

مقایسه عملکرد زنجیره‌های غلظت تطبیق‌یافته و شبه‌دوتایی نوع اول در غنی‌سازی ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳

فرزانه اعزازی^۱، محمدحسن ملاح*^۱، جواد کریمی ثابت^۱، علی نوروزی^۲

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

۲. شرکت فن‌آوری‌های پیشرفته‌ی ایران، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹۵-۵۹۳۱، تهران - ایران

*Email: mmallah@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۳/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۴/۱۵

چکیده

در این پژوهش، به بررسی و یافتن پارامترهای دو زنجیره مدل مطرح در جداسازی مخلوط‌های چندجزیی (زنجیره‌های غلظت تطبیق یافته و شبه‌دوتایی نوع اول) به منظور جداسازی ایزوتوپ پایدار تلوریم-۱۲۳ و مقایسه عملکرد آن‌ها در حالت تغییرات اجزاء k_1 و k_2 پرداخته شده است. برای یک زنجیره ۱۰ مرحله‌ای با مرحله ورود خوراک ۵ و نرخ جریان خوراک 100 g.s^{-1} ، نتایج نشان داد که کم‌ترین نرخ جریان بین مراحل کل در زنجیره غلظت تطبیق یافته در شرایط $k=7$ ، $k_1=1$ و $k_2=3$ به میزان $1881.133 \text{ g.s}^{-1}$ اتفاق می‌افتد. در این حالت غلظت تلوریم-۱۲۳ در محصول زنجیره برابر با 0.0349 می‌باشد؛ در حالی که بیشینه غلظت این ایزوتوپ در شرایط $k=1$ ، $k_1=1$ و $k_2=2$ به میزان 0.0389 اتفاق می‌افتد که در این زنجیره میزان نرخ جریان بین مراحل کل برابر با $2159.914 \text{ g.s}^{-1}$ است. همچنین نتایج در زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول نشان می‌دهند که حداقل نرخ جریان بین مراحل کل و بیشینه غلظت ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ به طور هم‌زمان در شرایط $k=1$ ، $k_1=1$ و $k_2=2$ به ترتیب به میزان $2159.914 \text{ g.s}^{-1}$ و 0.0389 رخ می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: زنجیره غلظت تطبیق‌یافته، زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول، ایزوتوپ پایدار، تلوریم-۱۲۳، نرخ جریان بین مراحل کل

Performance comparison of matched-x cascades and pseudo binary type 1 cascades in the separation of isotope Te-123

F. Eazazi¹, M.H. Mallah*¹, J. Karimisabet¹, A. Norouzi²

1. Materials and Nuclear Fuel 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 15.6.2018, Accepted 6.7.2019

Abstract

In the present research, we addressed the investigation parameters of the two proposed cascade models for separation of multi-component mixtures (Matched-X and Pseudo binary type 1 cascades) to separate Te-123 isotope. Besides, we compared their performance by changing parameters k , k_1 , and k_2 . The results showed that for a cascade with 10 stages and feed stage 5 and feed flow rate 100 g.s^{-1} , the minimum total interstage flow of the matched-X cascade occurs in the condition $k = 7$, $k_1 = 1$ and $k_2 = 3$, with the amount of $1881.133 \text{ g.s}^{-1}$. In this case, the concentration of Te-123 in the product stream of the cascade is equal to 0.0349 while the maximum product concentration of Te-123 occurs at $k = 1$, $k_1 = 1$ and $k_2 = 2$ with the amount of 0.0389. In this cascade, the total inter stage flow is equal to $2159.914 \text{ g.s}^{-1}$. Also, the results represented that in the Pseudo binary type 1 cascade, the minimum total interstage flow and maximum product concentration of Te-123 occur at the same time, in the condition $k = 1$, $k_1 = 1$ and $k_2 = 2$ with the amounts of 2159.914 and 0.0389 g.s^{-1} , respectively.

Keywords: Matched-x cascade, Pseudo binary type 1 cascade, Stable isotope, Tellurium 123, Total inter stage flow



۱. مقدمه

استفاده فزاینده از ایزوتوپ‌های پایدار معمولاً ناشی از تقاضای تحقیقات بنیادی فیزیک، روش‌های تشخیص و درمان پزشکی و توسعه مواد جدید است و مصرف آن‌ها روزبه‌روز در حال افزایش می‌باشد. بنابراین نیاز به توسعه روش‌هایی برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار وجود دارد. از آن‌جا که استفاده از ماشین‌های سانتریفیوژ برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار سنگین و نیمه‌سنگین و روش تقطیر برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار سبک در دنیا شناخته شده‌اند [۱-۳]، با توجه به نیمه‌سنگین بودن ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم، بررسی و پژوهش بر روی شبیه‌سازی زنجیره‌های متشکل از ماشین‌های سانتریفیوژ ضروری به نظر می‌رسد.

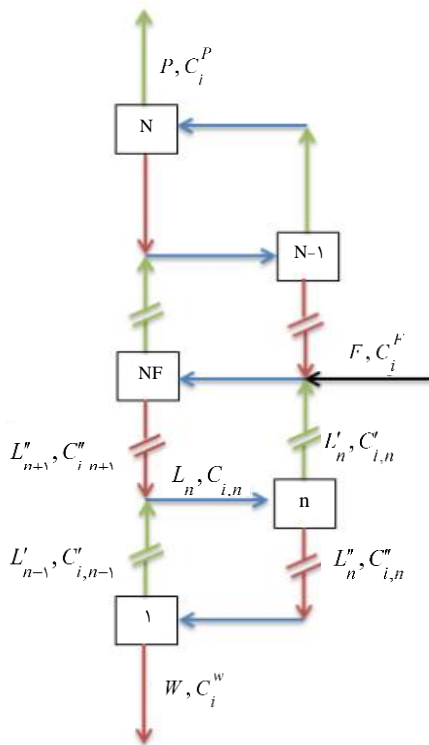
در فرایند شبیه‌سازی زنجیره‌های جداسازی، گام اول از تئوری تا عمل و هم‌چنین پیش‌فرض ساخت یک زنجیره با قابلیت عملیاتی، استفاده از یک زنجیره مدل و در اختیار داشتن آن زنجیره لازم می‌باشد [۴]. یک زنجیره مدل که برای جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیم مورد استفاده قرار می‌گیرد، زنجیره ایده‌آل است که در آن نه تنها در نقاط تلاقی جریان‌ها، غلظت جریان‌ها لزوماً با هم برابرند، بلکه در تمامی مراحل، ضرایب غنی‌سازی و تهی‌سازی نیز با هم برابر می‌باشند. برخلاف جداسازی مخلوط‌های دو جزئی، راه‌های احتمالی بسیاری برای خلق زنجیره مدل در جداسازی ایزوتوپی در مخلوط‌های چند جزئی وجود دارد. به‌عنوان نمونه می‌توان به زنجیره نسبت فراوانی تطبیق‌یافته^۱ اشاره نمود که توسط دلاگازا و همکارانش در سال ۱۹۶۱ پیشنهاد داده شد [۵]. نمونه دیگر زنجیره غلظت تطبیق‌یافته^۲ است که دلاگازا و همکارانش در سال ۱۹۶۱ [۵] و مورفی در سال ۱۹۶۲ [۶] به آن پرداختند. زنجیره شبه‌ایده‌آل^۳ نیز در سال ۱۹۶۸ توسط اپلبلات و ایلمد [۷] و در سال ۲۰۰۰ توسط سزیکین پیشنهاد شد [۸]. زنجیره‌های شبه‌دوتایی نوع اول، دوم و سوم^۴ نیز در سال ۲۰۱۴ توسط زنگ و همکارانش پیشنهاد شد [۴]. لازم به ذکر است که مدل‌سازی برخی از این زنجیره‌ها، مانند زنجیره نسبت فراوانی تطبیق‌یافته، قبلاً به روش تحلیلی مورد بررسی

قرار گرفته‌اند [۹-۱۲]. مدل‌سازی به روش عددی نیز در یک مورد، به روش نیوتن و به‌کارگیری تکنیک پیوسته انجام پذیرفته است. نتایج مدل‌سازی به این روش تنها برای زنجیره‌های نسبت فراوانی تطبیق‌یافته، زنجیره شبه‌ایده‌آل و زنجیره شبه‌دوتایی نوع دوم در حالت فاکتور جداسازی ثابت گزارش شده است. هم‌چنین نتایج به‌دست آمده توسط زنگ و همکاران در ارتباط با شبیه‌سازی زنجیره غلظت تطبیق‌یافته نشان داد که در نظر گرفتن شرط تطبیق غلظت در مرحله ورود خوراک، منجر به دست‌یابی به پارامترهای غیرعملیاتی برای این نوع زنجیره خواهد شد [۴]. علاوه بر آن در یک مورد، مقایسه عملکرد زنجیره‌های نسبت فراوانی تطبیق‌یافته، زنجیره شبه‌ایده‌آل و زنجیره غلظت تطبیق‌یافته در مورد جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تنگستن به کمک روش عددی انجام گرفته است [۱۳]. در موردی دیگر، مقایسه عملکرد سه زنجیره Q، نسبت فراوانی تطبیق‌یافته و شبه‌ایده‌آل به‌وسیله روش تحلیلی به انجام رسیده است [۱۴]. با این‌حال در مورد زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول تاکنون نتایجی گزارش نشده است. نکته حایز اهمیت دیگر این است که مدل‌سازی و تحلیل عملکرد جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم، به‌دلیل تعداد ایزوتوپ‌های زیاد و گستره وسیع فراوانی طبیعی ایزوتوپ‌های آن، کار دشواری است. بنابراین، ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳، که یکی از ایزوتوپ‌های میانی است، جهت نمونه انتخاب شد. از این ایزوتوپ به‌منظور تولید ۱۲۳ با غناهای بالاتر از ۹۹/۹ درصد استفاده می‌شود که در مراجع، به تحلیل عملکرد زنجیره‌های مدل برای جداسازی این ایزوتوپ پرداخته نشده است. از طرفی، نتایج حاصل از زنجیره‌های مدل در جداسازی چندجزئی می‌تواند به‌عنوان تخمین اولیه در فرایند یافتن پارامترهای بهینه زنجیره مورد استفاده قرار گیرد [۱۵-۱۶]. بنابراین، هرچه زنجیره مدل انتخاب‌شده برای این امر از کارایی بالاتری برخوردار بوده و به اصطلاح بهینه باشد، فرایند بهینه‌سازی زنجیره با موفقیت بیشتری همراه خواهد بود. بنابراین لازم است که با بررسی عملکرد زنجیره‌های مدل گوناگون در شرایط مختلف و مقایسه عملکرد آن‌ها با یک‌دیگر، نسبت به انتخاب زنجیره مدل مناسب اقدام کرد.

در پژوهش حاضر، مدل‌سازی زنجیره‌های غلظت تطبیق‌یافته و شبه‌دوتایی نوع اول و مقایسه عملکرد این دو زنجیره در

1. Matched-Abundance Ratio Cascade
2. Matched-X Cascade
3. Quasi-Ideal cascade
4. Pseudo-Binary Type 1, 2 and 3 Cascade





شکل ۱. زنجیره جداسازی سیستم چندجزیی.

معادله بقای جرم برای جزء i در هر مرحله به صورت رابطه

۷ است:

$$C_{i,n}L_n - C'_{i,n}L'_n - C''_{i,n}L''_n = 0 \quad (i = 1, \dots, N_c) \quad (7)$$

با نوشتن این رابطه برای هریک از ایزوتوپ‌های تلوریم و جمع آن‌ها با یکدیگر، موازنه جرم کلی برای هر مرحله حاصل می‌گردد که به صورت رابطه ۸ است:

$$L_n - L'_n - L''_n = 0 \quad (n = 1, \dots, N) \quad (8)$$

در نقاط تلاقی که دو یا تعداد بیشتری از جریان‌ها با هم ادغام می‌شوند نیز روابط ۹ تا ۱۲ در مراحل مختلف برقرار است:

$$C_{i,n}L_n - C''_{i,n+1}L''_{n+1} = 0 \quad (n = 1), (i = 1, \dots, N_c) \quad (9)$$

$$C_{i,n}L_n - C'_{i,n-1}L'_{n-1} - C''_{i,n+1}L''_{n+1} = 0 \quad (n \neq 1, N_F, N), (i = 1, \dots, N_c) \quad (10)$$

$$C_{i,n}L_n - C'_{i,n-1}L'_{n-1} - C''_{i,n+1}L''_{n+1} = C_i^F F \quad (n = N_F), (i = 1, \dots, N_c) \quad (11)$$

$$C_{i,n}L_n - C'_{i,n-1}L'_{n-1} = 0 \quad (n = N), (i = 1, \dots, N_c) \quad (12)$$

غنی‌سازی ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ برای اولین بار صورت گرفته است. در این راستا، به منظور تحلیل عملکرد این زنجیره‌ها و حل معادلات حاکم و در نتیجه دستیابی به پارامترهای آن‌ها، از تکنیک پیوسته^۱ برای جلوگیری از حساسیت مسئله به حدس اولیه و از روش ناحیه اطمینان داگ‌لگ^۲ برای حل دستگاه معادلات حاکم بر مسئله استفاده شده و کدی جدید توسعه داده شد که توانایی شبیه‌سازی این زنجیره‌ها و مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد زنجیره‌ها را داراست.

۲. تئوری

پیش از پرداختن به مدل‌ها، لازم است به معادلات حاکم بر مسئله، که برای تمامی زنجیره‌های جریان برگشتی مشترک می‌باشند، پرداخته شود. در شکل ۱ زنجیره جداسازی سیستم چندجزیی نشان داده شده است. تعداد اجزاء برابر با N_C و تعداد مراحل غنی‌سازی برابر با N است. جریان خوراک با نرخ جریان F در مرحله N_F با ترکیب درصد C_i^F ($i = 1, \dots, N_C$) وارد زنجیره می‌شود. نرخ جریان‌های خوراک، بالاسری و پایین‌دستی مراحل به ترتیب با L_n ، L'_n و L''_n و ترکیب درصدهای آن‌ها به ترتیب با $C_{i,n}$ ، $C'_{i,n}$ و $C''_{i,n}$ نمایش داده می‌شود. همچنین نرخ جریان‌های سنگین و سبک زنجیره به ترتیب با W و P و ترکیب درصد آن‌ها نیز به ترتیب با C_i^W و C_i^P نشان داده می‌شود.

روابط تعریف‌کننده برش در مراحل مختلف، معادلات ۱ و ۲ می‌باشند که از موازنه جرم کلی در نقاط تلاقی جریان‌ها، روابط ۳ تا ۶ حاصل می‌گردند:

$$L'_n - \theta_n L_n = 0 \quad (n = 1, \dots, N) \quad (1)$$

$$L''_n - (1 - \theta_n)L_n = 0 \quad (n = 1, \dots, N) \quad (2)$$

$$L_n - L''_{n+1} = 0 \quad (n = 1) \quad (3)$$

$$L_n - L'_{n-1} - L''_{n+1} = 0 \quad (n \neq 1, N_F, N) \quad (4)$$

$$L_n - L'_{n-1} - L''_{n+1} - F = 0 \quad (n = N_F) \quad (5)$$

$$L_n - L'_{n-1} = 0 \quad (n = N) \quad (6)$$

1. Continuation Technique
2. Trust Region Dogleg



زنجیره غلظت تطبیق‌یافته، شرط مورد استفاده در مراحل، تطبیق غلظت یکی از ایزوتوپ‌های موجود در مخلوط در نقاط تلاقی جریان‌ها است. هم‌چنین زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول، شرط عدم اختلاط دو گروهی را در مراحل مختلف برقرار می‌کند، به این معنی که مجموع غلظت‌ها در دو گروه تعیین شده، در نقاط تلاقی جریان‌ها با یک‌دیگر برابر باشند. در ادامه به معرفی معادله مربوط به هر یک از این زنجیره‌ها پرداخته شده است.

۱.۲ معادله مورد استفاده در زنجیره غلظت تطبیق‌یافته

در این زنجیره، شرایط رابطه ۱۵ برای غلظت جزء k در نقطه ادغام جریان‌ها در نظر گرفته می‌شود [۴]:

$$C'_{k,n-1} = C''_{k,n+1} \quad (n = 2, 3, \dots, N_F - 1, N_F + 1, \dots, N - 1) \quad (15)$$

از طرف دیگر در مراحل ۱، N_F و N که یا ادغام جریان وجود ندارد و یا بیش از دو جریان با هم ادغام می‌گردند، جداسازی متقارن بین اجزاء k_1 و k_2 در نظر گرفته شده و رابطه ۱۶، که در آن فاکتورهای غنی‌سازی و تهی‌سازی با روابط ۱۷ تعریف می‌گردند، برای این مراحل برقرار خواهد بود [۴]. مشخص است که بایستی سه جزء k_1 ، k_2 و k_3 تعیین گردند. معادله اضافی مورد استفاده در این سه مرحله از زنجیره، رابطه فاکتور غنی‌سازی ذکر شده در معادله ۱۷ می‌باشد.

$$\beta_{(k_1, k_2)} = \gamma_{(k_1, k_2)} = \sqrt{\alpha_{(k_1, k_2)}} \quad (16)$$

$$\beta_{(k_1, k_2)} = \frac{C'_{k_1} / C'_{k_2}}{C_{k_1} / C_{k_2}}, \quad \gamma_{(k_1, k_2)} = \frac{C_{k_1} / C_{k_2}}{C''_{k_1} / C''_{k_2}} \quad (17)$$

۲.۲ معادله مورد استفاده در زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول

در این زنجیره، مشابه زنجیره جداسازی دوجزی، اجزاء ۱ تا k با هم به‌عنوان یک جزء ترکیبی و اجزاء $k+1$ تا N_c نیز به‌عنوان جزء ترکیبی دیگر در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین شرایط عدم اختلاط مشابه سیستم‌های دو جزیی به‌صورت رابطه ۱۸ خواهد بود [۴]:

$$\sum_{i=1}^k C'_{i,n-1} = \sum_{i=1}^k C''_{i,n+1} \quad (n = 2, 3, \dots, N_F - 1, N_F + 1, \dots, N - 1) \quad (18)$$

برای هر مرحله، فاکتور جداسازی توسط رابطه ۱۳ تعریف می‌شود [۱۷]:

$$\alpha_{ij,n} = \frac{C'_{i,n} / C'_{j,n}}{C''_{i,n} / C''_{j,n}} = \alpha_{i,n}^{M_j - M_i} \quad (i = j - 1, j = 2, \dots, N_c) \quad (13)$$

که در آن α_{ij} فاکتور جداسازی بین اجزاء i و j است و M_i و M_j به ترتیب وزن مولکولی جزءهای i و j می‌باشند. اجزاء طوری مرتب شده‌اند که اگر $i < j$ باشد، آن‌گاه $M_i < M_j$ و $\alpha_{i,n}$ فاکتور جداسازی کلی برای اختلاف جرم واحد ($M_j - M_i = 1$) می‌باشد. اگرچه مقدار $\alpha_{i,n}$ می‌تواند از یک مرحله به مرحله دیگر تغییر کند، اما برای سادگی روش حل، این مقدار ثابت و برابر α_0 در نظر گرفته می‌شود. رابطه ۱۴ نیز در مورد غلظت‌های اجزاء در تمامی مراحل برقرار است [۴]:

$$\sum_{i=1}^{N_c} C_{i,n} = \sum_{i=1}^{N_c} C'_{i,n} = \sum_{i=1}^{N_c} C''_{i,n} = 1 \quad (14)$$

در هر مرحله تعداد $3 \times N_c + 3$ مجهول وجود دارد که تعداد $3 \times N_c$ از آن‌ها مربوط به غلظت‌های N_c جزء در سه جریان خوراک، بالاسری و پایین دستی آن مرحله و تعداد ۳ مجهول دیگر نیز مربوط به نرخ این جریان‌ها (L'_n ، L''_n و L_n) می‌باشد. بنابراین تعداد مجهولات در کل زنجیره ($3 \times N_c + 3$) است و از این‌رو برای مشخص شدن تمام مجهولات زنجیره، به همین تعداد معادله نیاز است. از روابط ۷ تا ۱۲ در مجموع تعداد $2N_c$ معادله برای هر مرحله استخراج می‌شود. با استفاده از رابطه ۱۳ نیز تعداد ($N_c - 1$) معادله برای هر مرحله استخراج می‌شود. با استفاده از رابطه ۱۴ نیز برای هر مرحله سه معادله استخراج می‌شود و در مجموع تعداد ($3 \times N_c + 2$) معادله برای هر مرحله و بنابراین در مجموع ($3 \times N_c + 2$) معادله برای کل زنجیره حاصل می‌گردد که N معادله کم‌تر از تعداد مجهولات است. بنابراین در هر مرحله نیاز به یک معادله دیگر می‌باشد تا تعداد مجهولات مسئله و معادلات با هم برابر شده و دستگاه معادلات تولیدشده قابل حل باشد. این معادله در واقع با در نظر گرفتن شرایط و مدل‌های مختلف برای زنجیره، قابل برداشت و استفاده خواهد بود. دو نوع از زنجیره‌های مدل مطرح، زنجیره غلظت تطبیق‌یافته و زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول می‌باشند. در



$$PC'_{i,N} + WC''_{i,1} = FC''_i^F \quad (24)$$

در روش تکرار q ، پارامتر q به صورت رابطه ۲۵ و پس از بازنویسی، به صورت رابطه ۲۶ تعریف می‌شود. در این رابطه $q_k = C'_k / C''_k$ و $q_i = C'_i / C''_i$ تعریف می‌شوند:

$$\alpha_{ik} = q_i / q_k = \alpha_{i,k}^{M_k - M_i} \quad (25)$$

$$q_{i,n} = q_{k,n} \alpha_{i,k}^{M_k - M_i} \quad (26)$$

با توجه به تعریف پارامتر q ، برای غلظت جریان بالاسری ایزوتوپ i رابطه خطی ۲۷ برحسب غلظت جریان پایین دستی ایزوتوپ i حاصل می‌شود:

$$C'_{i,n} = q_{i,n} C''_{i,n} \quad (27)$$

برای شروع فرایند حل معادلات، مقدار $q_{k,n}$ برای تمامی مراحل حدس زده می‌شود و با استفاده از رابطه ۲۶، مقدار $q_{i,n}$ برای همه مراحل و همه ایزوتوپ‌ها محاسبه می‌گردد. با مشخص شدن این پارامتر، می‌توان در معادلات ۱۹ و ۲۰ به جای غلظت بالاسری از رابطه ۲۷ برحسب غلظت پایین دستی جای‌گذاری نمود. در نهایت با انجام جای‌گذاری‌ها برای هر ایزوتوپ، دستگاه معادلاتی خطی شده با $N-1$ مجهول شامل $C''_{i,2}$ الی $C''_{i,N}$ تشکیل شده و به راحتی حل می‌شود. پس از محاسبه غلظت جریان پایین دستی مربوط به ایزوتوپ i در مراحل ۲ تا N ، غلظت $C''_{i,1}$ از موازنه کلی به دست آمده و سپس برای محاسبه غلظت جریان بالاسری هر ایزوتوپ در تمامی مراحل، از رابطه ۲۷ استفاده می‌شود. در نهایت برای محاسبه غلظت هر یک از ایزوتوپ‌ها در جریان خوراک ورودی به مراحل، از روابط ۲۱ تا ۲۳ استفاده می‌شود. با محاسبه غلظت‌ها، برای اصلاح پارامتر $q_{k,n}$ از رابطه ۲۸ استفاده می‌شود. شرط همگرایی به صورت اغنا شدن رابطه مرتبط با محدودیت غلظت‌ها در تمامی جریان‌ها (براساس معادله ۱۴) منظور می‌شود.

$$q_{k,n} = \frac{\sum_i C_{i,n}}{\sum_i \alpha_{i,k}^{M_j - M_i} C''_{i,n}} \quad (28)$$

در مراحل ۱، N_F و N نیز همانند زنجیره غلظت تطبیق یافته، شرط جداسازی متقارن به کمک رابطه ۱۶ اعمال می‌شود.

۳.۲ الگوریتم حل زنجیره‌های غلظت تطبیق یافته و زنجیره شبه دوتایی نوع اول

۱.۳.۲ الگوریتم حل زنجیره غلظت تطبیق یافته

دستگاه معادلات ذکر شده در بخش قبلی، به روش ناحیه اطمینان و نیز به کمک روش تکمیلی تکنیک پیوسته قابل حل می‌باشد. در الگوریتم‌های کامل شبیه‌سازی این زنجیره و تکنیک پیوسته، ابتدا معلومات مسئله به عنوان ورودی داده می‌شود که شامل تعداد مراحل زنجیره، مرحله ورود خوراک، نرخ جریان و ترکیب درصد خوراک ورودی به زنجیره، مقدار α_i در مراحل و همچنین تعیین شماره اجزاء k_1 ، k_2 و k می‌باشند. پس از آن، به کمک روابط ۱ تا ۶ و با استفاده از یک حدس اولیه دلخواه (به دلیل استفاده از روش تکنیک پیوسته و عدم حساسیت این روش به حدس اولیه که در این جا مقدار برش اولیه ۰/۴ برای تمامی مراحل در نظر گرفته شده است) برای برش مراحل، نرخ همه جریان‌ها به دست می‌آیند. در ادامه، غلظت تمامی ایزوتوپ‌ها متناظر با جریان‌های به دست آمده در بالا به روش تکرار q به دست می‌آید [۱۸]. این روش به منظور تعیین توزیع غلظت ایزوتوپ‌ها در طول مراحل زنجیره در حالتی که شرایط هیدرولیکی زنجیره یا به عبارتی نرخ همه جریان‌ها معلوم باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس این روش، خطی کردن معادلات غیرخطی موجود به کمک تعریف پارامتر q و سپس حل دستگاه معادلات خطی شده است. روابط ۱۹ تا ۲۰ برای مقطع بین مراحل n و $n+1$ ، معادلات ۲۱ الی ۲۳ برای کلیه مراحل و رابطه ۲۴ برای کل زنجیره در نظر گرفته می‌شوند.

$$L'_n C'_{i,n} - L''_{n+1} C''_{i,n+1} = -WC''_{i,1} \quad 1 \leq n < N_F \quad (19)$$

$$L'_n C'_{i,n} - L''_{n+1} C''_{i,n+1} = PC'_{i,N} \quad N_F \leq n < N \quad (20)$$

$$L'_n C'_{i,n} + L''_n C''_{i,n} = (L'_{n-1} + L''_{n+1}) C_{i,n}, 1 \leq n < N_F \quad (21)$$

$$L'_n C'_{i,n} + L''_n C''_{i,n} = (L'_{n-1} + L''_{n+1} + F) C_{i,n} \quad n = N_F \quad (22)$$

$$L'_n C'_{i,n} + L''_n C''_{i,n} = (L'_{n-1} + L''_{n+1}) C_{i,n} \quad N_F < n \leq N \quad (23)$$



جریان‌های ذکر شده می‌باشد. سپس معیار همگرایی بررسی می‌شود. در این جا معیار همگرایی، اختلاف میان نرخ جریان‌ها در دو تکرار متوالی است. اگر این معیار برآورده شده باشد (در این جا مقداری کم‌تر از 10^{-7}) الگوریتم پایان می‌یابد؛ در غیر این صورت، الگوریتم به ابتدای تکنیک پیوسته بازگشت داده شده و جواب‌های تکرار فعلی به‌عنوان حدس اولیه برای تکرار بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مجدداً تکنیک پیوسته بر روی معادلات اعمال می‌شود و تا زمان همگرایی، برنامه ادامه می‌یابد.

$$C_{k,n-1}^{r(ni)} - C_{k,n+1}^{r(ni)} = [C_{k,n-1}^{r(ni-1)} - C_{k,n+1}^{r(ni-1)}] (1 - e^{-mi}) \quad (31)$$

در توضیح روش ناحیه اطمینان، لازم به ذکر است که این روش نیز همانند سایر روش‌های براساس نیوتن، بر پایه تکرار استوار است. برای به‌کارگیری این روش، یک تابع شایستگی^۱ تعریف می‌شود که به کمک آن تصمیم‌گیری شود که آیا x_{k+1} از x_k بهتر یا بدتر است. گام نیوتن d_k ریشه تابع رابطه ۳۲ است:

$$M(x_k + d) = F(x_k) + J(x_k)d \quad (32)$$

بنابراین d_k یک کمینه از $m(d)$ است که به‌صورت رابطه ۳۳ تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \min_d m(d) &= \frac{1}{\nu} \left\| M(x_k + d) \right\|_{\nu}^{\nu} = \\ &= \frac{1}{\nu} \left\| F(x_k) + J(x_k)d \right\|_{\nu}^{\nu} = \frac{1}{\nu} F(x_k)^T F(x_k) \\ &+ d^T J(x_k)^T F(x_k) + \frac{1}{\nu} d^T (J(x_k)^T J(x_k))d \quad (33) \end{aligned}$$

بنابراین تابع $m(d)$ انتخاب مناسبی برای تابع شایستگی می‌باشد که در آن شرط $\|d\| \leq \Delta_k$ برقرار است. همچنین شرط $\Delta_k > 0$ بیانگر شعاع ناحیه اطمینان^۲ می‌باشد. گام d از تلفیق دو گام کوشی^۳ و گاوس - نیوتن^۴ به‌دست می‌آید. برای محاسبه

پس از اعمال روش تکرار q و دست‌یابی به غلظت‌ها به همراه جریان‌های به‌دست آمده در مرحله قبلی، حدس اولیه دستگاه معادلات غیرخطی حاکم بر مسئله را تشکیل می‌دهند. این دستگاه، شامل معادلات ۷، ۹ تا ۱۵ و رابطه ۱۷ برای زنجیره غلظت تطبیق‌یافته و معادلات ۷، ۹ تا ۱۴، ۱۷ و ۱۸ برای زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول می‌باشد. این حدس اولیه وارد الگوریتم مربوط به تکنیک پیوسته می‌شود. در الگوریتم تکنیک پیوسته ابتدا $\beta_{(k_1, k_2), n}$ و $\beta_{(k_1, k_2), n}^{\circ}$ با استفاده از معادلات رابطه ۲۹ محاسبه می‌گردند:

$$\beta_{(k_1, k_2)} = \alpha_{\circ}^{(M_{k_2} - M_{k_1})/\tau}, \quad \beta_{(k_1, k_2), n}^{\circ} = \frac{C_{k_1, n}^{n_i} / C_{k_2, n}^{n_i}}{C_{k_1, n}^{n_i} / C_{k_2, n}^{n_i}} \quad (29)$$

$\beta_{(k_1, k_2)}$ ضریب غنی‌سازی بین اجزاء k_1 و k_2 است که در نهایت باید به این مقدار در مراحل دست یافت. $\beta_{(k_1, k_2), n}^{\circ}$ مقدار اولیه ضریب غنی‌سازی بین اجزاء k_1 و k_2 در مرحله n است که برای محاسبه آن از مقادیر غلظت‌های موجود در حدس اولیه استفاده می‌شود. n_i شماره تکرار است و در ابتدا برابر با صفر می‌باشد.

پس از این مرحله، با استفاده از رابطه ۳۰ مقدار $\beta_{(k_1, k_2), n}^{n_i}$ که ضریب غنی‌سازی بین اجزاء k_1 و k_2 در مرحله n و در تکرار n_i می‌باشد، محاسبه می‌شود و در رابطه مربوط به شرط تقارن برای مراحل اول، آخر و مرحله ورود خوراک در دستگاه معادلات غیرخطی حاکم بر مسئله قرار داده می‌شود.

$$\beta_{(k_1, k_2), n}^{n_i} = \beta_{(k_1, k_2), n}^{\circ} * e^{-mi} + \beta_{(k_1, k_2)} * (1 - e^{-mi}) \quad (30)$$

هم‌چنین مقدار عبارت $[C_{k,n-1}^{r(ni-1)} - C_{k,n+1}^{r(ni-1)}] (1 - e^{-mi})$ نیز از نتایج حاصل از تکرار قبلی محاسبه می‌گردد و معادله ۳۱ با استفاده از این عبارت، در دستگاه معادلات غیرخطی حاکم بر مسئله قرار می‌گیرد.

پس از این مرحله، دستگاه معادلات غیرخطی، به روش ناحیه اطمینان حل شده و مجهولات مسئله به‌دست می‌آیند که شامل نرخ جریان خوراک، جریان بالاسری و جریان پایین‌دستی تمامی مراحل به همراه غلظت همه ایزوتوپ‌ها در

1. Merit Function
2. Trust-Region Radius
3. Cauchy
4. Gauss-Newton



روشن است که تابع شایستگی و مسئله اصلی، در حالتی انطباق بیش‌تری با هم خواهند داشت که نسبت Γ_k به اندازه کافی نزدیک به یک باشد. اگر Γ_k از یک مقدار ثابت μ بزرگ‌تر باشد، گام قابل قبول خواهد بود و $x_{k+1} = x_k + d_k$ انجام خواهد پذیرفت و شعاع ناحیه اطمینان می‌تواند به روز شود. در غیراین صورت شعاع ناحیه اطمینان باید کاهش یابد و چرخه حل مجدداً تکرار شود. در این پژوهش از نرم‌افزار متلب جهت استفاده از این روش استفاده شده است.

۲.۳.۲ الگوریتم حل زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول

الگوریتم حل زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول، همانند الگوریتم حل زنجیره غلظت تطبیق‌یافته است با این تفاوت که عبارت $\sum_{i=1}^k [C_{k,n-1}^{r(n_i-1)} - C_{k,n+1}^{n(n_i-1)}]$ محاسبه شده و به جای معادله ۳۱، از معادله ۴۱ در دستگاه معادلات غیرخطی استفاده می‌گردد:

$$\sum_{i=1}^k [C_{k,n-1}^{r(n_i)} - C_{k,n+1}^{n(n_i)}] = (1 - e^{-\tau_i}) \sum_{i=1}^k [C_{k,n-1}^{r(n_i-1)} - C_{k,n+1}^{n(n_i-1)}] \quad (41)$$

الگوریتم حل زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول به‌عنوان نمونه در شکل ۲ نشان داده شده است. الگوریتم حل زنجیره غلظت تطبیق‌یافته نیز به‌صورت مشابه می‌باشد. به‌منظور بررسی و مقایسه زنجیره‌های غلظت تطبیق‌یافته و شبه‌دوتایی نوع اول، کدی جدید به نام EMN-CAS تهیه شد. با استفاده از این کد می‌توان آزمون‌های مختلفی را جهت یافتن شرایط بهینه در زنجیره طراحی نمود. یکی از این آزمون‌ها، یافتن زنجیره‌ای است که در آن، علاوه بر بیشینه نمودن غلظت ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ در محصول یک زنجیره با تعداد مراحل و مرحله ورود خوراک معین، حداقل نرخ جریان‌های بین مراحل کل به‌دست آید. خوراک ورودی به زنجیره، گاز هگزا فلوراید تلوریم با ترکیب درصد طبیعی مندرج در جدول ۱ است [۱۹].

گام کوشی که با d_C نشان داده می‌شود، از رابطه ۳۴ استفاده می‌شود. برای محاسبه پارامتر α از رابطه ۳۵ و برای محاسبه پارامتر τ_k از رابطه ۳۶ استفاده می‌گردد:

$$d_C = -\alpha J(x_k)^T F(x_k) \quad (34)$$

$$\alpha = \tau_k \left(\frac{\Delta_k}{\|J(x_k)^T F(x_k)\|_r} \right) \quad (35)$$

$$\tau_k = \min \left\{ 1, \frac{\|J(x_k)^T F(x_k)\|_r^2}{\Delta_k F(x_k)^T J(x_k) (J(x_k)^T J(x_k)) J(x_k)^T F(x_k)} \right\} \quad (36)$$

گام گاوس-نیوتن نیز که با نماد d_{GN} نشان داده شده است از رابطه ۳۷ محاسبه می‌گردد:

$$J(x_k) \cdot d_{GN} = -F(x_k) \quad (37)$$

از تلفیق این دو گام به کمک رابطه ۳۸، گام روش ناحیه اطمینان به‌دست خواهد آمد:

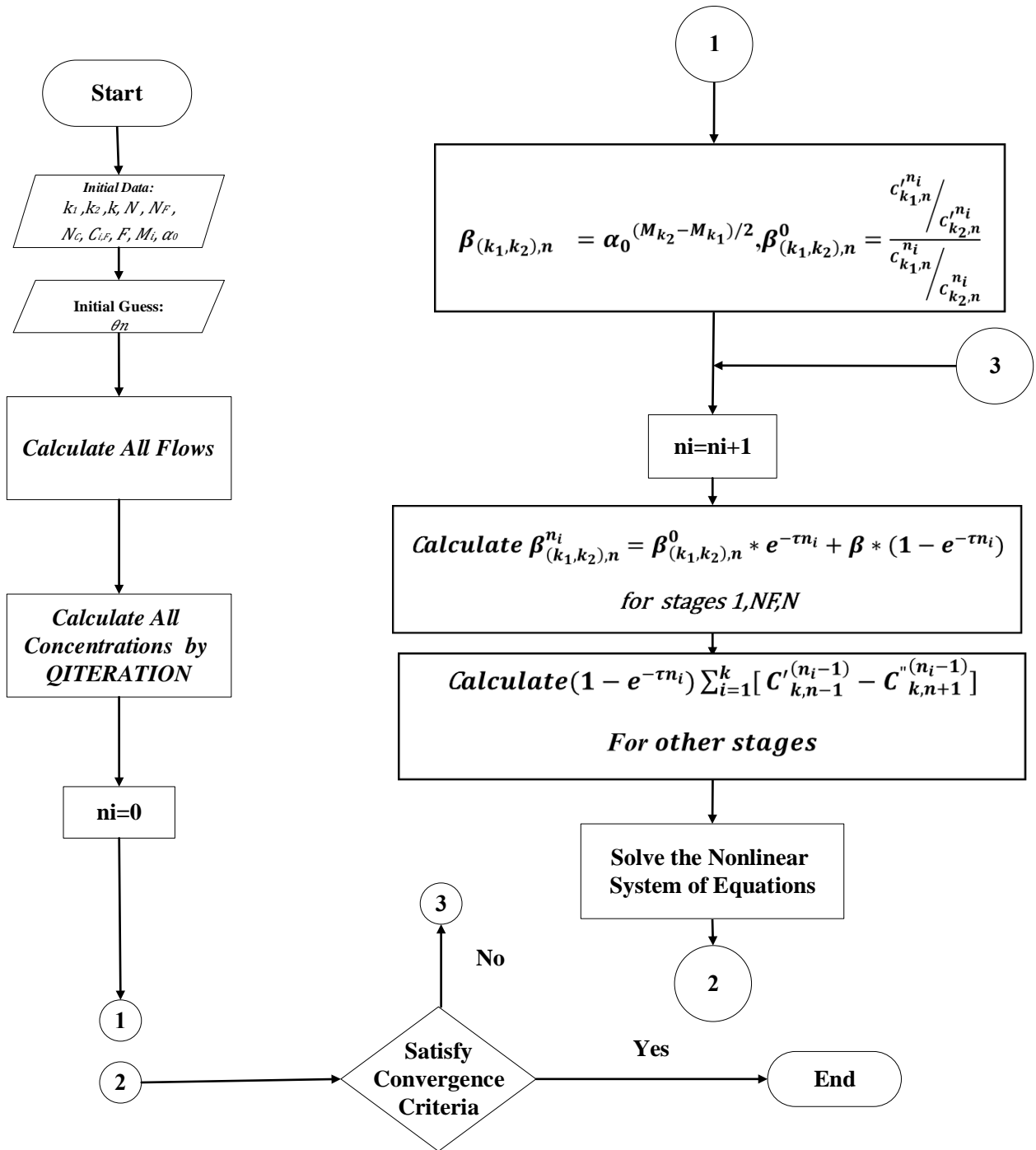
$$d = d_C + \lambda(d_{GN} - d_C) \quad (38)$$

که در آن λ بزرگ‌ترین مقدار در بازه ۰ و ۱ است که شرط $\|d\| \leq \Delta$ صادق است. اگر J_k (نزدیک به) منفرد باشد، آنگاه d تنها از گام کوشی به‌دست خواهد آمد. نسبت r_k یا همان کاهش واقعی به کاهش پیش‌بینی شده با رابطه ۳۹ تعریف می‌شود که در آن $f(X_k+d)$ طبق رابطه ۴۰ تعریف می‌شود:

$$r_k = \frac{f(X_k) - f(X_k + d_k)}{m(X_k) - m(X_k + d_k)} \quad (39)$$

$$f(X_k + d) = \frac{1}{\gamma} F(X_k + d)^T F(X_k + d) \quad (40)$$





شکل ۲. الگوریتم شبیه‌سازی زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول.

جدول ۱. مشخصات خوراک ورودی به زنجیره‌ها و ترکیب درصد اجزاء

ترکیب درصد خوراک								ایزوتوپ
¹³⁰ TeF ₆	¹³² TeF ₆	¹³³ TeF ₆	¹³⁴ TeF ₆	¹³⁵ TeF ₆	¹³⁶ TeF ₆	¹³⁸ TeF ₆	¹³⁷ TeF ₆	
۲۳۴	۲۳۶	۲۳۷	۲۳۸	۲۳۹	۲۴۰	۲۴۲	۲۴۴	جرم مولی (gr/mol)
۰٫۰۰۰۸۹	۰٫۰۲۴۶	۰٫۰۰۸۷	۰٫۰۴۶۱	۰٫۰۶۹۹	۰٫۱۸۷۲	۰٫۳۱۷۹	۰٫۳۴۴۷	غلظت (درصد وزنی)



۳. یافته‌ها و بحث

آزمون‌های طراحی شده، برای زنجیره‌های ده مرحله‌ای غلظت تطبیق‌یافته و شبه‌دوتایی نوع اول با ورود خوراک به مرحله ۵ و با نرخ جریان 100 g.s^{-1} و فاکتور جداسازی واحد برابر با ۱/۱ انجام پذیرفت. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب میزان نرخ جریان بین مراحل کل زنجیره‌های غلظت تطبیق‌یافته و شبه‌دوتایی نوع اول، با تغییرات اجزاء k_1 ، k_2 و k نشان داده شده‌اند. با توجه به این که تلوریم دارای ۸ ایزوتوپ است، بنابراین به منظور بررسی کلیه حالات ممکن و امکان مقایسه دو زنجیره، بازه تغییرات اجزاء k و k_1 از ۱ الی ۷، و بازه تغییرات جزء k_2 نیز از k_1+1 تا ۸ در نظر گرفته شد. به منظور تکمیل نتایج ارایه‌شده، نتایج مربوط به شرایط k برابر با ۸ نیز برای زنجیره غلظت تطبیق‌یافته گزارش می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل در زنجیره غلظت تطبیق‌یافته به صورت زیر است:

- در شرایط ۱، ۲، ۳ و ۷، $k=1$ ، در یک k معین تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل روندی صعودی دارد و هر چه اجزاء k_1 و k_2 دارای وزن مولکولی کم‌تری باشند و اختلاف وزن مولکولی آن‌ها نیز کاهش یابد، نرخ جریان بین مراحل کل نیز کم‌تر خواهد بود.

- در شرایط $k=4$ تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل به صورت نزولی - صعودی می‌باشد.

- در شرایط ۵ و ۶، $k=5$ در یک k معین تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل روندی نزولی داشته و هر چه اجزاء k_1 و k_2 دارای وزن مولکولی بیش‌تری باشند و اختلاف وزن مولکولی آن‌ها کم‌تر باشد، نرخ جریان بین مراحل کل نیز کاهش خواهد یافت.

- در شرایط $k=8$ نیز تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل روندی نزولی داشته و هر چه اجزاء k_1 و k_2 دارای وزن مولکولی بیش‌تری باشند و اختلاف وزن مولکولی آن‌ها کم‌تر باشد، نرخ جریان بین مراحل کل نیز کاهش خواهد یافت.

از شکل ۴ نیز نتیجه می‌شود که تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل در زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول به صورت زیر است:

- در شرایط ۱، ۲، ۳ و ۴، $k=1$ در یک k معین تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل روندی صعودی دارد و هر چه اجزاء k_1 و k_2 ایزوتوپ‌های دارای وزن مولکولی کم‌تری باشند و اختلاف وزن مولکولی آن‌ها کم‌تر باشد، نرخ جریان بین مراحل کل نیز کم‌تر خواهد بود.

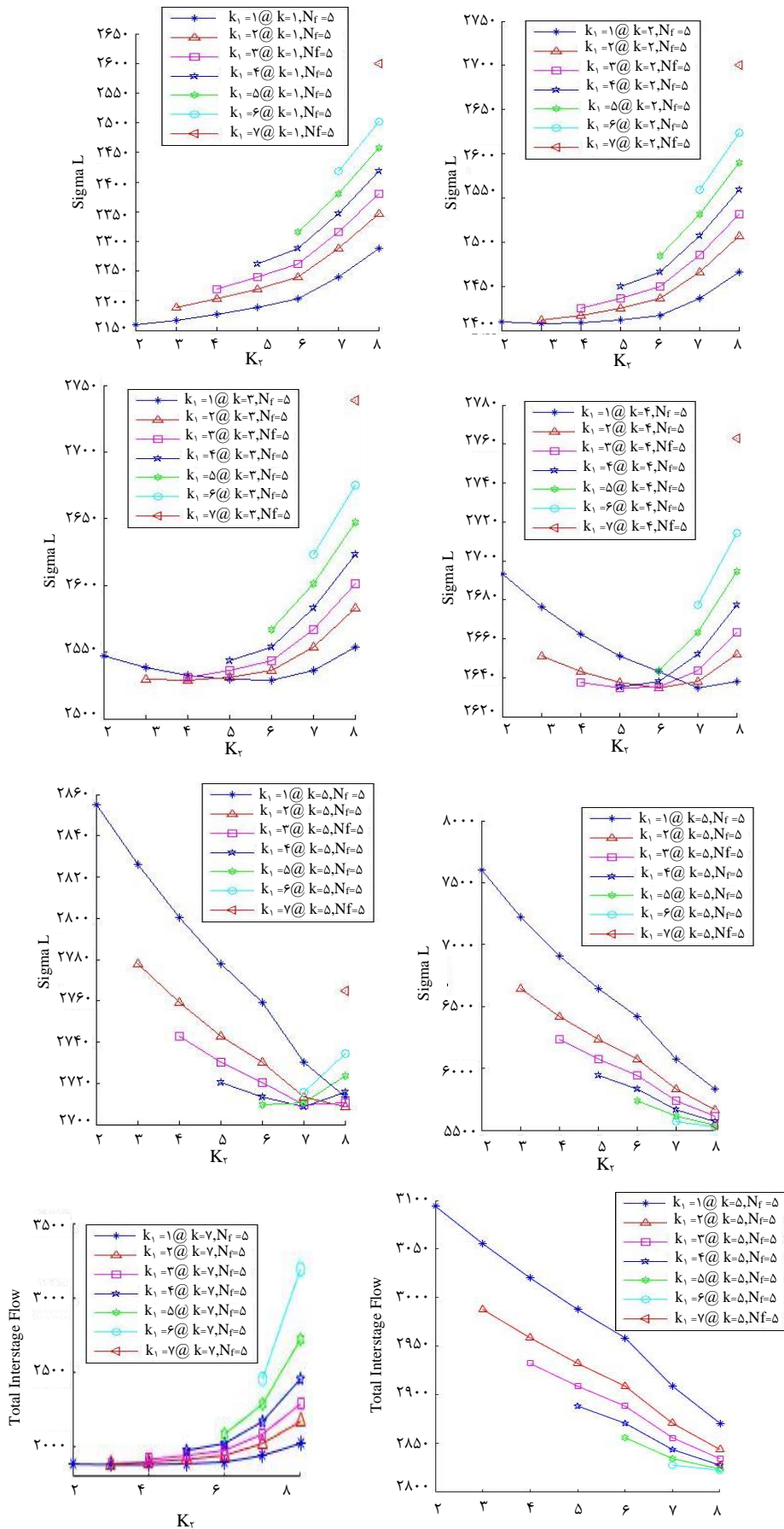
- در شرایط $k=5$ تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل به صورت نزولی - صعودی است.

- در شرایط ۶ و ۷، $k=6$ نیز در یک k معین، برای تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل روند نزولی غالب است و هر چه اجزاء k_1 و k_2 ایزوتوپ‌های دارای وزن مولکولی بیش‌تری باشند و اختلاف وزن مولکولی آن‌ها کم‌تر باشد، نرخ جریان بین مراحل کل نیز کم‌تر خواهد بود.

هم‌چنین شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب میزان غلظت ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ را در زنجیره‌های غلظت تطبیق‌یافته و شبه‌دوتایی نوع اول با تغییرات اجزاء k_1 ، k_2 و k نشان می‌دهند.

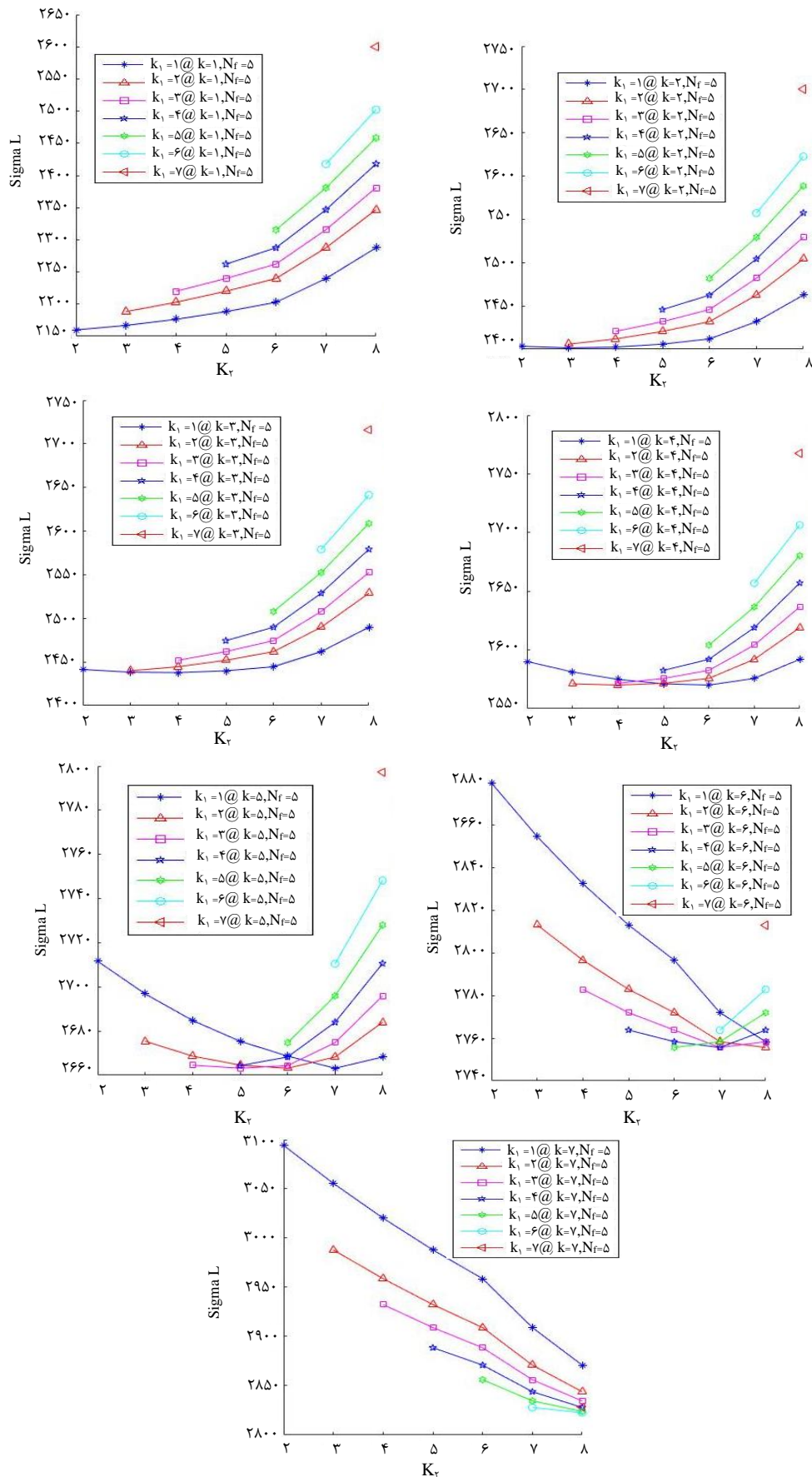
از شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که در زنجیره‌های غلظت تطبیق‌یافته و شبه‌دوتایی نوع اول، تغییرات غلظت ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ با تغییرات اجزاء k_1 ، k_2 و k روندی کاملاً نزولی دارد.



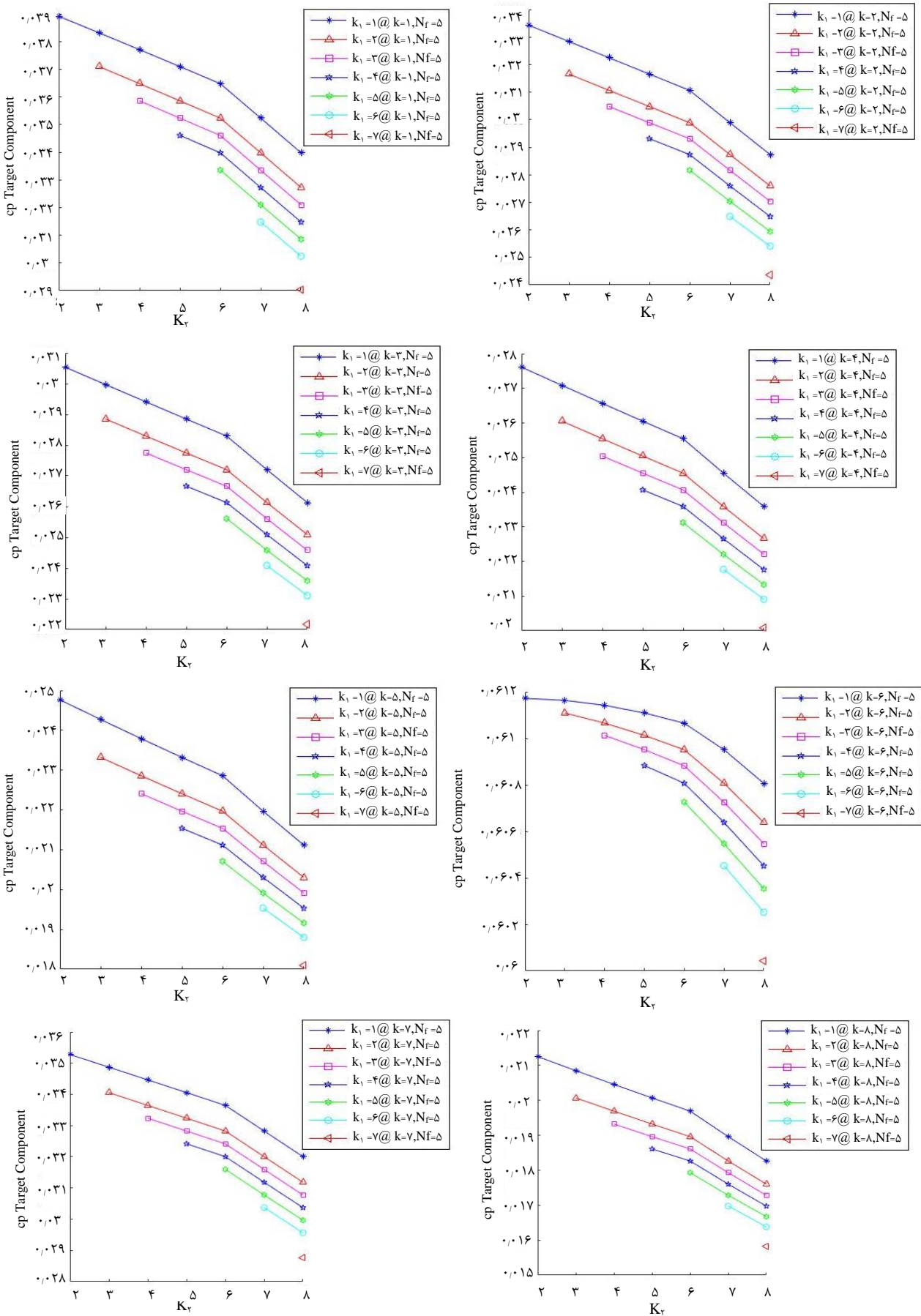


شکل ۳. نحوه تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل برحسب تغییرات k_1 و k_2 در زنجیره غلظت تطبیق یافته نمونه.

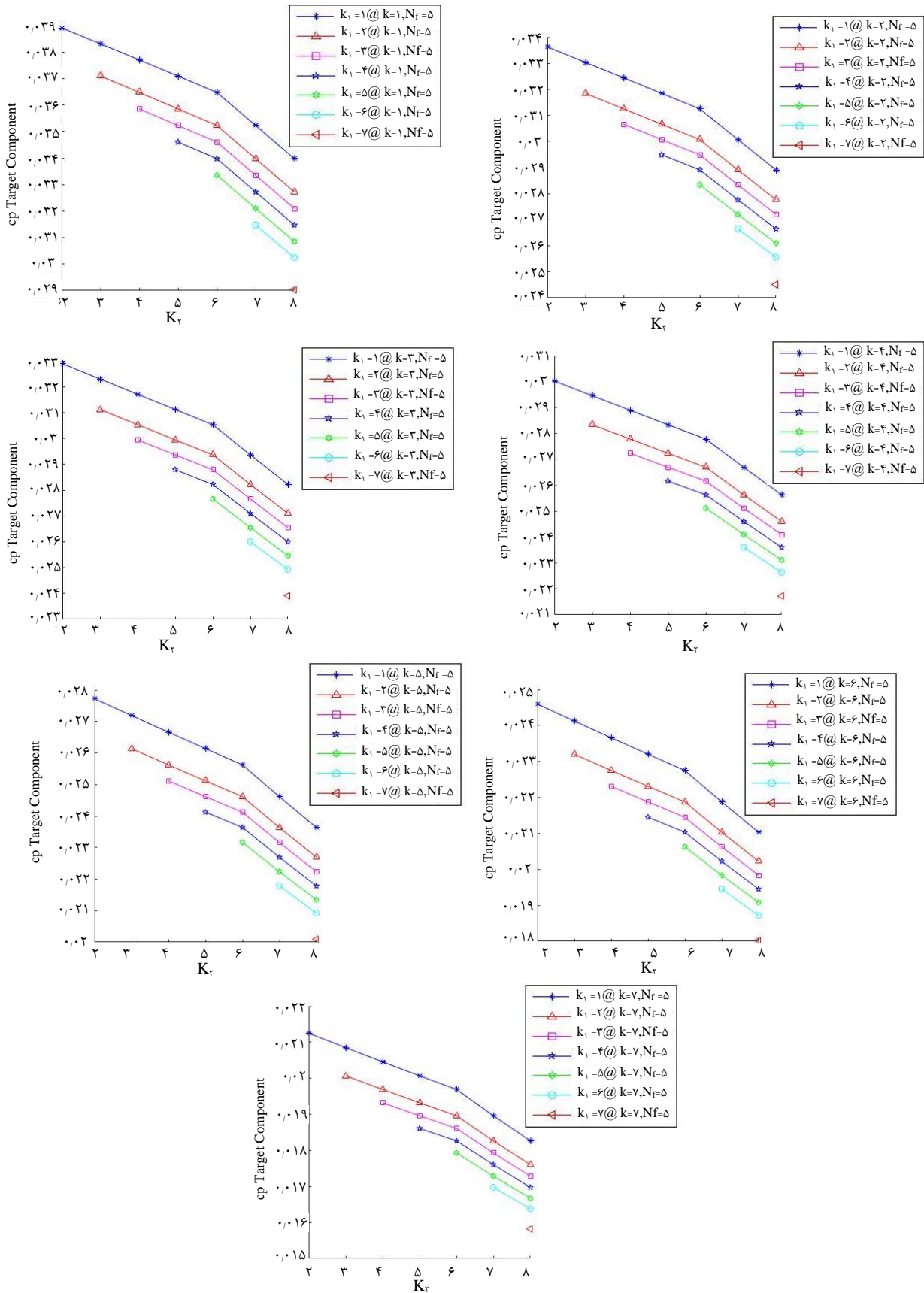




شکل ۴. نحوه تغییرات نرخ جریان بین‌مراحل کل برحسب تغییرات k_1, k و k_2 در زنجیره شبه دوتایی نوع اول نمونه.



شکل ۵. نحوه تغییرات غلظت تلوریم-۱۲۳ در محصول زنجیره برحسب تغییرات k_1 و k_2 در زنجیره غلظت تطبیق یافته نمونه.



شکل ۶. نحوه تغییرات غلظت تلوریم-۱۲۳ در محصول زنجیره برحسب تغییرات k_1 و k_2 در زنجیره شبه دوتایی نوع اول نمونه.



می‌دهد. در جدول ۲ مقادیر برش زنجیره غلظت تطبیق‌یافته، و در جدول ۳ مقادیر نرخ جریان ورودی به مراحل این زنجیره در k_1 و k_2 مشخص با مقادیر به ترتیب ۲ و ۳ و در k های مختلف ارزیابی شده‌اند. نتایج این جدول‌ها نشان می‌دهند که مقدار برش در یکی از مراحل زنجیره (در این جا مرحله ۶) در شرایط ۶ $k =$ مقداری صحیح ولی نامناسب بوده و به همین دلیل نرخ جریان ورودی به مراحل در این زنجیره بسیار بالا به دست می‌آید که منجر به تعداد ماشین‌های مورد استفاده زیاد شده که باعث افزایش توان جداسازی زنجیره و در نتیجه افزایش غناء می‌شود. از آن جا که مقدار برش در مرحله ۶ زنجیره نزدیک به صفر می‌باشد، این مقدار به لحاظ عملیاتی مناسب نبوده و به همین دلیل داده‌های مربوطه به شرایط $k = 6$ به عنوان بیشینه غلظت گزارش نشده است. لازم به ذکر است که برای مقادیر دیگر k_1 و k_2 نیز نتایج مشابهی به دست می‌آید.

علاوه بر این، از شکل‌های ۳ و ۵ می‌توان دریافت که کم‌ترین نرخ جریان بین مراحل کل برای زنجیره غلظت تطبیق‌یافته در شرایط $k = 7$ ، $k_1 = 1$ و $k_2 = 3$ به میزان $1881/133 \text{ g.s}^{-1}$ رخ می‌دهد. در این حالت غلظت تلوریم-۱۲۳ در محصول زنجیره برابر با $0/0348$ می‌باشد. در حالی که بیشینه غلظت ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ در شرایط $k = 1$ ، $k_1 = 1$ و $k_2 = 2$ به میزان $0/0389$ واقع می‌شود که در این زنجیره میزان نرخ جریان بین مراحل کل برابر با $2159/914 \text{ g.s}^{-1}$ است. برش زنجیره غلظت تطبیق‌یافته بهینه (زنجیره با کم‌ترین نرخ جریان بین مراحل کل) برابر با $0/1220$ است. در این جا لازم است به این نکته اشاره شود که با توجه به شکل‌های ۳ و ۵، مشاهده می‌شود که در شرایط ۶ $k =$ نرخ جریان بین مراحل کل نسبت به سایر نمودارها افزایش شدیدی داشته و غلظت ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ در محصول زنجیره نیز در این شرایط افزایش زیادی را نشان

جدول ۲. برش مراحل زنجیره غلظت تطبیق یافته در شرایط $k_1=2$ و $k_2=3$ در k های مختلف

برش مراحل	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=6$	$k=7$	$k=8$
۱	۰,۳۷۴۹	۰,۳۷۲۲	۰,۳۷۰۶	۰,۳۶۸۸	۰,۳۶۶۹	۰,۳۸۲	۰,۳۷۵۵	۰,۳۶۲۸
۲	۰,۴۵۲۹	۰,۵۰۳۵	۰,۵۲۹۷	۰,۵۵۶۸	۰,۵۸۵۴	۰,۶۶۶۶	۰,۳۲۵۳	۰,۶۳۰۴
۳	۰,۳۷۸۸	۰,۳۷۶۹	۰,۳۷۵۸	۰,۳۷۴۷	۰,۳۷۳۸	۰,۴۱۲۲	۰,۵۱۸۱	۰,۳۶۸۵
۴	۰,۴۵۵	۰,۵۰۶۱	۰,۵۳۳	۰,۵۶۱۴	۰,۵۹۳۱	۰,۷۷۶۳	۰,۳۳۳۶	۰,۶۳۰۹
۵	۰,۳۸۸۸	۰,۳۸۷	۰,۳۸۵۸	۰,۳۸۴۴	۰,۳۸۲۹	۰,۴۱۰۷	۰,۳۸۸۱	۰,۳۸۰۲
۶	۰,۴۱۲۲	۰,۴۰۷۸	۰,۴۰۳۸	۰,۳۹۶۸	۰,۳۸۰۴	۰,۱۱۱۳	۰,۳۵۹۲	۰,۳۹۹۱
۷	۰,۴۵۲۷	۰,۵۰۶۶	۰,۵۳۶۲	۰,۵۷	۰,۶۱۴۶	۰,۴۰۵۷	۰,۵۴۴۴	۰,۶۳۱۶
۸	۰,۴۱۸۵	۰,۴۱۲۹	۰,۴۰۸۹	۰,۴۰۳۲	۰,۳۹۱۹	۰,۴۰۹	۰,۴۰۱۲	۰,۳۹۹۹
۹	۰,۴۵۹۷	۰,۵۱۴۵	۰,۵۴۴۷	۰,۵۷۸۹	۰,۶۲۳۱	۰,۴۹۰۶	۰,۵۶۴۶	۰,۶۳۹۶
۱۰	۰,۴۲۳۷	۰,۴۱۸	۰,۴۱۴۹	۰,۴۱۱۴	۰,۴۰۷۶	۰,۴۵۴۸	۰,۴۱۹۵	۰,۴۰۲۸

جدول ۳. نرخ جریان ورودی به مراحل زنجیره غلظت تطبیق یافته در شرایط $k_1=2$ و $k_2=3$ در k های مختلف

نرخ جریان ورودی به مرحله	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=6$	$k=7$	$k=8$
۱	۱۳۹,۶۵۱۳	۱۳۰,۴۷۰۵	۱۲۴,۷۵۵۰	۱۱۸,۱۰۵۸	۱۱۰,۳۸۲۴	۱۵۹,۸	۱۳۹,۶۲۶۰	۹۸,۶۳۵۱
۲	۲۵۵,۲۷۷۶	۲۶۲,۷۹۳۰	۲۶۵,۲۶۳۵	۲۶۶,۴۵۵۸	۲۶۶,۲۵۹۵	۴۷۹,۴	۲۰۶,۹۳۴۷	۲۶۶,۱۲۸۴
۳	۳۲۶,۶۵۱۰	۳۴۳,۸۲۰۹	۳۵۰,۹۰۹۶	۳۵۶,۴۷۷۳	۳۶۰,۵۵۵۴	۷۱۱,۷	۳۲۰,۶۲۰۷	۳۶۴,۷۴۵۴
۴	۳۸۷,۲۰۸۳	۴۲۸,۲۱۶۵	۴۵۰,۵۱۴۸	۴۷۴,۵۶۱۵	۵۰۲,۹۷۴۲	۱۷۵,۲۹	۳۸۰,۱۱۴۰	۵۳۳,۷۵۲۲
۵	۴۳۱,۰۴۶۲	۴۸۷,۱۲۴۲	۵۱۸,۷۶۲۸	۵۵۳,۹۰۸۶	۵۹۶,۶۴۲۷	۲۴۷۶,۴	۳۴۹,۷۳۷۱	۶۴۴,۳۱۸۸
۶	۲۶۳,۴۸۰۳	۲۸۷,۷۳۱۰	۲۹۹,۶۳۶۴	۳۱۰,۷۸۴۸	۳۲۰,۱۴۰۸	۱۰۲۷,۴	۱۹۱,۸۵۵۶	۳۴۵,۴۰۰۴
۷	۱۷۵,۲۳۷۹	۲۰۱,۱۱۳۱	۲۱۴,۵۷۲۸	۲۲۷,۵۸۴۸	۲۳۷,۸۷۱۰	۱۷,۵	۱۲۳,۱۶۹۳	۲۷۲,۵۸۵۵
۸	۱۱۴,۵۷۴۰	۱۴۲,۷۰۳۳	۱۵۸,۳۳۰۲	۱۷۴,۷۱۶۳	۱۹۰,۸۷۲۶	۹,۹	۹۰,۵۹۶۲	۲۲۴,۵۲۰۵
۹	۶۵,۲۳۹۱	۸۴,۰۹۶۷	۹۵,۰۳۵۳	۱۰۶,۸۵۳۲	۱۱۸,۵۵۴۵	۵,۵	۵۴,۰۶۷۷	۱۴۵,۲۷۸۰
۱۰	۲۹,۹۹۳۶	۴۳,۲۶۸۸	۵۱,۷۶۵۶	۶۱,۸۶۲۱	۷۳,۸۷۲۰	۲,۷	۳۰,۵۲۸۴	۹۲,۹۱۴۷
نرخ جریان بین مراحل کل	۲۱۸۸,۴	۲۴۱۱,۳	۲۵۲۹,۵	۲۶۵۱,۳	۲۷۷۸,۱	۶۶۴۳,۳	۱۸۸۷,۲	۲۹۸۸



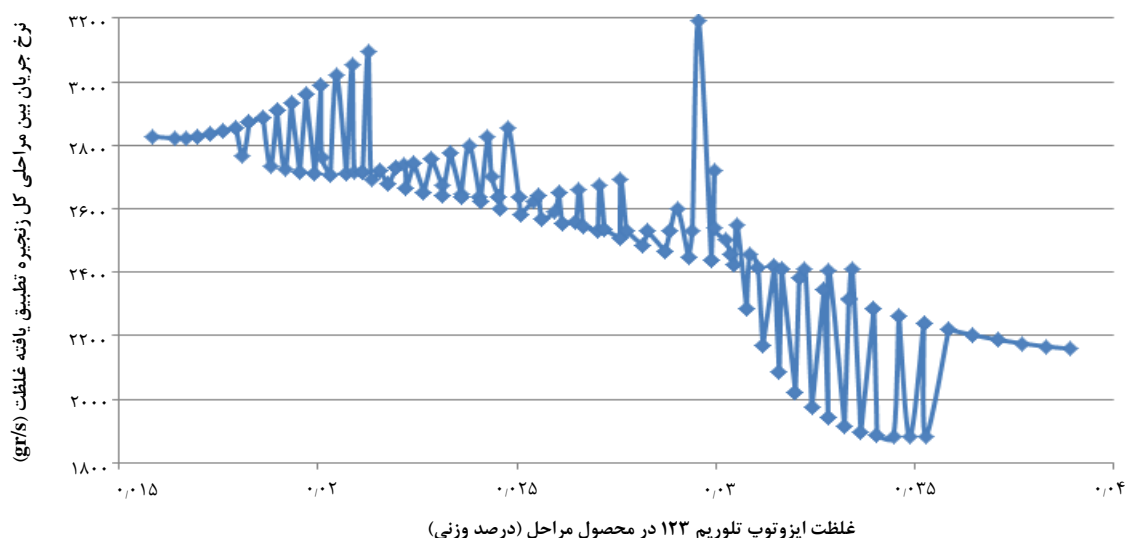
هم‌چنین از شکل‌های ۴ و ۶ نیز چنین دریافت می‌شود که برای زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول، حداقل نرخ جریان بین مراحل کل و بیشینه غلظت ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ به طور هم‌زمان در شرایط $k_1=1$ ، $k_2=2$ و $k_3=1$ به ترتیب به میزان $2159/914$ و $0/0389$ قرار می‌گیرد. برش این زنجیره برابر با $0/1124$ می‌باشد.

از رسم مقادیر نرخ جریان بین مراحل کل زنجیره غلظت تطبیق‌یافته موجود در شکل ۳، برحسب مقادیر غلظت تلوریم-۱۲۳ در محصول زنجیره موجود در شکل ۵، شکل ۷ حاصل می‌گردد. هم‌چنین با رسم مقادیر نرخ جریان بین مراحل کل زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول موجود در شکل ۴، برحسب مقادیر غلظت تلوریم-۱۲۳ در محصول زنجیره موجود در شکل ۶، می‌توان به شکل ۸ دست یافت. همان‌طور که از شکل‌های ۷ و ۸ قابل دریافت است، روند نمودارها تقریباً به گونه‌ای است که هر چه تغییرات غلظت به سمت افزایش پیش می‌رود، روند تغییرات نرخ جریان بین مراحل رو به کاهش می‌گذارد. لازم به ذکر است از گزارش نتایج زنجیره غلظت تطبیق‌یافته در شرایط k برابر با ۶ که حاوی نتایج مناسبی نبوده و نرخ جریان بین مراحل آن به شدت افزایش یافته، صرف‌نظر شده است.

در این پژوهش، به زنجیره غلظت تطبیق‌یافته که دارای شرایط برابر (k_1, k_2, k_3) و k_4 برابر با زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول با کم‌ترین نرخ جریان بین مراحل کل (زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول بهینه) باشد، زنجیره متناظر اطلاق می‌شود. با این تعریف و با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که

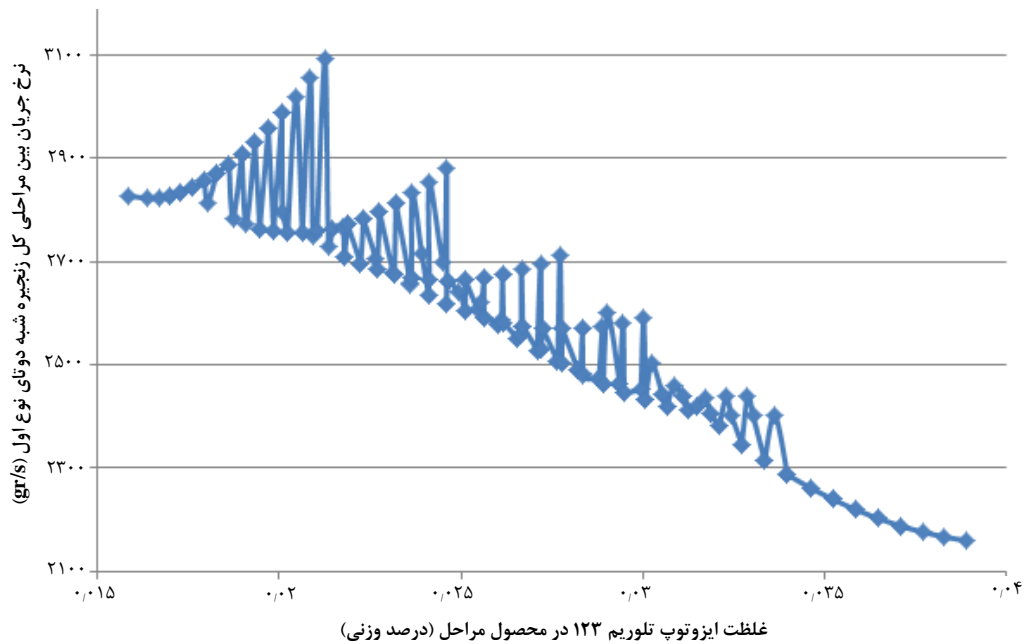
در جدول ۴ غلظت ایزوتوپ‌ها در جریان‌های سبک (محصول) و سنگین (پسماند) زنجیره‌های شبه‌دوتایی نوع اول بهینه، زنجیره متناظر و زنجیره غلظت تطبیق‌یافته بهینه گزارش شده است. با توجه به این جدول، مشاهده می‌شود که دو زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول بهینه و زنجیره متناظر، عملکرد یکسانی در جداسازی ایزوتوپ‌ها از خود نشان داده‌اند زیرا عملاً در شرایط k برابر با ۱، این دو زنجیره یکسان خواهند بود. هم‌چنین مشاهده می‌شود زنجیره غلظت تطبیق‌یافته بهینه، توانایی غنی‌سازی و تهی‌سازی ضعیف‌تری نسبت به زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول بهینه دارد.

در جدول ۵ مقادیر مربوط به برش و نرخ جریان ورودی به مراحل و هم‌چنین غلظت ایزوتوپ‌ها در جریان بالاسری مراحل برای زنجیره غلظت تطبیق‌یافته بهینه گزارش شده است. جدول ۶ نیز مقادیر مربوط به برش و نرخ جریان ورودی به مراحل و هم‌چنین غلظت ایزوتوپ‌ها در جریان بالاسری مراحل برای زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول بهینه و زنجیره متناظر را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نرخ جریان بین مراحل کل زنجیره غلظت تطبیق‌یافته برحسب غلظت تلوریم ۱۲۳ در محصول زنجیره برای تمامی مقادیر k_1 و k_2 .





شکل ۸. نرخ جریان بین مراحل کل زنجیره شبه دوتایی نوع اول برحسب غلظت تلوریم ۱۲۳ در محصول زنجیره برای تمامی مقادیر k_1 و k_2 .

جدول ۴. غلظت ایزوتوپ‌های موجود در مخلوط در جریان‌های سبک (محصول) و سنگین (پسماند) سه زنجیره

غلظت در جریان سنگین زنجیره (پسماند زنجیره) (درصد وزنی)			غلظت در جریان سبک زنجیره (محصول زنجیره) (درصد وزنی)			ایزوتوپ تلوریم
زنجیره غلظت تطبیق یافته بهینه	زنجیره متناظر	زنجیره شبه دوتایی نوع اول بهینه	زنجیره غلظت تطبیق یافته بهینه	زنجیره متناظر	زنجیره شبه دوتایی نوع اول بهینه	
۰٫۰۰۰۲	۰٫۰۰۰۲	۰٫۰۰۰۲	۰٫۰۰۵۸	۰٫۰۰۶۵	۰٫۰۰۶۵	۱۲۰
۰٫۰۱۱۰	۰٫۰۱۰۲	۰٫۰۱۰۲	۰٫۱۲۲۲	۰٫۱۳۸۱	۰٫۱۳۸۱	۱۲۲
۰٫۰۰۵۰	۰٫۰۰۴۹	۰٫۰۰۴۹	۰٫۰۳۴۹	۰٫۰۳۸۹	۰٫۰۳۸۹	۱۲۳
۰٫۰۳۳۰	۰٫۰۳۲۶	۰٫۰۳۲۶	۰٫۱۴۰۵	۰٫۱۵۲۵	۰٫۱۵۲۵	۱۲۴
۰٫۰۵۸۴	۰٫۰۵۸۶	۰٫۰۵۸۶	۰٫۱۵۲۶	۰٫۱۵۹۰	۰٫۱۵۹۰	۱۲۵
۰٫۱۷۴۶	۰٫۱۷۶۱	۰٫۱۷۶۱	۰٫۲۷۷۳	۰٫۲۷۴۶	۰٫۲۷۴۶	۱۲۶
۰٫۳۳۵۵	۰٫۳۳۶۷	۰٫۳۳۶۷	۰٫۱۹۱۳	۰٫۱۶۹۶	۰٫۱۶۹۶	۱۲۸
۰٫۳۸۲۱	۰٫۳۸۰۷	۰٫۳۸۰۷	۰٫۰۷۵۵	۰٫۰۶۰۷	۰٫۰۶۰۷	۱۳۰

جدول ۵. برش و نرخ جریان ورودی به مراحل زنجیره غلظت تطبیق یافته بهینه

مرحله	غلظت ایزوتوپ‌ها در محصول مراحل (درصد وزنی)									
	۱۲۰	۱۲۲	۱۲۳	۱۲۴	۱۲۵	۱۲۶	۱۲۸	۱۳۰	برش و نرخ جریان ورودی	
۱	۰٫۰۰۰۴۳۴	۰٫۰۱۹۲۳۴	۰٫۰۰۸۰۲	۰٫۰۴۷۴۹۹	۰٫۰۷۶۴۶۱	۰٫۲۰۷۸۳۳	۰٫۳۲۹۹۳۲	۰٫۳۱۰۵۸۸	۰٫۳۵۳۷	۱۳۵٫۸۵۲۰
۲	۰٫۰۰۰۵۹۶	۰٫۰۲۳۹۴۶	۰٫۰۰۹۵۴۱	۰٫۰۵۴۱۲۶	۰٫۰۸۳۶۳۹	۰٫۲۱۸۷۱۷	۰٫۳۲۳۴۴۴	۰٫۲۸۵۹۹۱	۰٫۳۵۶۴	۲۱۱٫۰۶۸۴
۳	۰٫۰۰۰۷۹۳	۰٫۰۲۸۸۵۹	۰٫۰۱۱۰۰۶	۰٫۰۵۹۹۸۳	۰٫۰۸۹۳۷۴	۰٫۲۲۶۱۵۱	۰٫۳۱۶۲۵۲	۰٫۲۶۷۵۸۱	۰٫۴۷۴۳	۳۱۰٫۷۶۸
۴	۰٫۰۰۱۱۵۸	۰٫۰۳۷۰۴۱	۰٫۰۱۳۳۲۶	۰٫۰۶۸۸۰۶	۰٫۰۹۷۵۴۱	۰٫۲۳۵۸۱۶	۰٫۳۰۴۶۶۸	۰٫۲۴۱۶۴۴	۰٫۳۸۳۰	۳۸۰٫۶۶۲۲
۵	۰٫۰۰۱۵۹۶	۰٫۰۴۴۹۴۲	۰٫۰۱۵۳۱۴	۰٫۰۷۵۳۸۳	۰٫۱۰۲۵۷۲	۰٫۲۳۹۵۸۱	۰٫۲۹۴۲۱۹	۰٫۲۲۶۳۹۴	۰٫۳۶۶۵	۳۶۸٫۷۴۴۹
۶	۰٫۰۰۲۲۷۴	۰٫۰۵۹۴۸۲	۰٫۰۱۹۳۹۹	۰٫۰۹۰۸۹۷	۰٫۱۱۷۰۲۴	۰٫۲۵۷۰۳۵	۰٫۲۷۴۲۱۱	۰٫۱۷۹۶۷۸	۰٫۳۳۷۹	۱۸۵٫۶۹۳۳
۷	۰٫۰۰۲۶۸	۰٫۰۶۹۲	۰٫۰۲۲۲۲۱	۰٫۱۰۱۷۹۲	۰٫۱۲۷۱۳۶	۰٫۲۶۸۷۲۲	۰٫۲۵۹۱۴۷	۰٫۱۴۹۱۰۱	۰٫۵۷۰۵	۱۱۷٫۶۹۰۹
۸	۰٫۰۰۳۶۳۸	۰٫۰۸۷۰۲	۰٫۰۲۶۷۳۸	۰٫۱۱۶۷۱۲	۰٫۱۳۸۲۹۹	۰٫۲۷۶۱۲	۰٫۲۳۴۵۲۵	۰٫۱۱۶۹۴۷	۰٫۳۷۹۶	۸۸٫۵۵۳۸
۹	۰٫۰۰۴۳۱۴	۰٫۰۹۹۵۲	۰٫۰۲۹۸۵۶	۰٫۱۲۶۶۹۸	۰٫۱۴۵۳۱	۰٫۲۷۹۵۱۷	۰٫۲۱۷۳۴۴	۰٫۰۹۷۴۴	۰٫۵۸۹۰	۵۲٫۱۰۲۶
۱۰	۰٫۰۰۵۸۱۳	۰٫۱۲۲۱۹۶	۰٫۰۳۴۸۷۳	۰٫۱۴۰۴۶۵	۰٫۱۵۲۵۶۷	۰٫۲۷۷۳۱۹	۰٫۱۹۱۳۰۵	۰٫۰۷۵۴۶۴	۰٫۳۹۷۵	۳۰٫۶۸۸۶



جدول ۶. برش و نرخ جریان ورودی به مراحل زنجیره شبه دوتایی نوع اول بهینه و زنجیره متناظر

مرحله	۱۳۰	۱۲۸	۱۲۶	۱۲۵	۱۲۴	۱۲۳	۱۲۲	۱۲۰	غلظت ایزوتوپها در محصول مراحل (درصد وزنی)	
									برش	نرخ جریان ورودی
۱	۰,۰۰۰۳۶۷	۰,۰۱۷۸۲۷	۰,۰۰۷۷۲۲	۰,۰۴۶۹۸۴	۰,۰۷۶۷۵۱	۰,۲۰۹۶۲۸	۰,۳۳۱۲۰۵	۰,۳۰۹۵۱۵	۰,۳۴۲۸	۱۳۵,۰۵۹۴
۲	۰,۰۰۰۰۵	۰,۰۲۲۰۶۹	۰,۰۰۹۱۴۶	۰,۰۵۳۳۵۸	۰,۰۸۳۷۶۵	۰,۲۲۰۳۴۳	۰,۳۲۴۹۸۸	۰,۲۸۵۸۳	۰,۴۸۸۵	۲۶۴,۰۵۵۷
۳	۰,۰۰۰۰۷۵	۰,۰۲۹۱۰۴	۰,۰۱۱۳۶۲	۰,۰۶۲۶۴	۰,۰۹۳۲۲۵	۰,۲۳۳۲۳۳	۰,۳۱۴۱۷۴	۰,۲۵۵۵۱۲	۰,۳۴۷۱	۳۳۳,۵۱۶۰
۴	۰,۰۰۰۱۰۱۱	۰,۰۳۴۹۲۴	۰,۰۱۲۹۷۴	۰,۰۶۸۴۷۲	۰,۰۹۸۱۲۲	۰,۲۳۷۷۵۱	۰,۳۰۵۳۶۳	۰,۲۴۱۳۸۳	۰,۴۸۹۶	۴۰۰,۷۲۴۰
۵	۰,۰۰۰۱۴۹	۰,۰۴۴۶۸۱	۰,۰۱۵۵۸۹	۰,۰۷۷۷۰۶	۰,۱۰۵۷۸۹	۰,۲۴۴۹۲۱	۰,۲۹۱۸۴۹	۰,۲۱۷۹۷۵	۰,۳۵۶۵	۴۴۲,۸۵۳۷
۶	۰,۰۰۰۲۱۱۶	۰,۰۵۹۵۲۴	۰,۰۱۹۹۰۴	۰,۰۹۴۳۵۶	۰,۱۲۱۲۲۶	۰,۲۶۲۹۱	۰,۲۶۹۷۲۹	۰,۱۷۰۲۳۵	۰,۳۸۲۱	۲۳۷,۳۳۸۹
۷	۰,۰۰۰۲۷۷۵	۰,۰۷۴۵۴۱	۰,۰۲۴۰۹۷	۰,۱۰۹۵۹۹	۰,۱۳۴۰۶۱	۰,۲۷۴۷۶۲	۰,۲۴۶۷۴۹	۰,۱۳۳۴۱۵	۰,۴۸۷۱	۱۵۴,۸۹۹۶
۸	۰,۰۰۰۳۸۲	۰,۰۹۴۶۴۱	۰,۰۲۹۱۷۳	۰,۱۲۵۹۰۱	۰,۱۴۵۴۱۵	۰,۲۸۰۰۸۵	۰,۲۱۹۲۲۵	۰,۱۰۱۷۴	۰,۳۸۶۸	۱۰۴,۷۱۹۶
۹	۰,۰۰۰۴۸۸۵	۰,۱۱۳۴۱	۰,۰۳۳۶۳۴	۰,۱۳۹۰۶۷	۰,۱۵۳۲۳۲	۰,۲۸۰۳۸۱	۰,۱۹۵۶۵۳	۰,۰۷۹۷۳۸	۰,۴۹۵۴	۵۸,۰۰۸۱
۱۰	۰,۰۰۰۶۵۴۲	۰,۱۳۸۰۷۳	۰,۰۳۸۹۱۱	۰,۱۵۲۵۳۱	۰,۱۵۸۹۹	۰,۲۷۴۶	۰,۱۶۹۶۴۱	۰,۰۶۰۷۱۱	۰,۳۹۱۱	۲۸,۷۳۹۶

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پس از توسعه کد EMN-CAS، عملکرد زنجیره‌های غلظت تطبیق‌یافته و شبه‌دوتایی نوع اول، بررسی و مقایسه آن‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که تغییرات غلظت ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ با تغییر اجزاء k_1 ، k_2 و k_3 در دو زنجیره، مشابه و به صورت نزولی می‌باشد. هم‌چنین تغییرات نرخ جریان بین مراحل کل این دو زنجیره با تغییر اجزاء k_1 ، k_2 و k_3 کاملاً با یکدیگر مشابه نبوده و در شرایط k های مختلف، می‌توانند دارای روندهای متفاوتی باشند. هم‌چنین نتایج نشان داد که زنجیره غلظت تطبیق‌یافته بهینه، توانایی غنی‌سازی و تهی‌سازی ضعیف‌تری نسبت به زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول بهینه دارد هرچند که نرخ جریان‌های بین مراحل کل آن، مقدار کم‌تری است. هم‌چنین مشاهده شد که عملکرد زنجیره شبه‌دوتایی نوع اول بهینه با زنجیره متناظر، از نظر نرخ جریان بین مراحل کل و هم‌چنین میزان غنی‌سازی و تهی‌سازی ایزوتوپ‌های مخلوط، مشابه هستند. علاوه بر این، با توجه به میزان جداسازی ایزوتوپ‌های میانی از جمله تلوریم-۱۲۳ در زنجیره‌های غلظت تطبیق‌یافته و شبه‌دوتایی نوع اول ۱۰ مرحله‌ای با مقدار فاکتور جداسازی واحد برابر با ۱/۱ طی یک بار عملیات، زنجیره غنای ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ از ۰,۰۰۸۷ به مقدار بیشینه ۰,۰۳۸۹ خواهد رسید.

با توجه به تغییرات غلظت ایزوتوپ‌ها در طول زنجیره، مشاهده می‌شود که برخی از ایزوتوپ‌ها در یکی از مراحل میانی دارای بیشینه غلظت هستند. بنابراین با توجه به موارد مطرح شده و تعداد مراحل و مرحله ورود خوراک و جزء هدف موردنظر، برای هر مورد جدیدی که مورد بررسی قرار می‌گیرد، لازم است تمامی محاسبات با همین روند، مجدداً انجام پذیرفته و سپس نسبت به انتخاب زنجیره مناسب اقدام نمود. به‌طور خلاصه می‌توان گفت با توجه به ثابت بودن فاکتور جداسازی واحد، تغییر شدت جریان خوراک زنجیره تأثیری بر نتایج ارایه شده ندارد. هم‌چنین در مورد تعداد مراحل زنجیره، با توجه به این‌که ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳ ایزوتوپ میانی است و غلظت آن در مراحل میانی زنجیره به اندازه کافی بلند، دارای بیشینه خواهد بود، با افزایش تعداد مراحل زنجیره، ابتدا غلظت خروجی بیش‌تری مشاهده شده و در ادامه با افزایش تعداد مراحل، کاهش غلظت مشاهده خواهد شد. هم‌چنین با افزایش شماره مرحله ورود خوراک، از تعداد مراحل غنی‌سازی کاسته شده و در نتیجه غلظت محصول این ایزوتوپ کاهش خواهد یافت و برعکس، کاهش شماره مرحله ورود خوراک و در نتیجه افزایش تعداد مراحل غنی‌سازی، افزایش غلظت این ایزوتوپ را در پی خواهد داشت.



مراجع

1. A.G. Kudziev, *Production and Application of Stable Enriched Isotopes in the USSR*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* **282**, 267-270 (1989).
2. D.E. Armstrong, et al. *A Carbon-13 Production Plant Using Carbon Monoxide Distillation*, *Los Alamos Scientific Laboratory Report*, (1968).
3. E.I. Abbakumov, *Development and Industrial Use of Gas Centrifuge for Uranium Enrichment in the Soviet Union*, *Atomic Energy*, **67**(4), 255-257 (1989).
4. S. Zeng, et al. *A Numerical Method of Cascade Analysis and Design for Multi-Component Isotope Separation*, *Chem. Eng. Res. Des.*, **92**, 2649-2658 (2014).
5. A. De La Garza, G.A. Garret, J.E. Murphy, *Multicomponent Isotope Separation in Cascade*, *Chem. Eng. Sci.* **15**, 188-209 (1961).
6. J.E. Murphy, *Optimum Flow Distribution for Multicomponent Isotope Separation in a Single Cascade*, *Rep. K-1508. Union Carbide Corp., Oak Ridge, TN, USA* (1962).
7. A. Apelblat, Y. Ilamed-Lehrer, *The Theory of A Real Isotope Enriching Cascade – I*, *J. Nucl. Energy*, **22**, 1-14 (1968).
8. A.A. Sazykin, *Thermodynamic approach to isotope separation*. In: Baranov, V.Yu(ED), *Isotopes-Properties, Production, and Application*, **34**(27), 72 (2000).
9. G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich, *Cascades for Separation of Multicomponent Isotope Mixtures*, *Sep. Sci. Tech.*, **36**(8&9) 1769-1817 (2001).
10. A. De La Garza, *A Generalization of the Matched Abundance Ratio Cascade for Multicomponent Isotope Separation*, *Union Carbide Nuclear Company* (1962).
11. G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich, Q. Xie, *Quasi-Ideal Cascades with an Additional Flow for Separation of Multicomponent Isotope Mixtures*, *Theor. Found. Chem. Eng.*, **40**(1), 5-13 (2006).
12. I. Yamamoto, A. Kaba, A. Kanagawa, *Simple Formulae for Analyzing Matched Abundance Ratio Cascade with Constant Separation Factors for Multi-Component Isotope Separation*, *J. Nucl. Sci. Tech.*, **24**(11), 969-971 (1987).
13. L. Cheng, S. Zeng, *Comparison Study on Different Cascades for Multi-component Isotope Separation*, *At. Energ. Sci. Tech.*, **49**(12), 2113-2117 (2015).
14. Y. Zhang, S. Zeng, *Comparison of Three Model Cascades*, *At. Energ. Sci. Tech.*, **48**(11), 1921-1927 (2014).
15. T. Song et al. *Comparative Study of the Model and Optimum Cascades for Multicomponent Isotope Separation*, *Sep. Sci. Tech.*, **45**, 2113-2118 (2010).
16. V.A. Palkin, *Multicomponent Separation Efficiency of an Optimal Cascade with Prescribed Target Isotope Concentration*, *At. Energ.*, **117**(3), 184-190 (2015).
17. C. Ying, Z. Guo, H.G. Wood, *Solution of the Diffusion Equation in a Gas Centrifuge for Separation of Multicomponent Mixtures*, *Sep. Sci. Tech.*, **31**(18), 2455-2471 (1996).
18. S. Zeng, G. Ying, *A robust and efficient calculation Procedure for Determining Concentration Distribution of Multicomponent Mixtures*, *Sep. Sci. Tech.*, **35**(4), 613-622 (2000).
19. I.A. Suvorov, A.N. Tcheltsov, *Enrichment of tellurium isotopes for pure I-123 production using gas ultra-centrifuges*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **334**, 33-36 (1993).

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

فرزانه اعزازی، محمدحسن ملاح، جواد کریمی ثابت، علی نوروزی (۱۳۹۹)، مقایسه عملکرد زنجیره‌های غلظت تطبیق‌یافته و شبه‌دوتایی نوع اول در غنی‌سازی ایزوتوپ تلوریم-۱۲۳، ۹۲، ۷۳-۹۰

DOI: 10.24200/nst.2020.1119

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1119.html

