



تعیین مشخصات آبشار مربعی شده سه-بخشی بهینه با مرحله ورود خوراک در بخش میانی جهت غنی‌سازی ایزوتوپ پایدار ^{132}Xe

سیده لیلا میرمحمدی^۱، سجاد خوشه چین^{۱*}، محمد حسن ملاح^۲، سید جابر صفدری^۲، فرزانه اعزازی^۱

۱. شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران، ایران

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران، ایران

چکیده:

در این تحقیق آبشار مربعی شده سه-بخشی که خوراک به بخش میانی وارد می‌گردد، برای جداسازی ایزوتوپ ^{132}Xe مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از آبشار مربعی شده مقرون به صرفه است زیرا با داشتن اکثر مزیت‌های آبشار ایده‌آل هزینه واحد را نیز کاهش می‌دهد. در این تحقیق از الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی پارامترهای آبشار مربعی شده استفاده شده و نتایج نشان می‌دهد که این آبشار از قابلیت بسیار بالایی برای جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی برخوردار است. تابع هدف مورد استفاده در این الگوریتم حداکثر دوگروهی کردن (D)، کمترین خوراک مصرفی (F) و بیشترین محصول تولیدی (P or W) را اغنا می‌کند.

کلید واژه: ایزوتوپ پایدار ^{132}Xe ، آبشار مربعی شده سه بخشی، الگوریتم PSO

Determination of Characteristics of Optimized 3-Sections Squared-off Cascade with Inter Feed Flow to the Middle Section in Separation Stable Isotope ^{132}Xe

S. L. Mirmohammadi¹, S. Khooshechin^{1*}, M. H. Mallah², S. J. Safdari², F. Ezazi¹

1. Iran Advanced Technologies Company, Atomic Energy Organization of Iran, P.O.BOX: 1339-14155., Tehran, Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, P.O.BOX: 1339-14155., Tehran, Iran

ABSTRACT

In this study 3-sections squared-off cascade with inter feed flow to the middle section used for separation the stable isotope ^{132}Xe . Using the squared-off cascade is economical because it has the ideal cascade advantages and also decreases the cost. In this research PSO Algorithm Optimization with objective function the higher efficiency, higher two group parameters and feed consumption and capacity production. This cascade has the high capability in separation multi component isotopes.

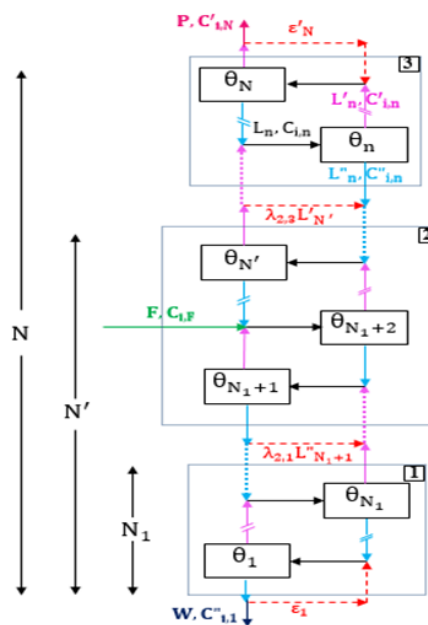
Keywords: Stable isotope ^{132}Xe , 3-sections squared-off cascade, PSO Algorithm Optimization

۱- مقدمه

جداسازی ایزوتوپی با استفاده از ماشین‌های سانتریفیوژ در ابتدا برای غنی‌سازی اورانیوم مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که دیگر ایزوتوپ‌های پایدار در صنعت، پزشکی و دیگر علوم کاربردهای ویژه‌ای دارند جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی نیز مورد توجه قرار گرفت. برای نمونه ایزوتوپ‌های پایدار عنصر زنون در تصویربرداری پزشکی، توموگرافی کامپیوتری، توموگرافی کامپیوتری انتشار تک فوتون و تصویربرداری رزونانس مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کاربردهای مهم ^{132}Xe توسعه لیزرهای پیشرفته است [۱]. در این راستا برای رسیدن به غنای مطلوب ایزوتوپ هدف نیاز به چیدمانی از المان‌های جداسازی است که به‌طور موازی و سری به یکدیگر متصل شده باشند. ساختار آبشار نقش مهمی در برآورده کردن نیازهای غنی‌سازی دارد. آبشارهای مخروطی به دلیل راندمان بالای جداسازی و آبشارهای مربعی به دلیل انعطاف‌پذیری بالای بهره‌برداری مورد توجه می‌باشند. اما هر یک از آنها دارای نقاط ضعفی هستند به‌صورتی که آبشارهای مخروطی از انعطاف بالای بهره‌برداری برخوردار نبوده و راندمان آبشارهای مربعی نیز پایین است. از این رو آبشارهای مربعی شده که عملکردی مابین آبشارهای مخروطی و مربعی دارند، توسعه یافته‌اند. آبشار مربعی شده در واقع مشابه چند آبشار مربعی است که به یکدیگر متصل شده‌اند لذا نرخ خوراک ورودی به مراحل هر بخش با هم برابر است. روش ثابت نگه داشتن نرخ جریان ورودی به مراحل در این آبشارها استفاده از کسرجریان‌های برگشتی ϵ_{1R} ، ϵ'_{NR} و λ به ترتیب در مراحل ابتدایی، انتهایی و میان بخشی است [۲-۶]. در این تحقیق برای اولین بار از یک آبشار مربعی شده سه-بخشی بهینه برای جداسازی ایزوتوپ ^{132}Xe تا غنای ۸۰٪ استفاده شده است.

۲- تئوری

آبشار مربعی شده سه-بخشی در سه نوع متفاوت که خوراک به بخش اول، بخش دوم یا بخش سوم وارد می‌شود، وجود دارد. شکل ۱ شمایی از چیدمان استفاده شده از آبشار مربعی شده در این تحقیق است که خوراک به بخش میانی وارد می‌گردد.



شکل ۱: شماتیکی از آبشار مربعی شده سه-بخشی با جریان خوراک ورود به بخش میانی

در این آبشار n شماره مرحله و N_3, N_2, N_1 به ترتیب تعداد مراحل بخش اول، بخش دوم و سوم است. N و N' نیز مجموع تعداد مراحل بخش اول و دوم و مجموع مراحل کل سه بخش است. F نماد خوراک ورودی به آبشار با غنای $C_{i,F}$ از بخش میانی وارد آبشار شده و جریان سبک و سنگین خروجی از آبشار با نماد P و W و غنای $C'_{i,N}$ و $C''_{i,1}$ از دو سوی آبشار خارج می‌گردند. L''_n و L'_n نیز به ترتیب جریان ورودی به مراحل، جریان سبک و سنگین خروجی از مراحل هستند. از طرفی غنای مربوط جریان خوردگی و وردی به

مراحل $C_{i,n}$ و غنای جریان سبک و سنگین خروجی از مراحل به ترتیب $C'_{i,n}$ و $C''_{i,n}$ می‌باشد. اندیس i نیز مربوط به ایزوتوپ‌های یک عنصر است. همچنین جریانهای برگشتی ابتدایی و انتهایی آبشار ϵ_1 و ϵ'_N و کسر جریان برگشتی از بخش دوم به اول $\lambda_{2,1}$ و کسر جریان برگشتی از بخش دوم به سوم $\lambda_{2,3}$ است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در مراجع علمی منتشر شده، تا کنون به بحث انتخاب استراتژی جهت جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم به کمک آبشارهای مربعی شده پایا، چه در فاز ثنوری و چه در فاز عملیاتی پرداخته نشده است. موارد مطرح شده در مراجع محدود بسیار محدود می‌باشد. در هیچیک از مراجع، شبیه‌سازی عملکرد آبشارها به انجام نرسیده است و به تحلیل عملکرد آبشارهای مربعی شده تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی مختلف، در جداسازی ایزوتوپ‌های عنصر زنون پرداخته نشده است. در سال‌های اخیر می‌توان به تمایل زیادی از دانشمندان و محققین در بهینه‌سازی مسائل پیچیده به کمک تعدادی از الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت از قبیل الگوریتم‌های ژنتیک، بازپخت شبیه‌سازی شده، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، کلونی مورچگان و کلونی زنبور عسل مصنوعی اشاره کرد [۷-۱۲].

۱-۲- شبیه‌سازی آبشار مربعی شده سه-بخشی:

برای شبیه‌سازی یک فرایند و تعیین پارامترهای مجهول یک آبشار لازم است در گام اول پارامترهای مجهول شناسایی و تمام معادلات حاکم بر آبشار نوشته شود و سپس با تعیین اختلاف بین معادلات و مجهولات پارامترهای لازم برای یکسان‌سازی تعداد معادلات و مجهولات شناسایی شود. در انتها با حل دستگاه بوجود آمده مجهولات تعیین گردد. برای شبیه‌سازی آبشارهای مربعی شده در حالتی که تعداد معادلات و مجهولات یکسان باشند دو روش اصلی وجود دارد:

- حل همزمان دستگاه معادلات غیر خطی مربوط به شدت جریان‌ها و کسر جرمی‌ها
- حل معادلات خطی مربوط به شدت جریان‌ها و محاسبه آنها و سپس حل معادلات غیر خطی مربوط به کسر جرمی‌ها به روش تکرار q و محاسبه کسر جرمی‌ها

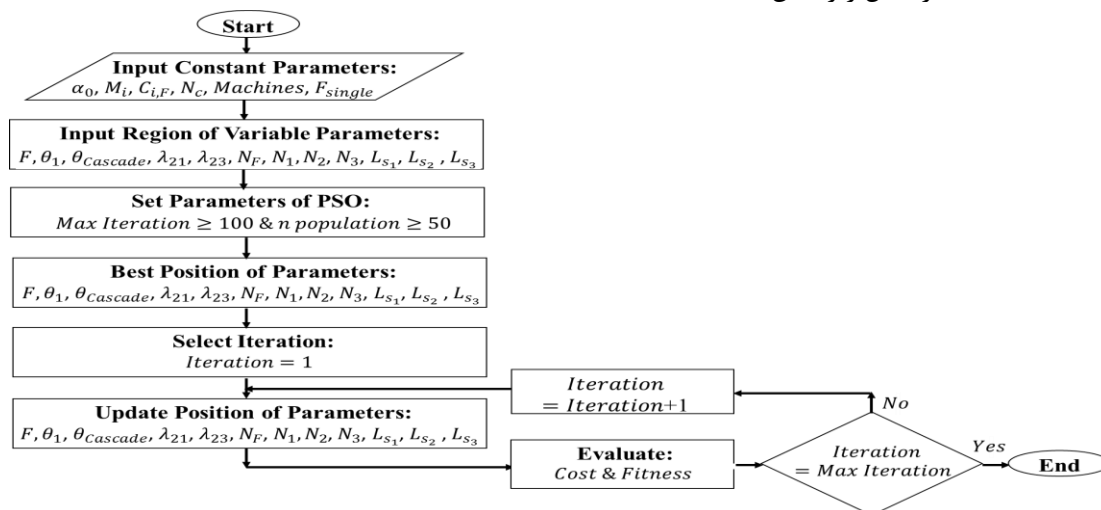
در روش اول دستگاه معادلات غیرخطی به دلیل وابستگی پاسخ مسئله به حدس اولیه امکان واگرایی در حل دستگاه معادلات وجود دارد. در این تحقیق روش دوم (روش تکرار q) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳]. پارامترهای مجهول آبشار مربعی شده سه بخشی شامل محصول سبک و سنگین خروجی از آبشار (W و P)، جریان سبک و سنگین خروجی از مراحل (L'_n و L''_n) و غنای مربوط به جریان‌ها ($C'_{i,n}$ ، $C_{i,n}$ و $C''_{i,n}$) و کسر جریان برگشتی از بخش دوم به اول $\lambda_{2,1}$ و کسر جریان برگشتی از بخش دوم به سوم $\lambda_{2,3}$ است. در مجموع تعداد این مجهولات $3NN_c + 3N + 7$ می‌باشد. از طرفی معادلات آبشار عبارتند از [۲، ۵-۶]:

- ✓ معادلات موازنه جرم کلی مراحل و گره مراحل
- ✓ معادلات موازنه جرم جزئی مراحل و گره مراحل
- ✓ معادله گره ابتدایی و انتهایی آبشار
- ✓ معادله برش آبشار و معادلات برش مراحل
- ✓ معادلات مربوط به فاکتور جداسازی
- ✓ معادلات مربوط به شرط محدودیت کسر جرمی‌ها

که تعداد این معادلات در مجموع برابر است با $3NN_c + 3N + 3$. با توجه به اختلاف چهار بین مجهولات و معادلات مربوط به جریان چهار پارامتر شامل کسر جریان‌های برگشتی میان بخشی، برش آبشار و برش مرحله اول به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲- بهینه‌سازی آبشار مربعی شده سه-بخشی:

انواع مختلف الگوریتم‌های بهینه‌سازی وجود دارد از قبیل الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم تبرید، تبرید شبیه‌سازی شده، جستجوی هارمونی، ژنتیک، کلونی مورچگان، کرم شبتاب، جستجوی مستقیم، کلونی زنبور مصنوعی و... در این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی PSO استفاده شده است که در شکل زیر نشان داده شده است [۱۴].



شکل ۲: الگوریتم مورد استفاده برای بهینه‌سازی آبشار مربعی شده سه-بخشی

۳- روش کار

ابتدا برای شروع طراحی لازم است اقدامات زیر انجام گردد:

۱. تعیین عنصر، ایزوتوپ هدف و غنای مد نظر در محصول نهایی: در این تحقیق عنصر هدف زنون و ایزوتوپ هدف ایزوتوپ ^{132}Xe است. غنای ایزوتوپ هدف در محصول نهایی ۸۰٪ است.
۲. تعیین مسیر و تعداد گام جداسازی: بدین منظور از روابط زیر استفاده می‌گردد:

$$C'_{i,N} \text{ Max} = \frac{C_{i,F}}{\sum_{i=1}^k C_{i,F}} \quad (23)$$

$$C''_{i,1} \text{ Max} = \frac{C_{i,F}}{\sum_{i=k}^{N_c} C_{i,F}} \quad (24)$$

۳. مشخص کردن پارامترهای ورودی ثابت برای جداسازی ایزوتوپ ^{132}Xe : پارامترهای ورودی ثابت در جدول ۲ ارائه شده است:

جدول ۱: پارامترهای ورودی آبشار مربعی شده سه-بخشی

No.	Sign	Value		
		Isotope	M_i (g/mol)	$C_{i,F}$ (%)
1	(g/mol) & $C_{i,F}$ (%) M_i	^{124}Xe	124	0.09
		^{126}Xe	126	0.09
		^{128}Xe	128	1.92
		^{129}Xe	129	26.44
		^{130}Xe	130	4.08
		^{131}Xe	131	21.18
		^{132}Xe	132	26.89
		^{134}Xe	134	10.44
		^{136}Xe	136	8.87
2	α_0	1.2		
3	F_{\min}	5 mg/s		
4	F_{\max}	10 mg/s		
5	GC	140		

۴. مشخص کردن پارامترهای ورودی متغیر جهت بهینه‌سازی آبشار مربعی شده سه بخشی برای جداسازی ایزوتوپ ^{132}Xe . پارامترهای متغیر در جدول ۳ ارائه شده است:

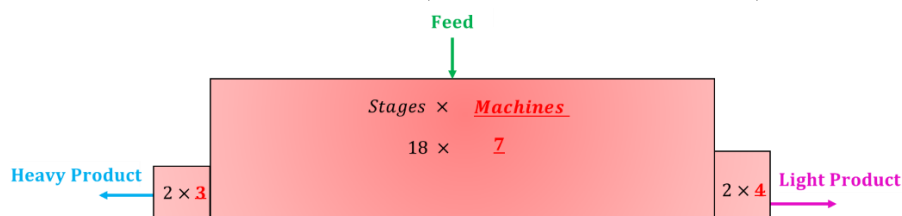
جدول ۲: پارامترهای ورودی متغیر جهت بهینه‌سازی آبشار مربعی شده سه-بخشی

No.	Parameters Name	Parameters Mark
1	Feed stage	N_F
2	Cascade feed flow rate	Feed
3	Feed flow rate of the section 1	L_{s1}
4	Feed flow rate of the section 2	L_{s2}
5	Feed flow rate of the section 3	L_{s3}
6	Number of stages	N
7	Number of stages in section 1	N_1
8	Number of stages in section 2	N_2
9	Number of stages in section 3	N_3
10	Recycle flow rate fraction between section 1 and 2	λ_{21}
11	Recycle flow rate fraction between section 2 and 3	λ_{23}
12	Cut of stage 1	θ_1
13	Cascade cut	θ_{Cascade}

با توجه به اینکه آبشار مورد استفاده در همه گام‌ها از یک چیدمان ثابت برخوردارند لذا متغیرهای N_2, N_1 و N_3 صرفاً در گام اول بهینه شده‌اند و در گام‌های بعدی به صورت ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

۴- نتایج

چیدمان حاصل از انجام بهینه سازی گام اول جداسازی ^{132}Xe به صورت شکل ۳ ارائه گردیده است: همچنین در جدول ۳ سایر پارامترهای متغیر که توسط الگوریتم PSO بهینه شده‌اند برای همه گام‌های جداسازی ارائه شده است.



شکل ۳: چیدمان بهینه آبشار مربعی شده سه-بخشی جهت غنی‌سازی ایزوتوپ ^{132}Xe تا غنای ۸۰٪.

جدول ۳: خلاصه‌ای از نتایج بهینه‌سازی آبشار مربعی شده سه-بخشی جهت غنی‌سازی ایزوتوپ ^{132}Xe تا غنای ۸۰٪.

No	Variable parameter	Step 1	Step 2
1	Feed (mg/s)	2.30	1.25
2	N_F	16	14
3	L_1 (mg/s)	30.00	28.00
4	L_2 (mg/s)	70.00	68.00
5	L_3 (mg/s)	40.00	38.00
6	θ_{cascade}	0.500	0.615
7	θ_1	0.480	0.540
8	$\lambda_{1,2}$	0.350	0.650
9	$\lambda_{2,3}$	0.600	0.450

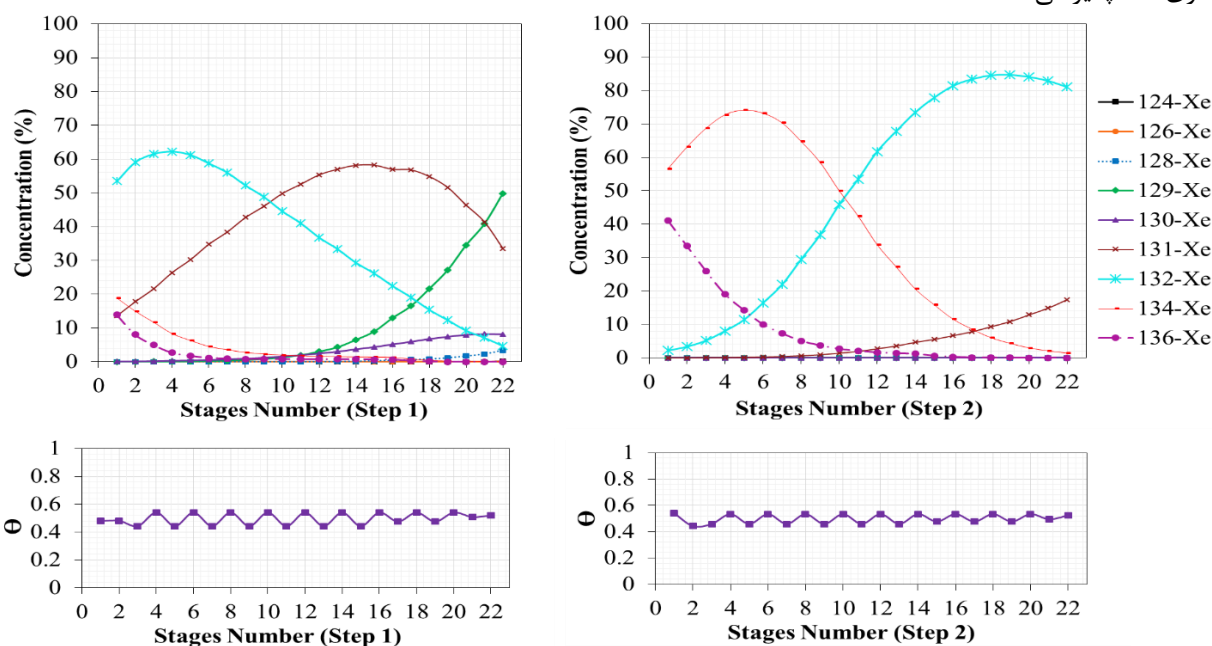
نتایج حاصل از بهینه سازی آبشار مربعی شده سه بخشی طی مدت یکسال در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: خلاصه‌ای از نتایج بهینه‌سازی آبشار مربعی شده سه-بخشی جهت غنی‌سازی ایزوتوپ ^{132}Xe تا غنای ۸۰٪.

Step No.	Suitable Cascade Fraction	Concentration of ^{132}Xe , (%)	Feed (g/year)	Product (g/year)	Recovery of ^{132}Xe (%)	D (%)
1	Heavy	49.82	37778	18889	92.63	92.22
2	Light	80.00	18889	11617	98.75	98.65

Total recovery=91.48%

در شکل ۴ توزیع کسر جرمی خوراک ورودی به مراحل آبشار و برش مراحل در هر گام ارائه شده است. با توجه به اینکه محصول مطلوب در گام اول برش سنگین آبشار است لذا ایزوتوپ های سبک‌تر از ^{132}Xe در این گام تا حدود زیادی حذف شده است و این محصول به عنوان خوراک وارد گام دوم شده است. محصول مطلوب در این گام برش سبک آبشار است که ملاحظه می‌گردد ایزوتوپ های سنگین‌تر از ^{132}Xe نیز در این گام حذف شده است. همین استراتژی تازمانیکه غنای ^{132}Xe به ۸۰٪ برسد، ادامه می‌یابد. این همان استراتژی است که سبب شده است ^{132}Xe با ضریب بازیابی بالایی از سایر ایزوتوپ‌ها جدا شود. لازم به ذکر است این استراتژی می‌تواند برای سایر ایزوتوپ‌ها متفاوت باشد. در شکل ۴ نیز مشاهده می‌گردد که برش مراحل در همه گام‌ها بسیار به هم نزدیک بوده که شرایط بهره‌برداری را با سهولت بیشتری امکانپذیر می‌کند.



شکل ۴: توزیع غلظت جریان ورودی به مراحل و برش مراحل در هر گام جداسازی ایزوتوپ ^{132}Xe

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش غنی‌سازی ایزوتوپ ^{132}Xe تا غنای ۸۰٪ توسط یک آبشار مربعی شده سه بخشی سانتریفیوژ گازی انجام شده است. به دلیل اینکه چیدمان و آرایش سانتریفیوژهای گازی در هر گام یکسان هستند و صرفاً پارامترهای بهره‌برداری آنها با یکدیگر متفاوت است، بنابراین با احداث یک زیرساخت واحد امکان غنی‌سازی ^{132}Xe تا هر غنایی توسط آبشار مربعی شده سه بخشی وجود دارد. در این پژوهش یک آبشار مربعی شده سه بخشی با ۲۲ مرحله و ۱۴۰ سانتریفیوژ گازی به منظور غنی‌سازی ^{132}Xe استفاده شده است که ^{132}Xe را با ضریب بازیابی ۹۱/۴۸٪ تا غنای ۸۰٪ غنی کرده است. لازم به ذکر است جداسازی ایزوتوپ‌های میانی همانند ^{132}Xe بسیار دشوار است و معمولاً راندمان جداسازی آنها پایین است اما ملاحظه می‌گردد که در این پژوهش ^{132}Xe با راندمان نسبتاً بالایی غنی شده است.

مراجع

- [۱]. A. Apelblat and Y. Lehrer, *The Theory of a Real Isotope Enriching Cascade*, J. Nuc. Energy 22, 1-14 (1968).
- [۲]. K. Cohen. *The theory of isotope separation as applied to the large-scale production of U235*, Vol. 1, McGraw Hill, (1951).
- [۳]. Zeng, S., Cheng, L., Jiang, D., Borisevich, V.D., Sulaberidze, G.A., *A Numerical Method of Cascade Analysis and Design for Multi-Component Isotope Separation*, Chem. Eng. Res. Des. 92, 2649-2658, (2017).
- [۴]. Benedict, M., Pigford, T. H., and Levi, H. W., *Nuclear chemical engineering*. McGraw-Hill Education, (1981)
- [۵]. Kholpanov, L. P., *On the Calculation of a Squared-off Cascade for Multicomponent Isotope Separation*, Chem. Eng. Proc., vol. 37, (1998).
- [۶]. Ch. Ying, E. V. Halle, H. G. Wood, *The Optimization of Squared-Off Cascades for Isotope Separation*, Nuclear Technology, (2017).
- [۷]. Sosnin, L.Y., Tcheltsov, A.N., Kuchele, A.P., Remin, G.V., Hobotov, A.A., *Centrifugal Extraction of Highly Enriched ^{120}Te and ^{122}Te Using the Non-Steady State Method of Separation*, 480 36-39, (2002).
- [۸]. Sosnin, L.Y., Tcheltsov, A.N., *Centrifugal Extraction of Highly Enriched ^{123}Te for the Production of ^{123}I at a Cyclotron*, 438 14-19, (1999).
- [۹]. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P., *Optimization by Simulated Annealing*, Sci., 220, pp. 671-680, (1983)
- [۱۰]. Song, T., Zeng, S., Sulaberidze, G., Borisevich, V., Xie, Q., *Comparative Study of the Model and Optimum Cascades for Multicomponent Isotope Separation*. Sep. Sci. Tech., 45, pp. 2113-2118, (2010).
- [۱۱]. Safdari, J., Norouzi, A., Tumari, R., *Using A Real Coded PSO Algorithm in the Design of a Multi-Component Countercurrent Cascade*, Sep. Sci. Tech., 52(18), pp. 2855-2862, (2017).
- [۱۲]. Ezazi, F., Mallah, M. H., Karimi Sabet, J., Norouzi, A. and Mahmoudian, A., *Investigation on the Net Cascade Using Ant Colony Optimization Algorithm*. Prog. Nucl. Energy, 103169, (2020).
- [۱۳]. Zeng, S. and Ying, C., *A Robust and Efficient Calculation Procedure for Determining Concentration Distribution of Multicomponent Mixtures*, J. Sep. Sci. Technol., (4), p. 613, (2000).
- [۱۴]. Elbert, R., Kennedy, J., *A new Optimizer Using Particle Swarm Theory*, in: proceeding of sixth international symposium on micro machine and human science 39-43, (1995)