بررسی پارامتر M^* و α_0 بر عملکرد آبشار مدل Q به منظور جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار زینان

فاطمه منصورزاده*[1]، علی اصغر قربانپور خمسه[1]، سید جابر صفدری[1]، علی نوروزی[2]

1- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته ای

2- سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران

چکیده: *یکی از پارامترهای مهم در طراحی آبشارهای غنی‌سازی برای سیستم‌های چند جزئی با استفاده از آبشار مدل Q، M^* می‌باشد. در این تحقیق یک کد با نام MOTACAS برای طراحی آبشار غنی‌سازی با استفاده از مدل Q تهیه شده که با استفاده از آن مقدار بهینه پارامتر M^* برای غنی سازی ایزوتوپ نهم زینان در جریان پسماند به ترتیب در غناهای ۰/۲۸ ، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ و غنی سازی ایزوتوپ چهارم زینان به ترتیب در غناهای ۰/۳ ، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸ تعیین می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که هر اندازه میزان غنای ایزوتوپ مطلوب افزایش یابد محدوده تغییرات پارامتر M^* به منظور دستیابی به کمینه نرخ جریان میان مرحله‌ای کل کاهش می‌یابد. همچنین به منظور بررسی اثر فاکتور جداسازی بر مقدار پارامتر M^*، محاسبات برای ایزوتوپ نهم با فاکتور جداسازی ۱/۰۵ و ۱/۱ مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه M^* تغییر نمی‌کند و تنها نرخ جریان میان مرحله‌ای کل با کاهش فاکتور جداسازی افزایش می‌یابد.*

کلید واژه: ایزوتوپ های پایدار، آبشار مدل Q ، پارامتر M^*، زینان

Investigation of M^* and α_0 on the Q-cascade performance for separation of xenon stable isotopes

F. Mansourzadeh[*1], A. GH. Khamseh[1], J. Safdari[1], A. Norouzi[2]

[1]Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute, Materials and Nuclear Fuel Research School.

[2] Atomic Energy Organization of Iran, Advanced Technology Company.

One of the important parameters for designing a cascades using Q-cascade is the M^*. In this study, a code called MOTACAS for designing the Q-cascade has been developed. The optimal M^* for enrichment of the Xe-136 in the waste stream for 0.28, 0.5, 0.7, 0.9 and enrichment of the Xe-129 through 0.3, 0.5, 0.7, 0.8 are determined. The results show that as much as the desired isotope enrichment increases, the range of variations in the optimal M^* decreases. Also, in order to investigate the effect of separation factor on the M^*, the calculations for the 9th isotope have been compared with the separation factor of 1.05 and 1.1. The results indicate that the optimal M^* does not change, and only the total interstage flow rate increases with decreasing separation factor.

Keywords: Stable isotopes, Q-cascade, M^* parameter, Xenon

۱- مقدمه

جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار چندجزئی از اوایل ۱۹۶۰ مورد توجه قرار گرفت. در این راستا مدل‌های مختلفی با استفاده از مفهوم آبشار ایده‌ال در غنی سازی اورانیوم توسط محققین پیشنهاد شده و مورد بررسی قرار گرفت. آبشار مدل Q نیز یکی از این مدل‌هاست که بر تخمین پارامترهای آبشار بسیار مفید می‌باشد [۱و۲]. پارامتر اصلی در طراحی این آبشار پارامتر M* است که در این مقاله به بررسی آن بر عملکرد آبشار مدل Q برای غنی سازی دو ایزوتوپ میانی و انتهایی زینان پرداخته می‌شود. بهینه‌سازی پارامترهای آبشار بویژه در جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی از اهمیت بالایی برخوردار است که تا کنون تحقیقات بسیاری به منظور بهینه‌سازی پارامترهای آبشار انجام گرفته است [۳-۵]. به عنوان مثال پالکین پارامترهای یک آبشار را برای غنی‌سازی اورانیم دو جزئی و چندجزئی بررسی کرده است [٦]. منصورزاده به بهینه سازی پارامترهای آبشار R پرداخته [۷] و نوروزی [۸] یک آبشار مخروطی را برای جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزئی بهینه نموده است. توابع هدفی که بررسی شده‌اند نیز عبارتند از ظرفیت جداسازی [۸]، نرخ جریان کل میان مرحله‌ای [۵] و تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ استفاده شده در آبشار [۷]. در این مقاله با بهینه کردن مقدار پارامتر M* مناسبترین آبشار مدل Q برای جداسازی ایزوتوپ‌های چهارم و نهم زینان تعیین شده است به گونه ای که کمترین نرخ جریان میان مرحله ای یا به عبارتی کمترین ماشین‌های سانتریفیوژ جهت دستیابی به غنای مشخص از این ایزوتوپ‌ها استفاده شود.

۲- تئوری

آبشار مدل Q برای جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزئی معادل آبشار ایده‌آل در جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیوم است [۱و۲و۵]. معادلات دیفرانسیلی حاکم بر بخش‌های غنی‌سازی و تهی‌سازی آبشار به صورت زیر هستند:

$$\frac{dz_i}{dn} = z_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{i,j} z_j - \frac{2P}{Z_n}(y_{i,P} - z_i) \qquad (۱)$$

$$, \quad i = 1,2,...,N_C - 1 \quad , \quad \sum_{j=1}^{N_C} z_j = 1 \quad 0 \le n \le n_E$$

$$\frac{dz_i}{dn} = z_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{i,j} z_j + \frac{2W}{Z_n}(x_{i,W} - z_i) \quad , \quad i = 1,2,...,N_C - 1 \quad , \quad \sum_{j=1}^{N_C} z_j = 1 \quad 0 \le n \le n_s \qquad (۲)$$

با حل و ساده‌سازی معادلات فوق، مقادیر $x_{i,w}$ و $y_{i,p}$ برای ایزوتوپ‌های مختلف با استفاده از دو معادله (۳) و(٤) قابل محاسبه است. نسبت نرخ جریان محصول به نرخ جریان خوراک و نیز نرخ پسماند به نرخ خوراک به صورت روابط (۵) و (٦) محاسبه می‌شود.

$$y_{i,P} = \frac{1-\exp(Q_i n_s)}{\exp(-Q_i n_E) - \exp(Q_i n_s)} Z_{i,F} \Big/ \sum_{j=1}^{N_c} \left(\frac{1-\exp(Q_j n_s)}{\exp(-Q_j n_E) - \exp(Q_j n_s)} Z_{i,F}\right) \qquad (۳)$$

$$x_{i,W} = \frac{\exp(-Q_i n_E) - 1}{\exp(-Q_i n_E) - \exp(Q_i n_s)} Z_{i,F} \Big/ \sum_{j=1}^{N_c} \left(\frac{\exp(Q_j n_E) - 1}{\exp(-Q_j n_E) - \exp(Q_j n_s)} Z_{i,F}\right) \qquad (٤)$$

$$\frac{P}{F} = \sum_{j=1}^{N_c} \left(\frac{\exp(Q_j n_s) - 1}{\exp(Q_j n_S) - \exp(-Q_j n_E)} Z_{i,F}\right) \qquad (۵)$$

$$\frac{W}{F} = \sum_{j=1}^{N_c} \left(\frac{\exp(Q_j n_E) - 1}{\exp(-Q_j n_E) - \exp(Q_j n_s)} Z_{i,F}\right) \qquad (٦)$$

در این روابط، n_E طول یا تعداد مراحل بخش غنی سازی و n_S طول یا تعداد مراحل بخش تهی‌سازی آبشار است. پارامتر Q_i برای ایزوتوپ iام از رابطه (۷) قابل محاسبه است:

$$Q_i = \varepsilon_0 (M^* - M_i) \qquad (۷)$$

که M^* در آن عدد جرمی یک جزء فرضی است. اجزاء خوراک با عدد جرمی کمتر از M^* ($M_i < M^*$) در جریان سبک و اجزاء با عدد جرمی بیشتر از M^* ($M^* < M_i$) در جریان سنگین آبشار قرار می‌گیرند. با استفاده از رابطه (۷) برای دو ایزوتوپ i و j، رابطه بین Q_i و Q_j به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Q_i - Q_j = \varepsilon_0 (M_j - M_i) \qquad (۸)$$

از طرفی در آبشارهای نوع نفوذ گازی و سانتریفیوژ گازی نیز چون ε_{ij} به صورت رابطه (۹) می‌باشد:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 (M_j - M_i) \qquad (۹)$$

از روابط (۸) و (۹) نتیجه می‌شود:

$$Q_i - Q_j = \varepsilon_{ij} \qquad (۱۰)$$

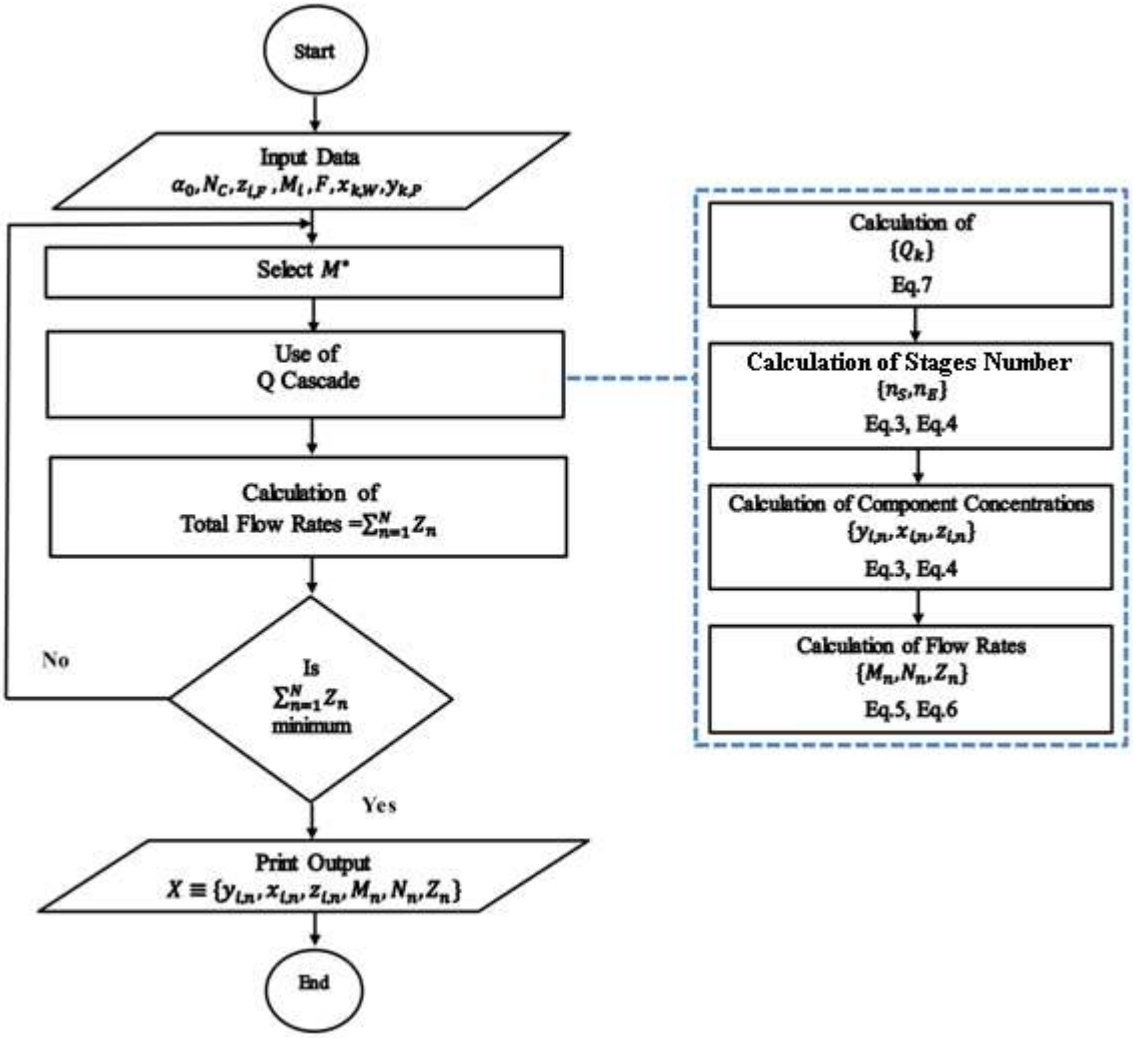
در این روابط ε_{ij} معادل با لگاریتم α_{ij} که همان فاکتور جداسازی است در نظر گرفته شده است.

۳- روش کار

در این تحقیق یک کد با نام MOTACAS (Model Taper Cascade) به منظور طراحی آبشار مدل Q جهت دستیابی به غنای مشخص از یک ایزوتوپ خاص در محصول و پسماند آبشار تهیه شده است که الگوریتم کلی آن مطابق شکل (۱) می‌باشد. ابتدا با در نظر گرفتن یک مقدار مشخص*M و تعیین پارامتر Q، تعداد مراحل غنی سازی (n_E) و تهی سازی (n_S) در آبشار با استفاده از روابط (۳) و (٤) تعیین می‌شود. سپس می‌توان غلظت دیگر ایزوتوپ‌ها در ابتدا و انتهای آبشار را محاسبه نمود. همچنین با استفاده از روابط (۵) و (٦) نسبت جریان محصول و پسماند آبشار و همچنین جریان‌های پیشرونده و پسرونده مراحل تعیین می‌شود.

همانگونه که در این روابط مشاهده می‌شود مقدار پارامترهای اصلی در آبشار مدل Q از جمله نرخ جریان در مراحل مختلف و نیز تعداد مراحل غنی‌سازی و تهی سازی به پارامتر Q یا به عبارتی *M وابسته است. بنابراین در این بخش مطابق الگوریتم نشان داده شده در شکل (۱)، با تغییر مقادیر *M جهت دستیابی به غنای مشخص یک ایزوتوپ خاص در محصول و پسماند آبشارهای Q مختلف نیز قابل ارزیابی هستند. *M بهینه به مقداری اشاره دارد که با استفاده از آن آبشار مدل Q در یک مقدار غنای مشخص از ایزوتوپ مورد نظر کمترین نرخ جریان میان مرحله ای را داشته باشد.

در این مقاله به بررسی اثر پارامتر *M بر آبشار مدل Q پرداخته می‌شود. با انتخاب مناسب پارامتر *M، بهترین آبشار Q با نرخ جریان میان مرحله‌ای کل کمینه قابل محاسبه خواهد بود که محاسبات برای غنی سازی دو جزء چهارم و نهم ایزوتوپ‌های زینان ارائه می‌شود. همچنین نتایج برای فاکتور جداسازی ۱/۱۰ و ۱/۰۵ نیز با یکدیگر مقایسه شده و اثر فاکتور جداسازی بر پارامتر *M نیز بررسی می‌شود. هدف از بررسی‌های انجام شده در این بخش، دستیابی به ایزوتوپ چهارم با غلظت ۰/۳ ، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸در جریان محصول و همچنین دستیابی به ایزوتوپ نهم با غلظت ۰/۲۸ ، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ در جریان پسماند می‌باشد.

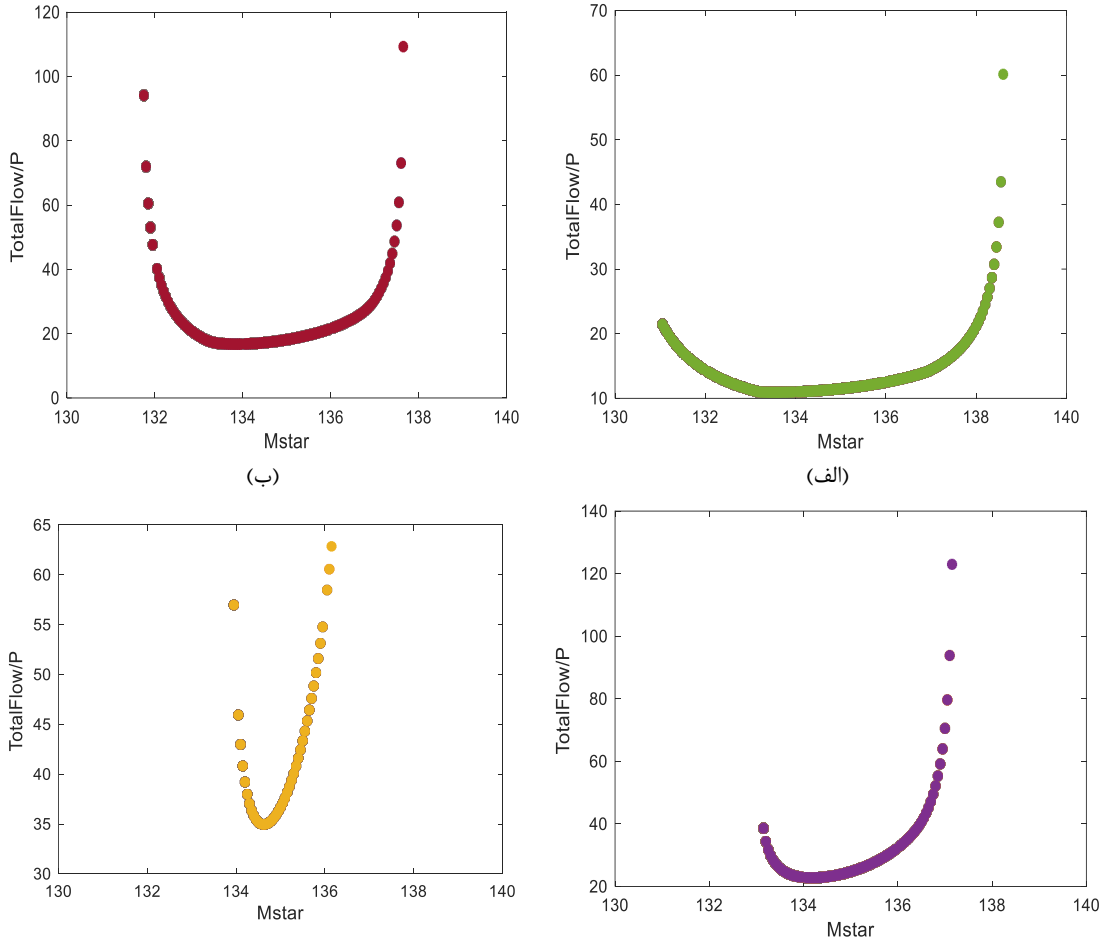


شکل ۱: الگوریتم مورد استفاده برای تعیین بهترین *M

٤- نتایج

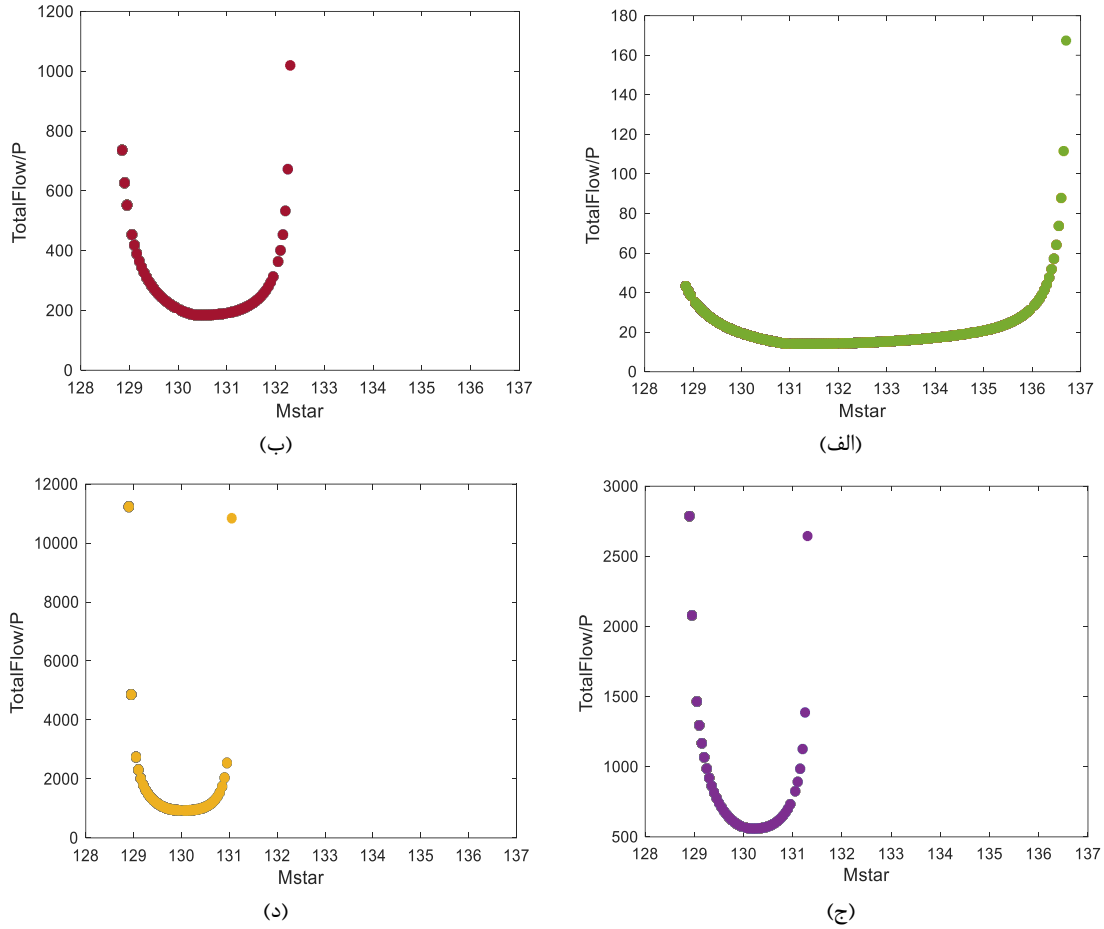
ابتدا محاسبات با فاکتور جداسازی ۱/۱ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۲) تغییرات نسبت جریان میان مرحله‌ای کل را با پارامتر *M به ترتیب برای جداسازی ایزوتوپ نهم تا غنای ۰/۲۸ ، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود هر اندازه میزان غنای ایزوتوپ نهم افزایش یابد محدوده تغییرات پارامتر *M به منظور دستیابی به کمینه نرخ جریان میان مرحله‌ای کل کاهش می‌یابد. این محاسبات مجدداً برای جداسازی ایزوتوپ چهارم نیز انجام گرفته است. شک (۳) این تغییرات را برای جداسازی ایزوتوپ چهارم تا غنای ۰/۳ ، ۰/۵، ۰/۷ و

۰/۸ نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود هر اندازه میزان غنای ایزوتوپ چهارم افزایش یابد محدوده تغییرات پارامتر *M به منظور دستیابی به کمینه نرخ جریان میان مرحله‌ای کل کاهش می‌یابد.

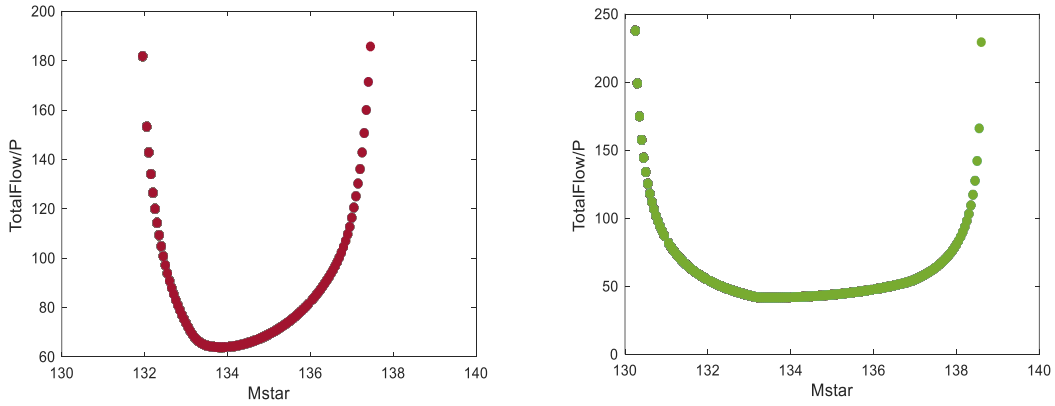


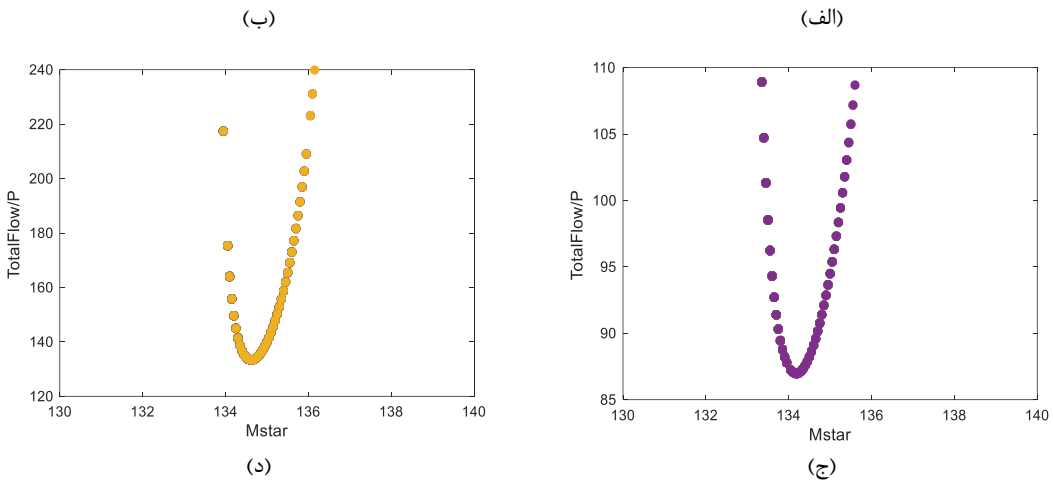
شکل۲: اثر پارامتر*M بر نرخ جریان میان مرحله‌ای کل برای افزایش غنای زینان ۱۳۶ تا (الف) ٪۲۸، (ب) ٪۵۰، (ج) ٪۷۰ (د) ٪۹۰ با فاکتور جداسازی ۱/۱

به منظور بررسی اثر فاکتور جداسازی بر مقدار پارامتر *M، محاسبات برای ایزوتوپ نهم با فاکتور جداسازی ۱/۰۵ نیز انجام گرفت. همانطور که از مقایسه شکل (۲) و (٤) دیده می‌شود مقدار بهینه *M تغییر نمی‌کند و تنها نرخ جریان میان مرحله‌ای کل با کاهش فاکتور جداسازی افزایش می‌یابد.



شکل۳: اثرپارامتر*M بر نرخ جریان میان مرحله‌ای کل برای افزایش غنای زینان ۱۲۹ تا (الف) ٪۳۰، (ب)٪۵۰، (ج) ٪۷۰ (د) ٪۸۰ با فاکتور جداسازی ۱/۱





شکل ٤: اثر پارامتر*M بر نرخ جریان میان مرحله‌ای کل برای افزایش غنای زینان ۱۳٦تا الف) ٪۲۸، ب) ٪۵۰، ج) ٪۷۰ د) ٪۹۰ با فاکتور جداسازی ۱/۰۵

۵- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق یک کد محاسباتی برای تجزیه و تحلیل و تعیین پارامترهای آبشار مدل Q تهیه شده است. همانطور که ملاحظه می شود با انتخاب مناسب پارامتر *M می‌توان به یک آبشار مدل Q دست یافت که علاوه بر دستیابی به غنای مورد نظر از ایزوتوپ مطلوب کمترین میزان جریان میان مرحله ای کل در آن قابل دستیابی است. مقدار بهینه *M با تغییر فاکتور جداسازی تغییر نمی‌کند و تنها نرخ جریان میان مرحله‌ای کل با کاهش فاکتور جداسازی افزایش می‌یابد. از دیگر نتایج مهم در این تحقیق می‌توان به این نکته اشاره کرد که در صورتی که هدف افزایش غنای ایزوتوپ انتهایی زینان با فاکتور جداسازی ۱/۱ باشد می‌توان در یک آبشار Q $(n_E = 4n_s = 31,)$ تا غنای بیش از ۹۰٪ غنی سازی را انجام داد اما در صورتی که ایزوتوپ میانی چهارم مطرح باشد حداکثر غنای بدست آمده ۸۰٪ است$(n_E = 27n_s = 17,)$ و برای افزایش غنای آن تا مقادیر بالاتر باید مجددا یک آبشار جدید با مقدار خوراک جدید طراحی نمود. به عبارتی دیگر ایزوتوپ های انتهایی را می‌توان در آبشارهای مدل تا مقدار زیاد در یک بار استفاده از آبشار غنی نمود اما ایزوتوپ‌های میانی تا مقدار محدودی در آبشارهای مدل غنی می‌شوند.

٦- مراجع

[1] Kucherov, R.Ya, Minenko, V.P., 1965, “Theory of cascade for separating Multi-component isotope mixtures,” At. Energy. 19, 1290.

[2] Kolokoltsov. N. A, 1970, “Design of Cascades for separating isotope mixtures,” UDC 621.039.3.

[3] De la Garza, A., 1963. “A generalization of the matched abundance-ratio cascade for multicomponent isotope separation,” Chem. Eng. Sci., 18, 73.

[4] Raichura, R.C., AI-Janabi. M.A.M., Langbein, G.M., 1991, “The effect of the 'KEY' molar mass on the design of a cascade handling a multi-isotopic mixture,” Annals of Nuclear Energy, 18, 327.

[5] Zeng, S., Jiang, D., Borisevich, V.D., Sulaberidze, G.A., 2011, “Use of the Q-cascade in calculation and optimization of multi-isotope separation.” Chem. Eng. Sci., 66, 2997.

[6] Palkin, V.A., 2013, “Optimization of a centrifuge cascade for separating a multicomponent mixture of isotopes,” At Energy, 115, 93.

[7] Safdari, J., Norouzi A., Tumari, R., 2017, “Using a Real Coded PSO Algorithm in the Design of a Multi-Component Counter-Current Cascade,” J. Sep. Sci. Techno, 52, 1520.

[۸] فاطمه منصورزاده، سید جابر صفدری، علی اصغر قربانپور خمسه، علی نوروزی، مجید خواجه نوری، "مقایسه عملکرد آبشار تطبیق یافته با شرایط بهینه برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار زینان"، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، ۱۳۹۶.