو آبشار بهینه و غیر بهینه، در جدول ۴ غلظت ایزوتوپ های زینان در جریان محصول و پسماند برای آبشار R با شرط تطبیق یافته دو جزء ۲ و ۳ نشان داده است. همان طور که از تعریف آبشار تطبیق یافته R برای دو جزء ۲ و ۳ برمی آید، انتظار می رود تا ایزوتوپ های اول و دوم در جریان محصول و ایزوتوپ های سوم تا نهم در جریان پسماند غنی شوند.

نام ایزوتوپ	Xe- ۱۲۳	Xe- ۱۲۶	Xe- ۱۲۸	Xe- ۱۲۹	Xe- ۱۳۰	Xe- ۱۳۱	Xe- ۱۳۲	Xe- ۱۳۴	Xe- ۱۳۶
غلظت ایزوتوپ (%wt)	۰/۰۹۳	۰/۰۹	۱/۹۱۷	۲۶/۴۴	۴/۰۸	۲۱/۱۸	۲۶/۸۹	۱۰/۴۴	۸۸/۷

۴. نتایج و بحث

۴.۱. مقایسه نتایج و عملکرد آبشار تطبیق یافته R با شرایط بهینه برای دو جزء دوم و سوم گاز زینان ( $k_1=2, k_2=3$ )  
 در صورتی که شرایط تطبیق یافته R برای دو ایزوتوپ دوم و سوم مدنظر باشد، مقدار توان جداسازی در حالت بهینه برابر (SWU) ۷۲۷ به دست آمده است که نسبت به توان جداسازی در آبشار مدل R (SWU) ۷۰۳/۴۳، ۹٪ بیش تر است. در این حالت توان جداسازی به ازای هر ماشین سانتریفیوژ حدود ۴/۲۷ SWU/mach محاسبه و این مقدار در آبشار مدل R برابر با ۴/۱۱ SWU/mach می باشد. در شرایط بهینه، مقدار کل جریان میان مرحله ای ۳۵۴۴/۹ g/h به دست آمد و در آبشار مدل R این مقدار برابر با ۳۵۶۱/۴ g/h بوده است (جدول ۲). بنابراین آبشار R به گونه ای بهینه شده است که نه تنها شرایط آبشار مدل R در آن برقرار است، بلکه مقدار توان جداسازی آن نسبت به آبشار مدل بیش تر بوده و هم چنین دبی جریان میان مرحله ای

جدول ۲. پارامترهای اصلی آبشار برای شرط تطبیق یافته برای دو جزء دوم و سوم گاز زینان.

توان جداسازی آبشار		نرخ جریان میان مرحله ای کل		توان جداسازی هر ماشین		برش آبشار	
آبشار بهینه R	آبشار R	آبشار بهینه R	آبشار R	آبشار بهینه R	آبشار R	آبشار بهینه R	آبشار R
۷۲۷	۷۰۳/۴۳	۳۵۴۴/۹	۳۵۶۱/۴	۴/۲۷	۴/۱۱	۰/۲۲۸۸	۰/۱۷۵۵

جدول ۳. مشخصات و پارامترهای به دست آمده آبشار برای دو جزء دوم و سوم گاز زینان.

شماره مرحله	R' - R''		برش هر مرحله			تعداد ماشین	
	آبشار بهینه R	آبشار R	آبشار بهینه R	آبشار R	آبشار بهینه R	آبشار R	
۱	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۰	۰/۳۹	۵	۵	
۲	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۳۹	۰/۴۰	۸	۹	
۳	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۱	۰/۴۰	۱۰	۱۱	
۴	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۳۹	۰/۴۰	۱۲	۱۳	
۵	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۲	۰/۴۰	۱۳	۱۴	
۶	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۳۹	۰/۴۱	۱۴	۱۵	
۷	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۱	۰/۴۱	۱۴	۱۵	
۸	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۱	۰/۴۱	۱۵	۱۶	
۹	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۳۹	۰/۴۱	۱۵	۱۶	
۱۰	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۳	۰/۴۱	۱۵	۱۶	
۱۱	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۸	۰/۴۱	۱۸	۱۷	
۱۲	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۴	۰/۴۲	۱۴	۱۱	
۱۳	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۰	۰/۴۲	۹	۷	
۱۴	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۴	۰/۴۳	۵	۴	
۱۵	<۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۱	۰/۴۳	۳	۲	



آمد. در حالی که مقدار نرخ جریان محصول و پسماند برای آبشار مدل R به ترتیب  $13/34 \text{ g/h}$  و  $66/66 \text{ g/h}$  تعیین گردید. تعداد کل ماشین‌های سانتریفیوژ در شرایط بهینه برابر  $154$  و در آبشار مدل R برابر با  $156$  می‌باشد.

مقادیر غلظت ایزوتوپ‌های زینان در جریان‌های خوراک، پسماند و محصول آبشار برای حالت‌های بهینه و غیربهینه در شرایط تطبیق یافته برای دو جزء اول و سوم نیز در جدول ۷ گزارش داده شده است.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد جداسازی آبشار مدل از نوع تطبیق یافته R و شرایط بهینه آن برای دو جزء کلیدی  $k_1$  و  $k_2$  تحت شرایط یکسان و ثابت از نظر تعداد کل مراحل آبشار، نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار و محل ورود آن به آبشار مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا یک کد محاسباتی تحت عنوان MISCC برای تجزیه و تحلیل و تعیین پارامترهای آبشار در شرایط بهینه و غیربهینه با شرایط تطبیق یافته R تهیه شد. افزایش توان جداسازی همزمان با اعمال شرایط تطبیق یافته R به عنوان تابع هدف در آبشار بهینه، با استفاده از الگوریتم TLBO مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به آبشار بهینه‌ای دست یافت که نسبت به آبشار مدل R، توان جداسازی بیش‌تر و مقدار جریان میان مرحله‌ای کم‌تری را داشته باشد. در این بررسی مقدار توان جداسازی افزایش یافته در حالت بهینه نسبت به حالت معمولی برای اجزاء «اول و سوم» و اجزاء «دوم و سوم» به ترتیب  $1\%$  و  $9\%$  به دست آمد. مقدار جریان میان مرحله‌ای در آبشار تطبیق یافته R برای اجزاء اول و سوم در حالت بهینه و معمولی برابر با  $320/31$  و  $3223$  می‌باشد. در صورتی که آبشار تطبیق یافته R برای اجزاء دوم و سوم در نظر گرفته شوند، این مقادیر برای حالت بهینه و معمولی برابر با  $3544/9$  و  $3561/4$  می‌شود. هم چنین نتایج بیان‌گر این موضوع هستند که نرخ جریان محصول در آبشار بهینه نسبت به حالت غیربهینه بیش‌تر است. نکته قابل ذکر در مورد ایزوتوپ‌های گاز زینان این است که در حالتی که ایزوتوپ‌های دوم و یا سوم به عنوان ایزوتوپ کلیدی دوم یعنی  $2$  مطرح شود، نمی‌توان انتظار داشت که ایزوتوپ چهارم در قسمت پسماند غنی شود. زیرا غلظت سه ایزوتوپ سبک در مقایسه با ایزوتوپ چهارم بسیار ناچیز است و این ایزوتوپ به عنوان ایزوتوپ انتهایی عمل می‌کند.

جدول ۴. مقایسه غلظت ایزوتوپ‌های زینان در جریان‌های پسماند و محصول برای آبشار تطبیق یافته R با شرایط بهینه برای دو جزء دوم و سوم.

ایزوتوپ	آبشار بهینه R		آبشار R	
	غلظت اجزا در خوراک	غلظت اجزا در محصول پسماند	غلظت اجزا در پسماند	غلظت اجزا در محصول
Xe-124	0.00093	0.0000	0.0040	0.0000
Xe-126	0.0009	0.0001	0.0035	0.0001
Xe-128	0.1917	0.0097	0.0514	0.112
Xe-129	0.2644	0.1895	0.5186	0.2068
Xe-130	0.408	0.367	0.547	0.380
Xe-131	0.2118	0.2193	0.1862	0.2192
Xe-132	0.2689	0.3036	0.1510	0.2961
Xe-134	0.1044	0.1284	0.231	0.1221
Xe-136	0.887	0.1126	0.076	0.1016

با این وجود مشاهده می‌شود که غلظت ایزوتوپ چهارم برخلاف انتظار در جریان محصول غنی می‌شود. پیش‌تر نیز مطرح شد که درصد غلظت ایزوتوپ‌ها در جریان خوراک به اندازه جایگاه آن‌ها به عنوان ایزوتوپ میانی یا انتهایی مهم است. بنابراین مهم‌ترین علت افزایش غنای ایزوتوپ چهارم در جریان محصول، غلظت بسیار زیاد این ایزوتوپ نسبت به ایزوتوپ‌های اول تا سوم است و این امر باعث می‌شود که ایزوتوپ چهارم هم‌چون ایزوتوپ اول عمل کند.

۲.۴ مقایسه نتایج و عملکرد آبشار تطبیق یافته R با شرایط بهینه برای دو جزء اول و سوم گاز زینان ( $k_1=1, k_2=3$ )

در صورتی که شرایط تطبیق یافته R برای دو ایزوتوپ اول و سوم مد نظر باشد، مقدار توان جداسازی در حالت بهینه برابر SWU/637 است که نسبت به توان جداسازی در آبشار مدل R (SWU/631.47)،  $1\%$  بیش‌تر است. در این حالت توان جداسازی به‌زای هر ماشین سانتریفیوژ حدود SWU/mach/4.13 محاسبه شده و این مقدار در آبشار مدل R برابر با SWU/mach/4.10 می‌باشد. در شرایط بهینه، مقدار کل جریان میان مرحله‌ای آبشار برابر  $320/31 \text{ g/h}$  به دست آمده است؛ در صورتی که در آبشار مدل R این مقدار برابر با  $3223 \text{ g/h}$  بوده است (جدول ۵). مرحله ورود خوراک در شرایط بهینه برابر با  $12$  به دست آمده که در آبشار مدل R نیز از این مقدار استفاده می‌شود. مشخصات و پارامترهای به دست آمده برای آبشار تطبیق یافته R براساس دو جزء اول و سوم گاز زینان برای شرایط بهینه و غیربهینه در جدول ۶ ارائه شده است. در شرایط بهینه، نرخ جریان محصول و پسماند آبشار برای حالتی که نرخ خوراک برابر  $80 \text{ g/h}$  است، به ترتیب برابر با  $15/1 \text{ g/h}$  و  $64/9 \text{ g/h}$  به دست





**جدول ۵.** پارامترهای اصلی آبشار برای شرط تطبیق یافته برای دو جزء اول و سوم.

توان جداسازی آبشار		نرخ جریان میان مرحله‌ای کل		توان جداسازی هر ماشین		برش آبشار	
آبشار بهینه R	آبشار R	آبشار بهینه R	آبشار R	آبشار بهینه R	آبشار R	آبشار بهینه R	آبشار R
۶۳۷	۶۳۱٫۴۷	۳۲۰٫۳۱	۳۲۲۳	۴٫۱۳	۴٫۱۰	۰٫۱۸۸۸	۰٫۱۶۶۷

**جدول ۶.** مشخصات و پارامترهای به دست آمده آبشار برای شرط تطبیق یافته دو جزء اول و سوم.

شماره مرحله	R' - R''		برش هر مرحله		تعداد ماشین	
	آبشار بهینه R	آبشار R	آبشار بهینه R	آبشار R	آبشار بهینه R	آبشار R
۱	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۴۱	۰٫۳۷	۶	۵
۲	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۳۷	۰٫۳۸	۸	۸
۳	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۳۸	۰٫۳۸	۱۰	۱۰
۴	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۳۷	۰٫۳۸	۱۱	۱۱
۵	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۳۹	۰٫۳۸	۱۲	۱۲
۶	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۳۷	۰٫۳۸	۱۲	۱۳
۷	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۴۰	۰٫۳۸	۱۳	۱۳
۸	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۳۷	۰٫۳۸	۱۳	۱۳
۹	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۴۰	۰٫۳۹	۱۳	۱۳
۱۰	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۳۶	۰٫۳۹	۱۳	۱۴
۱۱	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۴۰	۰٫۳۹	۱۳	۱۴
۱۲	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۴۰	۰٫۳۹	۱۴	۱۴
۱۳	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۴۰	۰٫۳۹	۹	۸
۱۴	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۳۹	۰٫۴۰	۵	۴
۱۵	<۰٫۰۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۴۰	۰٫۴۰	۲	۲

**جدول ۷.** مقایسه غلظت ایزوتوپ‌های زینان در جریان‌های پسماند و محصول برای آبشار تطبیق یافته R با شرایط بهینه برای دو جزء اول و سوم.

ایزوتوپ	غلظت اجزا در خوراک	آبشار بهینه R		آبشار R	
		غلظت اجزا در پسماند	غلظت اجزا در محصول	غلظت اجزا در پسماند	غلظت اجزا در محصول
Xe-۱۲۴	۰٫۰۰۰۹۳	۰٫۰۰۰۰	۰٫۰۰۴۶	۰٫۰۰۰۰	۰٫۰۰۵۲
Xe-۱۲۶	۰٫۰۰۰۰۹	۰٫۰۰۰۰۲	۰٫۰۰۰۳۷	۰٫۰۰۰۰۲	۰٫۰۰۰۴۰
Xe-۱۲۸	۰٫۰۱۹۱۷	۰٫۰۱۲۲	۰٫۰۴۸۸	۰٫۰۱۲۸	۰٫۰۵۰۵
Xe-۱۲۹	۰٫۲۶۴۴	۰٫۲۱۲۳	۰٫۴۸۷۹	۰٫۲۱۸۴	۰٫۴۹۴۰
Xe-۱۳۰	۰٫۰۴۰۸	۰٫۰۳۷۹	۰٫۰۵۳۰	۰٫۰۳۸۳	۰٫۰۵۲۸
Xe-۱۳۱	۰٫۲۱۱۸	۰٫۲۱۶۶	۰٫۱۹۱۳	۰٫۲۱۶۵	۰٫۱۸۸۲
Xe-۱۳۲	۰٫۲۶۸۹	۰٫۲۹۲۵	۰٫۱۶۷۵	۰٫۲۸۹۹	۰٫۱۶۳۵
Xe-۱۳۴	۰٫۱۰۴۴	۰٫۱۲۱۵	۰٫۰۳۰۶	۰٫۱۱۹۳	۰٫۰۲۹۶
Xe-۱۳۶	۰٫۰۸۸۷	۰٫۱۰۶۵	۰٫۰۱۲۱	۰٫۱۰۴۱	۰٫۰۱۱۷



## مراجع

1. K. Cohen, *The theory of separation as applied to the large -scale production of U235*, First ed. (Atomic Energy Division, New York, 1951).
2. A.G. Kudziev, *Production and application of stable enriched isotopes in the USSR*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **282**, 267, (1989).
3. C. A. Mol, and H. Rakhorst, *Production of stable isotopes at Urenco: 10 years of progress*, *Rad. Anal. Nuc. Chem.* **257**, 165, (2003).
4. A. De La Garza, *A generalization of the matched abundance-ratio cascade for multicomponent isotope separation*, *Chem. Eng. Sci.* **18**, 73, (1963).
5. A. De la Garza, G.A. Garret, and J.E. Murphy, *Multicomponent isotope separation in cascade*, *Chem. Eng. Sci.* **15**, (1961).
6. R.Ya. Kucherov, and V.P. Minenko, *Theory of cascade for separating multi-component isotope mixtures*, *Atomic Energy*. **19**, 1290, (1965).
7. A. Apelblat, and Y. Ilamed-Lehrer, *The theory of a real isotope enriching cascade*, *Nucl. Energy*. **22**, 1, (1968).
8. T. Song, and Sh. Zeng, *Comparative study of the model and optimum cascades for multicomponent isotope separation*, *Sep. Sci. Tech.* **45**, 2113, (2010).
9. G. A. Sulaberidze, and V. D. Borisevich, *Comparison of optimal and model cascades for the separation of multicomponent mixtures at arbitrary stage enrichments*, *Theo. Found. Chem. Eng.* **42**, 347, (2008).
10. G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich, and Q. Xie, *Quasi-ideal cascades with an additional flow for separation of multicomponent isotope mixtures*, *Theo. Found. Chem. Eng.* **40**, 5, (2006).
11. V. A. Palkin, *Separation of uranium isotopes in a cascade with an intermediate product stream*, *Perspekt. Mater.* **8**, 11, (2010).
12. 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*, *Theo. Found. Chem. Eng.* **50**, 711, (2016).
13. V. A. Palkin, *Design of the optimal parameters of a cascade for separating multicomponent isotope mixtures*, *Atomic Energy*, **130**, 92, (2002).
14. V. A. Palkin, *Optimization of a centrifuge cascade for separating a multicomponent mixture of isotopes*, *Atomic Energy*, **115**, 93, (2013).
15. A. Norouzi et al. *Parameters optimization of a counter-current cascade based on using a real coded genetic algorithm*, *Sep. Sci. Tech.* **46**, 2223, (2011).
16. Sh. Zeng et al. *A numerical method of cascade analysis and design for multi-component isotope separation*, *Chem. Eng. Res. Des.* **92**, 2649, (2014).
17. T. H. Benedict, *Nuclear chemical engineering*, First ed. (McGraw-Will book Co., New York, 1981).
18. G. A. Sulaberidze et al. *Cascades for separation of multi-component isotope mixtures*, *Sep. Sci. Tech.* **36**, 1769, (2001).
19. Y. ZHANG et al. *Comparison of three model cascade*, *Atomic Energy Science and Technology*, **48**, 1921, (2014).
20. Y. Cheng et al. *Comparison study on different cascades for multicomponent isotope separation*, *Atomic Energy Science and Technology*, **48**, (2015).
21. R.V. Rao, and V.J. Savsani, *Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems*, *Computer-Aided Des.* **43**, 303, (2011).
22. R.V. Rao, and V.J. Savsani, *Teaching-learning-based optimization: An optimization method for continuous non-linear large scale problems*, *Info. Sci.* **183**, 1, (2012).
23. I.G. Filippov, G.A. Sulaberidze, *Orthogonal-collocation calculation of fractionation cascades*, *Atomic Energy*, **72**, 29, (1992).
24. H.J. Wu, Ch. Ying, and G. Liu, *Calculation methods for determining the distribution of components in a separation cascade for multicomponent mixture*, *Sep. Sci. Tech.* **33**, 887, (1998).
25. Sh. Zeng, and C. Ying, *A robust and efficient calculation procedure for determining concentration distribution of multicomponent mixtures*, *Sep. Sci. Tech.* **35**, 613, (2000)

## 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، سیدجابر صفدری، علی اصغر قربانپور خسته، علی نوروزی، مجید خواجهنوری (۱۳۹۹)، مقایسه عملکرد یک آشبار مدل تطبیق یافته R با شرایط بهینه آن برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار زینان، ۹۴، ۷۴-۸۳

DOI: 10.24200/nst.2020.1172

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1172.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1172.html)

