



بررسی تأثیر پارامتر M^* و α بر روی جداسازی ایزوتوپ‌های چهارم و هشتم تلوریم در آبشار مدل Q

فاطمه منصورزاده، علی اصغر قربانپور خمسه^{*}، سید جابر صفدری

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

*Email: Akhmseh@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۵/۴

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در طراحی آبشار مدل Q برای سیستم‌های چندجزیی، پارامتر M^* می‌باشد. در این تحقیق یک کد با نام MOTACAS برای طراحی آبشار مدل Q تهیه شده است که با استفاده از آن مقدار بهینه پارامتر M^* نیز قابل محاسبه است. در این راستا مقدار بهینه M^* برای غنی‌سازی ایزوتوپ هشتم تلوریم در خروجی جریان سنگین به ترتیب در غناهای ۰/۴۰، ۰/۷، ۰/۹ و ۰/۹۹ و غنی‌سازی ایزوتوپ چهارم تلوریم به ترتیب در غناهای ۰/۱، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ تعیین شده است. همچنین به منظور بررسی اثر فاکتور جداسازی بر مقدار پارامتر M^* ، محاسبات برای ایزوتوپ هشتم و چهارم با فاکتور جداسازی ۱/۰۵ و ۱/۱ انجام و با یکدیگر مقایسه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که هر اندازه میزان غنای ایزوتوپ مطلوب افزایش یابد، محدوده تغییرات پارامتر M^* کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش فاکتور جداسازی، مقدار بهینه M^* تغییر نمی‌کند و علی‌رغم افزایش مقدار جریان میان مرحله‌ای کل، مقدار جریان نسبی میان مرحله‌ای کل ثابت باقی می‌ماند. در ضمن مطابق نتایج به دست آمده، غنای ایزوتوپ‌های انتهایی با افزایش تعداد مراحل آبشار تا مقادیر بالا افزایش می‌یابد اما غنای ایزوتوپ‌های میانی تا اندازه‌ی محدودی در یک آبشار قابل افزایش می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ایزوتوپ‌های پایدار، آبشار مدل Q، پارامتر M^* ، نرخ جریان میان مرحله‌ای کل، تلوریم

Investigation the effect of M^* and α_0 on the separation of 4th and 8th isotopes of tellurium in a Q model cascade

F. Mansourzadeh, A.A. Ghorbanpour Khamseh*, J. Safdari

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

Research Article

Received 17.4.2021, Accepted 26.7.2021

Abstract

One of the crucial parameters in designing the Q model cascade for the multi-component systems is the M^* parameter. In this research, a code called MOTACAS has been developed to design a Q cascade, using the optimal value of the M^* parameter. In this regard, the enrichment of the 8th isotope of tellurium at the heavy stream to 0.40, 0.7, 0.9, and 0.99, and the enrichment of the 4th isotope to 0.1, 0.3, 0.4, and 0.5 have been investigated. Also, in order to evaluate the effect of the separation factor on M^* , optimal Q cascades for the enrichment of the 8th and the 4th isotopes with separation factors of 1.05 and 1.1 have been designed and compared with each other. The results show that the acceptable range of the M^* decreases with increasing the desired isotope concentration. The optimal value of the M^* does not change with reducing the separation factor. The relative inter-stage flow rate remains constant despite increasing the total inter-stage flow rate. Moreover, the required number of separation stages to reach the end component to a high concentration increased, but the enrichment of the middle component in the one cascade is limited despite increasing the stages.

Keywords: Stable isotopes, Q cascade, M^* parameter, Total inter-stage flow rate, Tellurium



۱. مقدمه

را برای جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی گوگرد بهینه نموده است [۱۳].

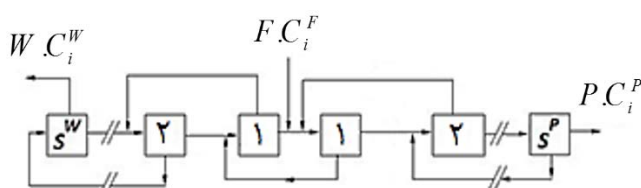
در این مقاله با بهینه کردن مقدار پارامتر M^* مناسب‌ترین آبخار مدل Q برای جداسازی ایزوتوپ‌های چهارم و هشتم تلوریم تعیین شده است به گونه‌ای که کم‌ترین نرخ جریان میان مرحله‌ای یا به عبارتی کم‌ترین تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ جهت دستیابی به غنای مشخص از این ایزوتوپ‌ها را داشته باشد. در این بررسی هم‌چنین به منظور بررسی اثر فاکتور جداسازی بر مقدار پارامتر M^* ، محاسبات با فاکتور جداسازی ۱/۰۵ و ۱/۱ انجام و با یک‌دیگر مقایسه شده است.

۲. تئوری

آبخار مدل Q برای جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی معادل آبخار ایده‌آل در جداسازی دوجزیی ایزوتوپ‌های اورانیم است [۱، ۲، ۶]. در مخلوط‌های دوجزیی، طراحی و یا شبیه‌سازی براساس آبخار ایده‌آل صورت می‌گیرد. شکل ۱ شمای کلی یک آبخار با جریان برگشتی برای جداسازی ایزوتوپ‌ها در یک مخلوط چندجزیی را نشان می‌دهد. در این آبخار F نرخ جریان خوراک، P نرخ جریان سبک خروجی از آبخار، W نرخ جریان سنگین خروجی از آبخار و C_i^P ، C_i^F و C_i^W به ترتیب غلظت جزء i در جریان خوراک، جریان سبک و جریان سنگین خروجی از آبخار هستند و i اندیس مربوط به شماره هر جزء است که از ۱ تا N_C به ترتیب افزایش جرم مولکولی ایزوتوپ‌های موجود در مخلوط بوده و N_C نشان‌دهنده تعداد اجزا یا ایزوتوپ‌های مخلوط است. در این شکل شمارش تعداد مراحل از مرحله خوراک شروع شده و به سمت مراحل غنی‌سازی و تهی‌سازی شماره‌گذاری می‌گردد. S^P و S^W به ترتیب تعداد مراحل غنی‌سازی و تهی‌سازی در آبخار را نشان می‌دهند. بر اساس شکل ۱ معادلات بقای جرم کلی و برای هر جزء به ترتیب به صورت رابطه ۱ و ۲ بیان می‌گردد.

$$FC_i^F = PC_i^P + WC_i^W \quad (1)$$

$$F = P + W \quad (2)$$



شکل ۱. شمای کلی یک آبخار با جریان برگشتی.

جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار چندجزیی از اوایل ۱۹۶۰ مورد توجه قرار گرفت. در این راستا مدل‌های مختلفی با استفاده از مفهوم آبخار ایده‌آل در غنی‌سازی اورانیم توسط محققین پیشنهاد شده و مورد بررسی قرار گرفت [۱-۴]. مطالعه آبخارهای مدل با جریان پیوسته، برای ارزیابی سریع پارامترهای جداسازی آبخارها و بهینه کردن آن‌ها به منظور جداسازی ایزوتوپ‌ها مفید است. آبخار مدل Q یکی از این مدل‌ها است [۲، ۳]. علت نام‌گذاری این آبخار به این دلیل است که برای جداسازی هر جزء در مخلوط ایزوتوپ چندجزیی، یک پارامتر Q به منظور جایگزینی غلظت (غنا) با یک تابع دیگر، معرفی می‌شود. این معرفی صرفاً به منظور یافتن یک حل تحلیلی برای معادلات غیرخطی است. استفاده از روش تحلیلی برای حل معادلات به دلیل صرف زمان کمتر برای حل آن‌ها، دقت بالای نتایج و هم‌چنین عدم بروز مشکلات محاسباتی همانند واگرایی (بر خلاف روش‌های عددی به کار رفته برای آبخارهایی چون R، شبه‌ایده‌آل و ...) اهمیت استفاده از این روش برای طراحی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی آبخارها را نشان می‌دهد. اگرچه اساس مدل Q برای آبخارهای با فاکتور جداسازی پایین مشتق شده است، با این وجود برای آبخارهای با فاکتور جداسازی کلی بالا (دلخواه) همانند آبخار ایده‌آل و آبخار مدل تطبیق یافته R (که حالت خاصی از یک آبخار Q است)، نیز کاربرد دارد [۵، ۶]. پارامتر اصلی در طراحی آبخار Q، پارامتر M^* است که در این مقاله به بررسی تأثیر آن بر عملکرد آبخار مدل Q برای غنی‌سازی دو ایزوتوپ میانی و انتهای تلوریم پرداخته می‌شود. M^* جرم مولی جزء فرضی است که جداسازی ایزوتوپ‌ها براساس آن انجام می‌شود. ایزوتوپ‌هایی که جرم کمتر از آن را دارند در جریان سبک و ایزوتوپ‌هایی که جرم بیش‌تر از آن را دارند در جریان سنگین جدا می‌شوند [۶].

بهینه‌سازی پارامترهای آبخار به ویژه در جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی از اهمیت بالایی برخوردار است و تاکنون تحقیقات بسیاری به منظور بهینه‌سازی پارامترهای آبخارها انجام گرفته است [۵-۱۰]. به عنوان مثال پالکین پارامترهای یک آبخار را برای غنی‌سازی اورانیم دوجزیی و چندجزیی بررسی کرده است [۱۰]. منصورزاده به بهینه‌سازی پارامترهای آبخار R و مخروطی پرداخته [۱۱] و آبخار بهینه R را با آبخار بهینه مخروطی برای جداسازی ایزوتوپ‌های زینان مقایسه کرده است [۱۲]. هم‌چنین صفدری یک آبخار مخروطی



که L_i نرخ جریان سبک خروجی از آبشار و G نرخ جریان هر جزء ایزوتوپ است. سیستم توابع مشخصه $\phi_{i,l}$ ، N_C-1 معادله جبری به شکل رابطه ۸ هستند.

$$\phi_{i,l} = \phi_{k,l} \exp(\varepsilon_{i,k} l) \quad (8)$$

ترجیح در استفاده از رابطه ۸ برای جستجوی توزیع نرخ جریان L_i می‌باشد که اجازه حل مسأله برای مقدار غنای داده شده جزء مطلوب در جریان‌های سبک و سنگین را می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که با توجه به رابطه (۸)، توزیع نرخ جریان و غلظت L_i و $C_{i,l}$ بر روی مراحل آبشار به راحتی و با تنها یکی از توابع مشخصه $\phi_{i,l}$ در سیستم، تعریف می‌شود. اگر یکی از توابع مشخصه اجازه محاسبه انتگرال رابطه ۷ را بدهد، توزیع جریان L_i و همچنین توزیع غلظت‌های $C_{i,l}$ می‌تواند به صورت تحلیلی مشخص شود. توابع مشخصه به شکل نمایی زیر انتخاب می‌شوند.

$$\phi_{i,l} = \exp(Q_i l) \quad (9)$$

Q_i ثوابت مرزی مربوط به رابطه ۸ با شرط $Q_i - Q_j = \varepsilon_{ij}$ هستند. آبشاری که شرط رابطه ۹ را ارضا کند، آبشار Q نامیده می‌شود. با تعریف $L_i = 0$ و جای‌گذاری رابطه ۹ در رابطه ۷، روابط ۱۰ الی ۱۲ برای بخش غنی‌سازی آبشار (و به طریق مشابه روابط ۱۳ الی ۱۵ برای بخش تهی‌سازی) حاصل می‌شود.

$$G_{i,l} = \frac{\gamma PC_i^P}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i l)] \quad (10)$$

$$L_i = \gamma P \sum_{j=1}^{N_C} \frac{C_j^P}{Q_j} [1 - \exp(-Q_j l)] \quad (11)$$

$$C_{i,l} = \frac{\frac{C_i^P}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i l)]}{\sum_{j=1}^{N_C} \frac{C_j^P}{Q_j} [1 - \exp(-Q_j l)]} \quad (12)$$

$$G_{i,l} = \frac{\gamma WC_i^W}{Q_i} [\exp(Q_i l) - 1] \quad (13)$$

$$L_i = \gamma W \sum_{j=1}^{N_C} \frac{C_j^W}{Q_j} [\exp(Q_j l) - 1] \quad (14)$$

$$C_{i,l} = \frac{\frac{C_i^W}{Q_i} [\exp(Q_i l) - 1]}{\sum_{j=1}^{N_C} \frac{C_j^W}{Q_j} [\exp(Q_j l) - 1]} \quad (15)$$

با استفاده از موازنه جرم و انجام یک سری عملیات ریاضی، معادلات دیفرانسیلی ۳ و ۴ برای تغییرات غنای هر جزء از ایزوتوپ چندجزیی به ترتیب برای بخش‌های غنی‌سازی و تهی‌سازی حاصل می‌گردد [۴].

$$\frac{dC_i}{dS} = C_i \sum_{j=1}^{N_C} \varepsilon_{i,j} C_j - \frac{\gamma P}{L_S} (C_i^P - C_i) \quad (3)$$

$$0 \leq S \leq S^P, i = 1, \dots, N_C - 1$$

$$\frac{dC_i}{dS} = C_i \sum_{j=1}^{N_C} \varepsilon_{i,j} C_j - \frac{\gamma W}{L_S} (C_i^W - C_i) \quad (4)$$

$$0 \leq S \leq S^W, i = 1, \dots, N_C - 1$$

که S شماره مراحل، C_i غنای هر جزء، L_S نرخ جریان ورودی به مرحله S ، S^P و S^W به ترتیب تعداد مراحل بخش غنی‌سازی و تهی‌سازی می‌باشند. ε_{ij} ضریب غنی‌سازی کلی برای جفت جزء i و j است. حل دسته معادلات ۳ و ۴ به علت وجود عبارت غیرخطی $C_i \sum_{j=1}^{N_C} \varepsilon_{i,j} C_j$ تنها از روش‌های عددی امکان‌پذیر است و برای حل تحلیلی باید این روابط را خطی نمود. خطی کردن رابطه ۳ با انجام عملیات ریاضی در نهایت منجر به رابطه ۵ می‌شود [۶].

$$\phi_{i,S} + \sum_{j=1}^{N_C} \frac{\gamma PC_j^P}{L_S} \int_0^S \phi_{i,t} \exp[\varepsilon_{i,j}(S-t)] dt = \sum_{j=1}^{N_C} \frac{C_j^P L_F}{L_S} \exp(\varepsilon_{i,j} S) \quad (5)$$

که P نرخ جریان سبک خروجی از آبشار، C_j^P غلظت جزء j ام در جریان سبک خروجی از آبشار، L_S نرخ جریان خوراک در مرحله S ام و ε_{ij} ضریب غنی‌سازی کلی برای جفت جزء i و j است و C_i^F غلظت جزء i ام در جریان خوراک، L_F نرخ جریان ورودی به مرحله ورود خوراک، F نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار و N_C تعداد اجزا است. نکته اصلی در این روش، جایگزینی غلظت‌های $C_{i,S}$ با توابع مشخصه $\phi_{i,S}$ می‌باشد که معادله انتقال جرم ۳ در یک آبشار را به شکل انتگرالی رابطه ۵ تبدیل می‌کند. با در نظر گرفتن $S = S_P - l$ معادله ۵ به صورت رابطه ۶ در می‌آید.

$$\phi_{i,l} + \sum_{j=1}^{N_C} \frac{\gamma PC_j^P}{L_i} \int_0^l \phi_{i,t} \exp[\varepsilon_{i,j}(l-t)] dt = \sum_{j=1}^{N_C} \frac{C_j^P L_0}{L_i} \exp(\varepsilon_{i,j} l) \quad (6)$$

با داشتن شرط مرزی $G_{i,0} = C_i^P L_0$ (نرخ جزیی جریان است)، رابطه به صورت زیر در می‌آید:

$$G_{i,l} = L_i C_{i,l} = \frac{L_0 C_i^P + \gamma PC_i^P \int_0^l \phi_{i,t} dt}{\phi_{i,l}} \quad (7)$$



بر این اساس نرخ جریان بین مراحل کل^۱ در یک آبشار Q از رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود [۶].

$$\sum L = \sum_{j=1}^{N_c} \left\{ \frac{PC_i^P [\exp(-Q_i S^P) - 1] + WC_i^W [\exp(Q_i S^W) - 1]}{Q_i^P} + \frac{PC_i^P S^P - WC_i^W S^W}{Q_i} \right\} \quad (24)$$

در حل تحلیلی آبشار Q ، M^* بایستی در محدوده خاصی انتخاب گردد. در ضمن ضروری است که مقادیر غلظت در جریان‌های خروجی از آبشار به طور صحیح تعیین شوند. به عبارت دیگر نباید مقدار غلظت خروجی یک جزء در جریان سبک و سنگین خروجی از آبشار هر دو بزرگتر از غلظت آن جزء در جریان خوراک باشند. در این روابط ε_{ij} معادل با لگاریتم α_{ij} که همان فاکتور جداسازی است در نظر گرفته شده است. مقدار جریان نسبی میان مرحله‌ای کل نیز به شکل $(\frac{\sum L \varepsilon_0^2}{2P})$ تعریف می‌شود.

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 جریان‌های سبک و سنگین خروجی از آبشار تهیه شده است که الگوریتم کلی آن مطابق شکل ۲ می‌باشد. ابتدا با در نظر گرفتن یک مقدار مشخص M^* و تعیین پارامتر Q ، تعداد مراحل غنی‌سازی (π_E) و تهی‌سازی (π_S) در آبشار با استفاده از روابط ۲۰ و ۲۲ تعیین می‌شود. سپس می‌توان غلظت دیگر ایزوتوپ‌ها در ابتدا و انتهای آبشار را محاسبه نمود. همچنین با استفاده از روابط ۲۱ و ۲۳ نسبت جریان سبک و سنگین آبشار 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 تهی‌سازی به پارامتر Q یا به عبارتی M^* وابسته است. بنابراین در این بخش مطابق الگوریتم نشان داده شده در شکل ۲، با تغییر مقادیر M^* جهت دستیابی به غنای مشخص یک ایزوتوپ خاص در جریان سبک و سنگین خروجی از 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 مرحله‌ای را داشته باشد.

پارامتر Q_i برای ایزوتوپ نام از رابطه ۱۶ قابل محاسبه است:

$$Q_i = \varepsilon_i (M^* - M_i) \quad (16)$$

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^* ($M_i > M^*$) در جریان سنگین آبشار قرار می‌گیرند. با استفاده از رابطه ۱۶ برای دو ایزوتوپ i و j ، رابطه بین Q_i و Q_j به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Q_i - Q_j = \varepsilon_i (M_j - M_i) \quad (17)$$

از طرفی در آبشارهای نوع نفوذ گازی و سانتریفیوژ گازی نیز ε_{ij} به صورت رابطه ۱۸ می‌باشد.

$$\varepsilon_{i,j} = \varepsilon_i (M_j - M_i) \quad (18)$$

از روابط ۱۷ و ۱۸، رابطه ۱۹ حاصل می‌شود.

$$Q_i - Q_j = \varepsilon_{i,j} \quad (19)$$

با استفاده از معادلات بقای جرم کلی و برای هر جزء (روابط ۱ و ۲)، و روابط ۷ و ۹ و با در نظر گرفتن $L_0 = 0$ و همچنین شرط بدیهی مجموع کل غلظت‌ها برابر یک، $\sum_{j=1}^{N_c} C_j = 1$ ، غلظت اجزاء در جریان سبک خروجی از آبشار و نسبت نرخ این جریان به نرخ جریان خوراک آبشار P/F به صورت روابط ۲۰ و ۲۱ حاصل می‌شود.

$$C_i^P = \frac{1 - \exp(Q_i S^W)}{\exp(-Q_i S^P) - \exp(Q_i S^W)} C_i^F \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^{N_c} \frac{1 - \exp(Q_j S^W)}{\exp(-Q_j S^P) - \exp(Q_j S^W)} C_j^F \quad (21)$$

$$\frac{P}{F} = \sum_{j=1}^{N_c} \frac{\exp(Q_j S^W) - 1}{\exp(-Q_j S^W) - \exp(Q_j S^P)} C_j^F \quad (21)$$

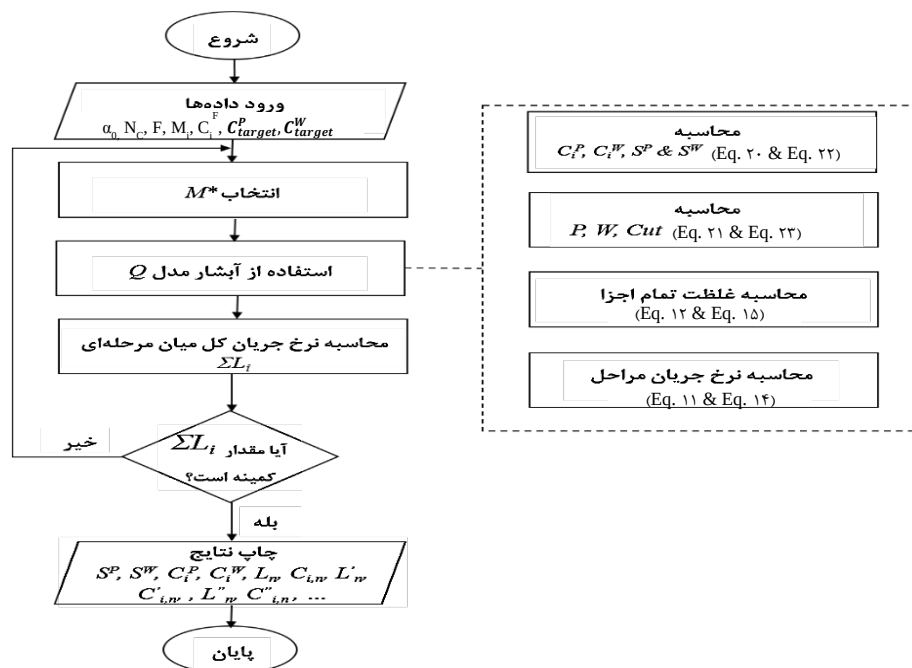
به طور مشابه، برای غلظت اجزاء در جریان سنگین آبشار و نسبت نرخ جریان سنگین به خوراک آبشار W/F روابط ۲۲ و ۲۳ حاصل می‌شوند.

$$C_i^W = \frac{\exp(-Q_i S^P) - 1}{\exp(-Q_i S^P) - \exp(Q_i S^W)} C_i^F \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^{N_c} \frac{\exp(-Q_j S^P) - 1}{\exp(-Q_j S^P) - \exp(Q_j S^W)} C_j^F \quad (23)$$

$$\frac{W}{F} = \sum_{j=1}^{N_c} \frac{1 - \exp(-Q_j S^P)}{\exp(Q_j S^W) - \exp(-Q_j S^P)} C_j^F \quad (23)$$





شکل ۲. الگوریتم مورد استفاده برای تعیین بهترین M^* .

جدول ۱. مشخصات ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم هگزا فلوراید به عنوان خوراک آبخار Q

شماره ایزوتوپ	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
عدد جرمی	۲۳۴	۲۳۶	۲۳۷	۲۳۸	۲۳۹	۲۴۰	۲۴۲	۲۴۴
غنا	۰.۰۰۰۹	۰.۰۲۴۶	۰.۰۰۸۷	۰.۰۴۶۱	۰.۰۶۹۹	۰.۱۸۷۲	۰.۳۱۷۹	۰.۳۴۴۷

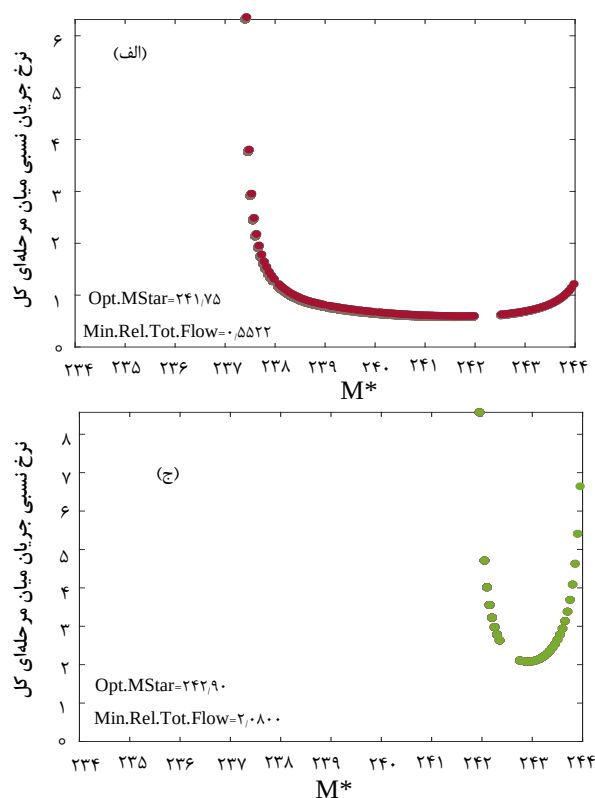
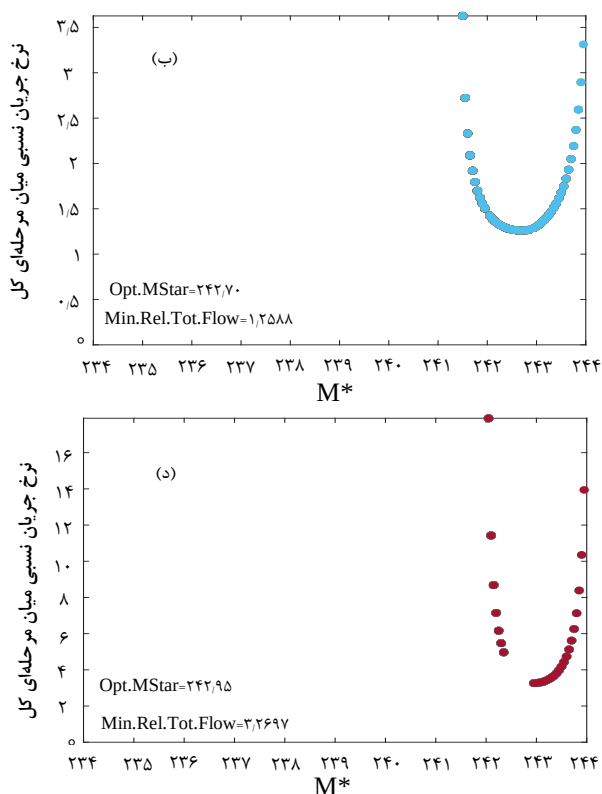
۴. نتایج و بحث

شکل ۳ تغییرات جریان نسبی میان مرحله‌ای کل^۱ با پارامتر M^* برای جداسازی ایزوتوپ هشتم تلوریم هگزا فلوراید تا غنای به ترتیب ۰.۴، ۰.۷، ۰.۹ و ۰.۹۹ در جریان خروجی سنگین، با شرط حداکثر غنای ۰.۵ در خروجی سبک آبخار را برای فاکتور جداسازی ۱/۱ نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هر اندازه میزان غنای ایزوتوپ هشتم افزایش یابد، محدوده تغییرات پارامتر M^* کاهش می‌یابد و میزان جریان نسبی میان مرحله‌ای افزایش می‌یابد. این محاسبات مجدداً برای جداسازی ایزوتوپ چهارم نیز انجام گرفته است. از آنجایی که نسبت جرم مولی ایزوتوپ چهارم به مجموع جرم مولی چهار ایزوتوپ اول بیش‌تر از نسبت جرم مولی آن، به پنج ایزوتوپ آخر می‌باشد، بنابراین این ایزوتوپ، در جریان سبک آبخار غنی می‌شود [۱۴]. شکل ۴ این تغییرات را برای جداسازی ایزوتوپ چهارم تا غنای ۰.۱، ۰.۳، ۰.۴ و ۰.۵ در جریان خروجی سبک، با شرط حداکثر غنای ۰.۱ در جریان سنگین آبخار نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این مورد نیز هر اندازه میزان غنای ایزوتوپ چهارم افزایش یابد محدوده تغییرات پارامتر M^* کاهش یافته و مقدار جریان نسبی میان مرحله‌ای افزایش می‌یابد.

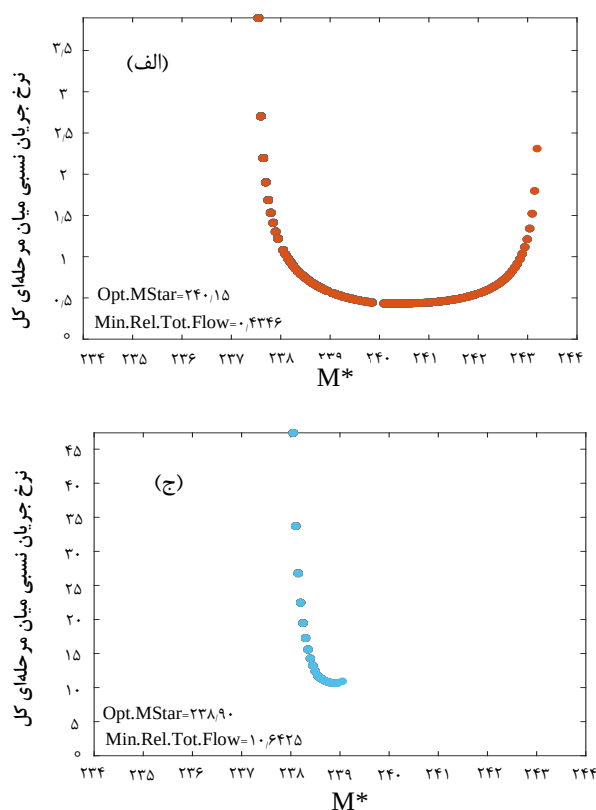
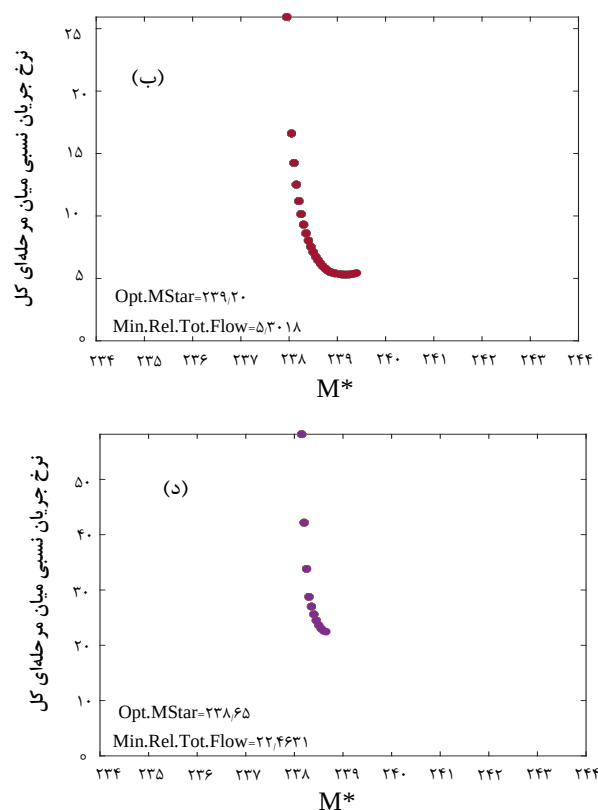
در این مقاله به بررسی تغییرات پارامتر M^* در آبخار مدل Q پرداخته می‌شود. با انتخاب مناسب پارامتر M^* ، بهترین آبخار Q با نرخ جریان میان مرحله‌ای کل کمینه قابل محاسبه خواهد بود که محاسبات برای غنی‌سازی دو جزء چهارم و هشتم ایزوتوپ‌های تلوریم هگزا فلوراید ارایه می‌شود. همچنین نتایج برای فاکتورهای جداسازی ۱/۱۰ و ۱/۰۵ نیز با یکدیگر مقایسه و اثر فاکتور جداسازی بر پارامتر M^* نیز بررسی می‌شود. هدف از بررسی‌های انجام شده، دستیابی به ایزوتوپ چهارم با غلظت ۰.۱، ۰.۳ و ۰.۴ و در جریان سبک خروجی از آبخار و هم چنین دستیابی به ایزوتوپ هشتم با غلظت ۰.۴، ۰.۷، ۰.۹ و ۰.۹۹ در جریان سنگین خروجی از آبخار می‌باشد. همچنین این محاسبات مجدداً با ثابت نگهداشتن مقدار غنای ایزوتوپ هدف در محصول و تغییر شرط حداکثر غنا در بخش تهی‌سازی به ترتیب تا مقادیر ۰.۰۱، ۰.۰۱، ۰.۰۲ و ۰.۰۳ در خروجی سنگین برای ایزوتوپ چهارم و ۰.۱، ۰.۰۵، ۰.۱ و ۰.۲ در خروجی سبک آبخار برای ایزوتوپ هشتم نیز انجام گرفته است.

مشخصات گاز تلوریم هگزا فلوراید به عنوان خوراک آبخار در جدول ۱ آورده شده است. مقدار خوراک ورودی به آبخار ۵ میلی‌گرم بر ثانیه تلوریم هگزا فلوراید در نظر گرفته شده است. با توجه به جرم مولی ایزوتوپ‌های تلوریم هگزا فلوراید، ایزوتوپ چهارم با جرم مولی ۲۳۸ که یک جزء سبک است در جریان خروجی سبک از آبخار غنی و در جریان خروجی سنگین تهی می‌شود. اما طبیعی است که ایزوتوپ هشتم با جرم مولی ۲۴۴ در خروجی سنگین آبخار غنی و در جریان خروجی سبک تهی گردد.





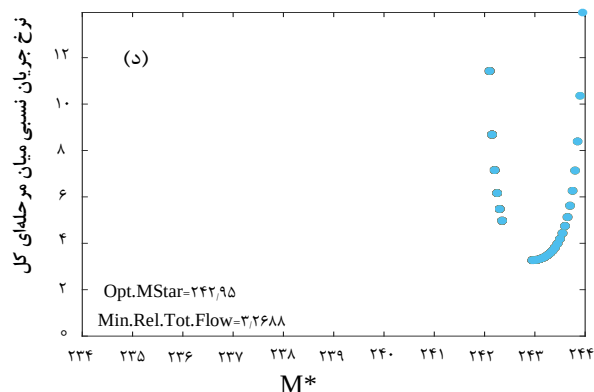
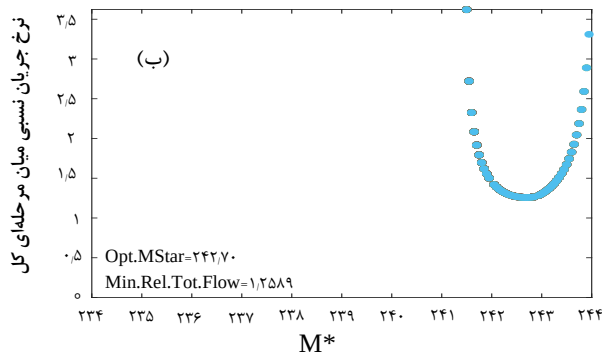
شکل ۳. اثر پارامتر M^* بر نرخ جریان نسبی میان مرحله‌ای کل برای افزایش غنای ایزوتوپ هشتم تا (الف) ۴۰٪، (ب) ۷۰٪، (ج) ۹۰٪، (د) ۹۹٪ و حداکثر غنای ۵٪ در خروجی سبک آبشار (فاکتور جداسازی ۱/۱۰).



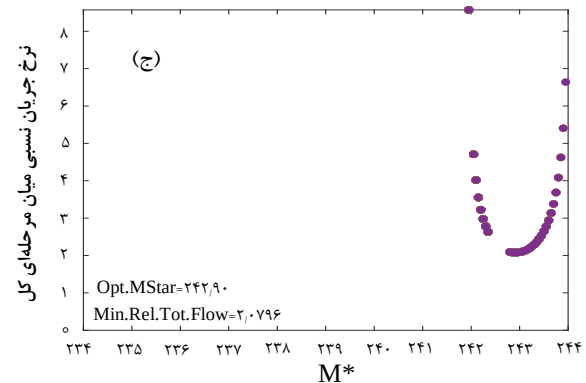
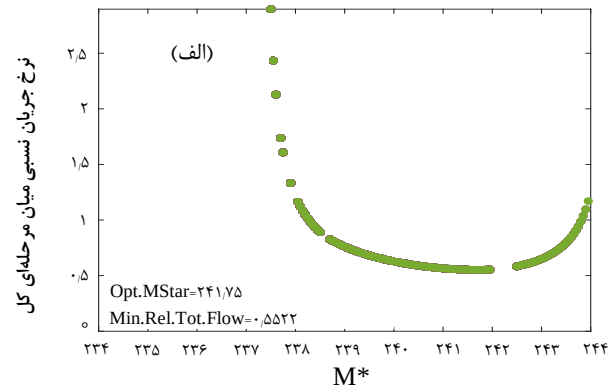
شکل ۴. اثر پارامتر M^* بر نرخ جریان نسبی میان مرحله‌ای کل برای افزایش غنای ایزوتوپ چهارم تا (الف) ۱۰٪، (ب) ۳۰٪، (ج) ۴۰٪، (د) ۵۰٪ و حداکثر غنای ۱٪ در خروجی سنگین آبشار (فاکتور جداسازی ۱/۱۰).



در جدول ۳ تعداد مراحل لازم برای رسیدن غنای ایزوتوپ هشتم از ۳۴/۴۷ درصد در خوراک ورودی به مقدار مورد نظر برای دو فاکتور جداسازی ۱/۰۵ و ۱/۱ آورده شده است. مطابق این جدول تعداد مراحل آبشار در فاکتور جداسازی ۱/۱ برای دستیابی به غناهای ۴۰، ۷۰، ۹۰ و ۹۹ درصد در خروجی سنگین با شرط حداکثر غنای ۵ درصد در خروجی سبک آبشار، به ترتیب برابر با ۱۵، ۳۰، ۴۶ و ۷۲ مرحله است.



به منظور بررسی اثر فاکتور جداسازی بر مقدار پارامتر M^* ، محاسبات برای ایزوتوپ هشتم با فاکتور جداسازی ۱/۰۵ نیز انجام گرفت. همان‌طور که از مقایسه شکل‌های ۳ و ۵ و جدول ۲ دیده می‌شود با کاهش فاکتور جداسازی از ۱/۱ به ۱/۰۵ مقدار بهینه M^* تغییر نمی‌کند و علی‌رغم افزایش مقدار جریان میان مرحله‌ای کل (ΣL)، مقدار جریان نسبی میان مرحله‌ای کل $(\frac{\sum L \varepsilon_i}{2P})$ تغییر نکرده و ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۵. اثر پارامتر M^* بر نرخ جریان نسبی میان مرحله‌ای کل برای افزایش غنای ایزوتوپ هشتم تا (الف) ۴۰٪، (ب) ۷۰٪، (ج) ۹۰٪، (د) ۹۹٪ و حداکثر غنای ۵٪ در خروجی سنگین آبشار (فاکتور جداسازی ۱/۰۵).

جدول ۳. تعداد مراحل لازم برای رسیدن به غنای مورد نظر ایزوتوپ هشتم در خروجی سنگین آبشار در یک گام جداسازی با شرط حداکثر غنای ۵ درصد در خروجی سبک آبشار

تعداد مراحل*		حداقل غنا در خروجی سنگین آبشار (٪)
فاکتور جداسازی ۱/۱	فاکتور جداسازی ۱/۰۵	
۱۵ (۲S+۱۳E)	۲۸ (۳S+۲۵E)	۴۰
۳۰ (۱۱S+۱۹E)	۵۷ (۲۱S+۳۶E)	۷۰
۴۶ (۲۲S+۲۲E)	۹۰ (۴۲S+۴۸E)	۹۰
۷۲ (۴۹S+۲۳E)	۱۴۱ (۴۴S+۹۷E)	۹۹

*S: مراحل تهی‌سازی و E: مراحل غنی‌سازی

جدول ۲. مقدار جریان میان مرحله‌ای کل برای رسیدن ایزوتوپ هشتم به غنای مورد نظر در خروجی سنگین آبشار در یک گام جداسازی با شرط حداکثر غنای ۵ درصد در خروجی سبک آبشار

ΣL		حداقل غنا در خروجی سنگین آبشار (٪)
فاکتور جداسازی ۱/۱	فاکتور جداسازی ۱/۰۵	
۱۷۳/۸۱	۴۵۹/۴۴	۴۰
۸۲۳/۵۸	۲۹۲۰/۶۲	۷۰
۱۵۴۰/۹۳	۵۸۱۶/۲۹	۹۰
۲۴۸۵/۹۷	۹۴۵۲/۵۴	۹۹



جدول ۵. مقدار محصول تولیدی ایزوتوپ‌های چهارم و هشتم برای غناهای مختلف به ازای ۵ میلی گرم بر ثانیه خوراک ورودی (فاکتور جداسازی ۱/۱)

ایزوتوپ چهارم		ایزوتوپ هشتم	
غنا (%)	مقدار محصول (میلی گرم بر ثانیه)	غنا (%)	مقدار محصول (میلی گرم بر ثانیه)
۱۰	۰,۲۰۳۵	۴۰	۱,۶۷۱۶
۳۰	۰,۱۹۱۳	۷۰	۱,۵۹۴۱
۴۰	۰,۱۸۶۶	۹۰	۱,۵۶۳۲
۵۰	۰,۱۸۴۷	۹۹	۱,۵۵۲۲

در شکل ۷ تغییرات جریان نسبی میان مرحله‌ای کل با پارامتر M^* برای جداسازی ایزوتوپ هشتم تا رسیدن به غنای ۹۹ درصد، این بار با شرط حداکثر غنای به ترتیب ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد در خروجی سبک آبشار نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار غنای این جزء در جریان سبک (کاهش محدودیت غنای خروجی جزء مطلوب در خروجی سبک آبشار) مقدار بهینه M^* تغییر نمی‌کند اما نرخ جریان میان مرحله‌ای کل و تعداد مراحل جداسازی لازم (جدول ۶) کاهش می‌یابد.

این محاسبات مجدداً برای جداسازی ایزوتوپ چهارم نیز انجام گرفته است. در این حالت افزایش غنای ایزوتوپ میانی چهارم تا ۰/۱، با شرط حداکثر غنای این جزء به ترتیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۳ در خروجی سنگین در نظر گرفته شده و نتایج در شکل ۸ آورده شده است.

مطابق شکل در این حالت با توجه به میانی بودن این ایزوتوپ، با افزایش مقدار غنای آن در خروجی سبک (کاهش محدودیت غنای خروجی جزء مطلوب در خروجی سبک آبشار) مقدار بهینه M^* کمی تغییر یافته، نرخ جریان میان مرحله‌ای کل و تعداد مراحل جداسازی لازم (جدول ۷) کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق یک کد محاسباتی برای طراحی یک آبشار مدل Q، به منظور تجزیه و تحلیل و تعیین پارامترهای مؤثر برای جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی تهیه شده است. در اجرای این کد با بهینه کردن مقدار پارامتر M^* ، مناسب‌ترین آبشار Q (کمترین نرخ جریان میان مرحله‌ای کل جهت دستیابی به غنای مشخص) برای جداسازی ایزوتوپ‌های چهارم و هشتم تلوریم هگزا فلوراید تعیین شد.

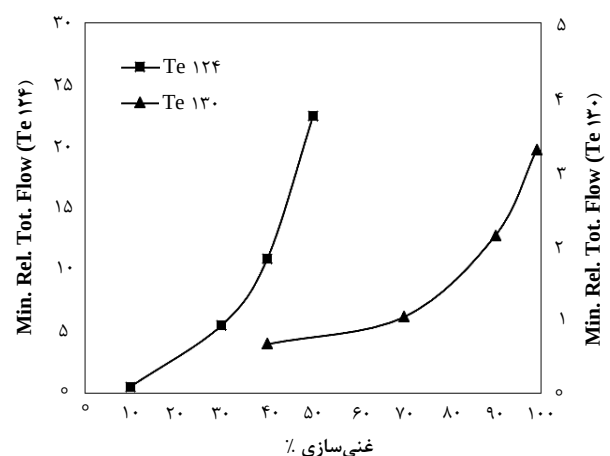
همچنین مطابق جدول ۴ برای ایزوتوپ چهارم با توجه به این‌که در هر صورت غنای آن در یک آبشار به ۹۰ درصد نمی‌رسد، تعداد مراحل لازم برای رسیدن غنای آن از ۴/۶۱ درصد در خوراک ورودی به ۱۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد در خروجی سبک با شرط حداکثر غنای ۱ درصد در خروجی سنگین آبشار آورده شده است.

مطابق نتایج برخلاف ایزوتوپ‌های انتهایی، امکان افزایش غنای ایزوتوپ‌های میانی با استفاده از یک آبشار تا مقادیر بالا وجود ندارد. براساس شکل ۶ برای غنی نمودن ایزوتوپ‌های میانی به جریان نسبی میان مرحله‌ای کل بیش‌تری نیز نیاز است. همچنین با افزایش غنای مطلوب برای هر ایزوتوپ مقدار جریان نسبی میان مرحله‌ای کل نیز بیش‌تر می‌شود.

در جدول ۵ نتایج مربوط به مقدار محصول تولیدی ایزوتوپ‌های چهارم و هشتم تلوریم هگزا فلوراید برای غناهای مختلف آورده شده است. مطابق جدول به ازای ۵ میلی گرم بر ثانیه خوراک ورودی، هرچه غنای ایزوتوپ‌ها در خروجی بیش‌تر می‌شود مقدار محصول کم‌تر می‌شود.

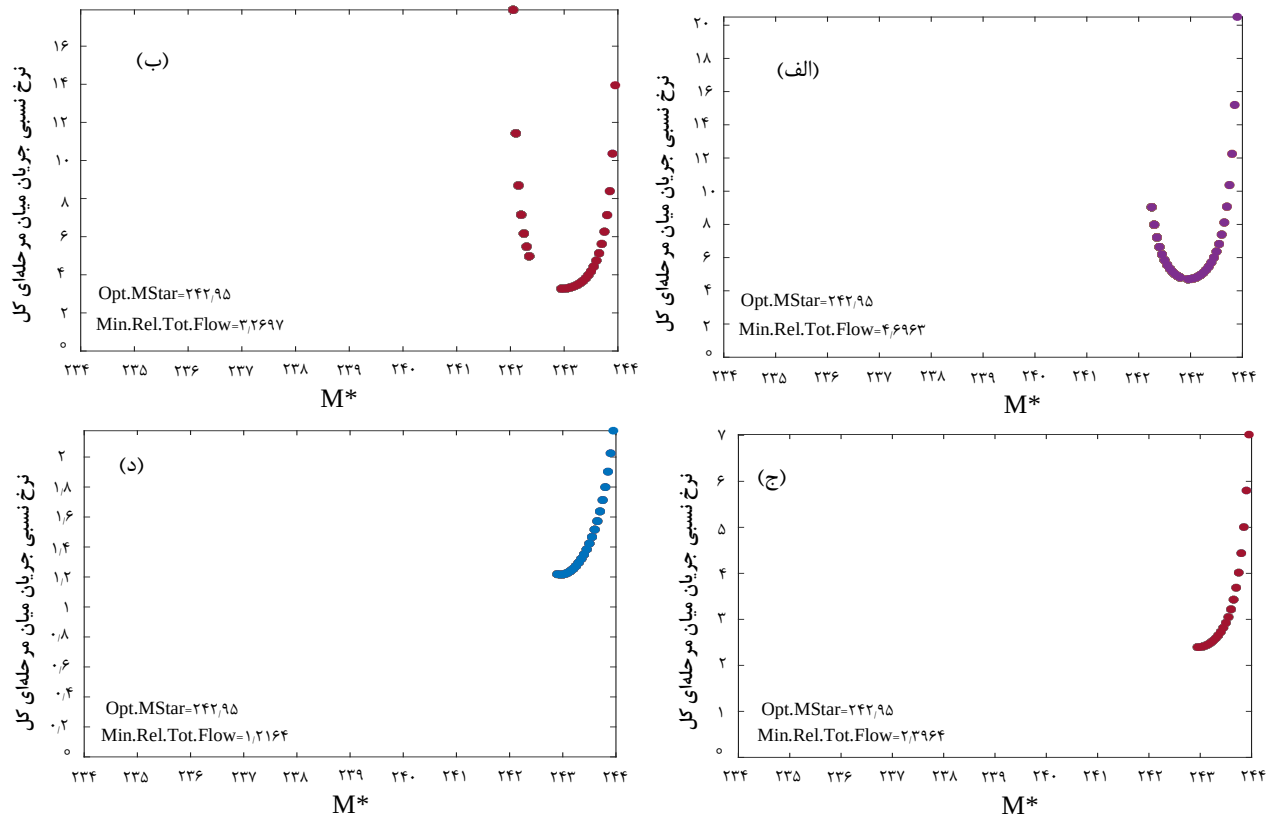
جدول ۴. تعداد مراحل لازم برای رسیدن به غنای مورد نظر ایزوتوپ چهارم در خروجی سبک آبشار در یک گام جداسازی با شرط حداکثر غنای ۱ درصد در خروجی سنگین آبشار

حداقل غنا در خروجی سبک آبشار (%)	تعداد مراحل	
	فاکتور جداسازی ۱/۰۵	فاکتور جداسازی ۱/۱
۱۰	۲۶ (۱۵S+۱۱E)	۱۴ (۸S+۶E)
۳۰	۷۴ (۲۷S+۴۷E)	۳۸ (۱۴S+۲۴E)
۴۰	۱۱۱ (۳۶S+۷۵E)	۵۷ (۱۸S+۳۹E)
۵۰	۲۰۵ (۵۰S+۱۵۵E)	۱۰۵ (۲۵S+۸۰E)

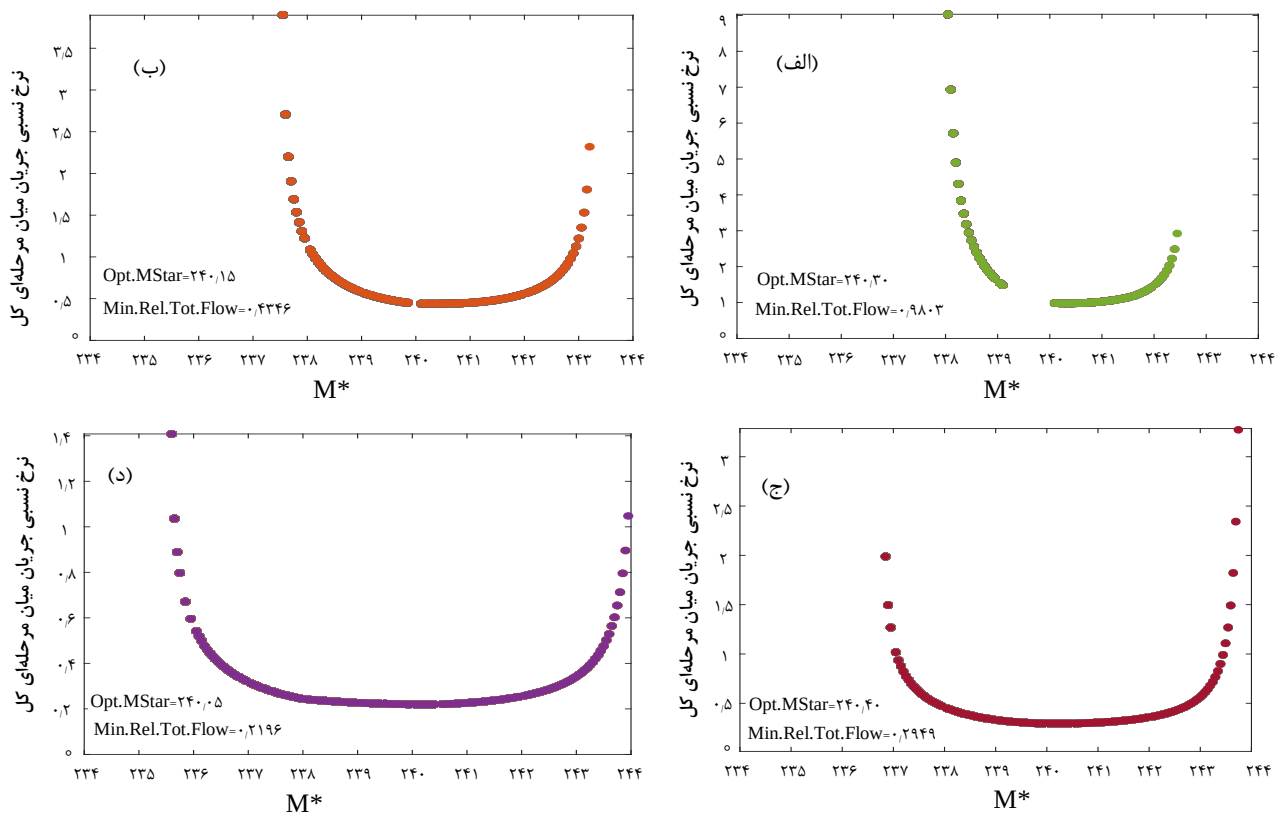


شکل ۶. اثر غنای ایزوتوپ‌های چهارم و هشتم بر نرخ جریان نسبی میان مرحله‌ای کل (فاکتور جداسازی ۱/۱).





شکل ۷. اثر پارامتر M^* بر نرخ نسبی جریان میان مرحله‌ای کل برای افزایش غنای ایزوتوپ هشتم تا ۹۹٪ و با شرط حداکثر غنا در خروجی سبک آبشار به ترتیب (الف) ۱٪، (ب) ۵٪، (ج) ۱۰٪، (د) ۲۰٪ (فاکتور جداسازی ۱/۱۰).



شکل ۸. اثر پارامتر M^* بر نرخ نسبی جریان میان مرحله‌ای کل برای افزایش غنای چهارم تلوریم تا ۱۰٪ و با شرط حداکثر غنا در خروجی سنگین آبشار به ترتیب (الف) ۱٪، (ب) ۱٪، (ج) ۲٪، (د) ۳٪ (فاکتور جداسازی ۱/۱۰).



مطابق نتایج برای غنی نمودن ایزوتوپ‌های میانی به جریان نسبی میان مرحله‌ای کل بیش‌تری نیز نیاز است و هرچه غنا بیش‌تر می‌شود مقدار محصول کم‌تر می‌گردد. هم‌چنین برخلاف ایزوتوپ‌های انتهایی، غلظت ایزوتوپ‌های میانی با استفاده از یک آبشار به مقدار بالا نمی‌رسد و بنابراین به منظور رساندن غنای آن‌ها به مقادیر بالا، لازم است از چند گام جداسازی استفاده نمود.

مراجع

- De.La. Garza A., A generalization of the matched abundance-ratio cascade for multicomponent isotope separation, *Chem. Eng. Sci.*, **18**, 73 (1963).
- R. Kuchеров, N.P. Minenko, Theory of cascade for separating Multi-component isotope mixtures, *Atomic Energy*, **19**, 1290 (1965).
- N.A. Kolokoltsov, Design of Cascades for separating isotope mixtures, *UDC 621.039.3*, (1970).
- G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich, Cascade for Separation of Multicomponent Isotope Mixtures, *Sep. Sci. Tech.*, **36**(8&9), 1769–1817 (2001).
- Sh. Zeng, et al., Use of the Q-cascade in calculation and optimization of multi-isotope separation, *Chem. Eng. Sci.*, **66**, 2997–3002 (2011).
- V.D. Borisevich, G.A. Sulaberidze, S. Zeng, New Approach to Optimize Q-Cascades, *Chem. Eng. Sci.*, **66**, 393–396 (2011).
- T.M. Song, et al., Comparative study of the model and optimum cascades for multicomponent isotope separation, *Sep. Sci. Tech.*, **45** (14), 2113–2118 (2010).
- R.C. Raichura, M.A.M. Al-Janabi, G.M. Langbein, The effect of the 'KEY' molar mass on the design of a cascade handling a multi-isotopic mixture, *Annals of Nuclear Energy*, **18**, 327 (1991).
- F. Mansourzadeh, et al., Comparison of optimum tapered cascade and optimal square cascade for separation of xenon isotopes using enhanced TLBO algorithm, *Sep. Sci. Tech.*, **53**, 2074–2087 (2018).
- V.A. Palkin, Optimization of a centrifuge cascade for separating a multicomponent mixture of isotopes, *Atomic Energy*, **14**, 109–115 (2013).
- F. Mansourzadeh, et al., Performance comparison of match abundance ratio cascade with optimal conditions for the separation of stable xenon isotopes, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **94**, 4 (2021) (In Persian).
- F. Mansourzadeh, et al., Utilization of harmony search algorithm to optimize a cascade for separating multicomponent mixtures, *Progress in Nuclear Energy*, **111**, 165–173 (2019).
- J. Safdari, A. Norouzi, R. Tumari, Using a Real Coded PSO Algorithm in the Design of a Multi-Component Counter-Current Cascade, *Sep. Sci. Techno*, **52**, 2855–2862 (2017).
- S. Zeng, Y. Chuntong, A method of separating a middle component in multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge cascades, *Sep. Sci. Tech.*, **35**, 2173–2186 (2000).

جدول ۶. تعداد مراحل لازم برای رسیدن به غنای ۹۹ درصد ایزوتوپ هشتم در خروجی سنگین آبشار در یک گام جداسازی با شرط حداکثر غنا در خروجی سبک آبشار به ترتیب ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد

تعداد مراحل	حداکثر غنا در خروجی سبک آبشار (%)	
	فاکتور جداسازی ۱/۱	فاکتور جداسازی ۱/۰.۵
۱	۸۹ (۴۹S+۴۰E)	۱۷۵ (۹۷S+۷۸E)
۵	۷۲ (۴۹S+۲۳E)	۱۴۱ (۹۶S+۴۵E)
۱۰	۶۵ (۴۹S+۱۶E)	۱۲۷ (۹۶S+۳۱E)
۲۰	۵۷ (۴۹S+۸E)	۱۱۰ (۹۵S+۱۵E)

جدول ۷. تعداد مراحل لازم برای رسیدن به غنای ۱۰ درصد ایزوتوپ چهارم در خروجی سبک آبشار در یک گام جداسازی با شرط حداکثر غنا در خروجی سنگین آبشار به ترتیب ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد

تعداد مراحل	حداکثر غنا در خروجی سنگین آبشار (%)	
	فاکتور جداسازی ۱/۱	فاکتور جداسازی ۱/۰.۵
۰.۱	۲۵ (۱۸S+۷E)	۴۸ (۳۶S+۱۲E)
۱	۱۴ (۸S+۶E)	۲۶ (۱۵S+۱۱E)
۲	۱۰ (۴S+۶E)	۱۹ (۸S+۱۱E)
۳	۸ (۲S+۶E)	۱۵ (۴S+۱۱E)

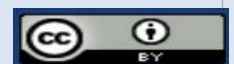
مطابق نتایج، برای جداسازی ایزوتوپ‌ها، با افزایش غنای ایزوتوپ هدف در جریان محصول یا پسماند، محدوده تغییرات پارامتر M^* به منظور دستیابی به کمینه نرخ نسبی جریان کاهش می‌یابد.

هم‌چنین با کاهش فاکتور جداسازی، مقدار بهینه M^* تغییر نمی‌کند و علی‌رغم افزایش مقدار جریان میان مرحله‌ای کل با کاهش فاکتور جداسازی، مقدار جریان نسبی میان مرحله‌ای کل نیز بدون تغییر و ثابت باقی می‌ماند. در ضمن، بدیهی است که تعداد مراحل جداسازی برای رسیدن غنای ایزوتوپ‌ها به مقدار معین در یک گام جداسازی، با افزایش فاکتور جداسازی از ۱/۰.۵ به ۱/۱، کاهش می‌یابد.

در بررسی مجدد محاسبات با ثابت نگه‌داشتن مقدار غنای ایزوتوپ‌های هدف در جریان محصول و تغییر مقدار شرط غنا در جریان‌های پسماند آن‌ها، مقدار پارامتر M^* برای ایزوتوپ هشتم ثابت می‌ماند و برای ایزوتوپ میانی چهارم تغییر اندکی ایجاد شد، اما در این حالت نیز مقدار جریان نسبی میان مرحله‌ای کل با کاهش مقدار غنا در جریان پسماند افزایش یافت.

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 قربانپور خمسه، سید جابر صفدری (۱۴۰۱)، بررسی تأثیر پارامتر M^* و α_0 بر روی جداسازی ایزوتوپ‌های چهارم و هشتم تلوریم در آبشار مدل Q، ۱۰۱، ۵۵–۶۴

DOI: 10.24200/nst.2022.1447

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1447.html

