



مقایسه عملکرد زنجیره متداول نسبت فراوانی تطبیق یافته و زنجیره شبکه ای نسبت فراوانی تطبیق یافته در جداسازی ایزوتوپ های پایدار تلوریم

فرزانه اعزازی^(۱)، سید جابر صفدری^(۱)، محمد حسن ملاح*^(۱)، جواد کریمی ثابت^(۱)، علی نوروزی^(۲)، عادل محمودیان^(۲)

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشگاه مواد و سوخت هسته‌ای
سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت فناوری های پیشرفته

چکیده

در این مقاله به بررسی زنجیره شبکه ای با جریان برگشتی پرداخته می شود. نشان داده می شود که عملکرد زنجیره شبکه ای با جریان برگشتی نسبت فراوانی تطبیق یافته، معادل زنجیره جریان برگشتی متداول نسبت فراوانی تطبیق یافته ای است که تعداد مراحل آن برابر با مجموع تعداد مراحل موجود در دو لایه آخر زنجیره شبکه ای باشد و نتایج آن برای اولین بار جهت جداسازی ایزوتوپ های پایدار تلوریم گزارش می شود. به منظور بررسی عملکرد جداسازی این زنجیره، کد RNETCAS به طور موفقیت آمیزی توسعه داده شده است.

کلمات کلیدی: جریان برگشتی، زنجیره شبکه ای، زنجیره نسبت فراوانی تطبیق یافته، لایه، تلوریم

Performance Comparison of Conventional Matched Abundance Ratio Cascade and Matched Abundance Ratio Net Cascade for separation of Tellurium Stable Isotopes

Farzaneh Ezazi¹, S. J. Safdari¹, Mohammad Hasan Mallaah*¹, Javad Karimi Sabet¹, Ali Norouzi²,
Adel Mahmoudian²

1. Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research
Institute, Atomic Energy Organization

2. Advanced Technologies Company, Atomic Energy Organization

Abstract



In this paper, the analysis of the net cascade with recirculation has been performed. It is shown that the function of matched-abundance ratio net cascade is similar to that of its equivalent conventional matched-abundance ratio cascade whose number of stages is equal to the sum of the number of stages in the last bilayers of the cascade and attained results are reported for the first time for separation of Tellurium stable isotopes. For this reason, the code RNETCAS is developed successfully.

Keywords: Recycled Flow, Net Cascade, Matched Abundance Ratio Cascade, Layer, Tellurium

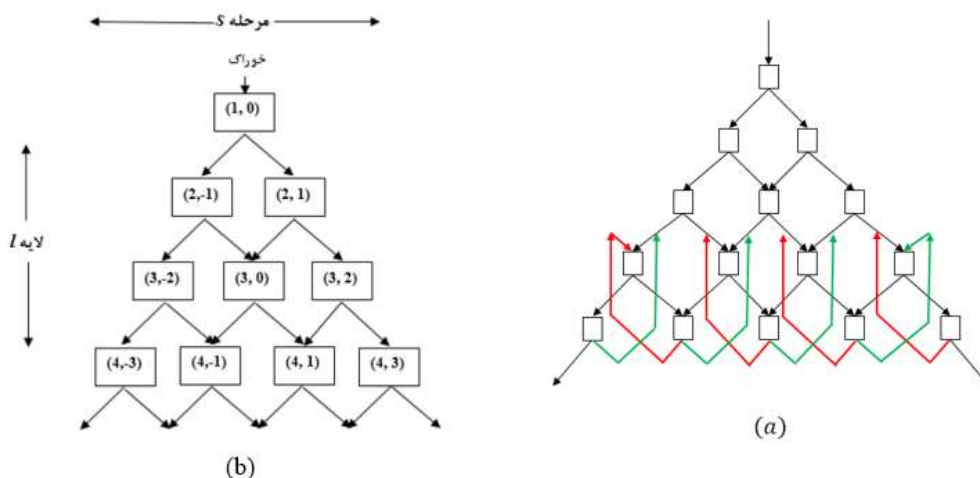
۱- مقدمه

استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار که ناشی از تقاضای تحقیقات بنیادی فیزیک، روش‌های تشخیص و درمان پزشکی و توسعه مواد جدید است، روز به روز در حال افزایش می‌باشد و همین امر، نیاز به توسعه روش‌هایی برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار را دوچندان نموده است. در این راستا، زنجیره‌های غنی‌سازی ماشین‌های سانتریفیوژ برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار سنگین و نیمه‌سنگین در دنیا شناخته شده‌اند [۱، ۲، ۳]. برای دستیابی به بهترین عملکرد در جداسازی ایزوتوپی، مطلوب است که در نقاط تلاقی جریان‌ها، شرط عدم اختلاط برقرار باشد. این مسئله منجر به مفهوم زنجیره ایده‌آل می‌شود که تنها در مورد جداسازی مخلوط‌های دوجزئی ممکن است. در مورد زنجیره‌های معمول جریان برگشتی برای جداسازی مخلوط‌های چندجزئی، رسیدن به حالت عدم اختلاط برای تمامی اجزاء ممکن نیست [۴، ۵، ۶، ۷]. به منظور دستیابی به شرط عدم اختلاط در نقاط تلاقی جریان‌ها، برای کلیه ایزوتوپ‌ها، در جداسازی مخلوط‌های چند جزئی، زنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ زنجیره شبکه‌ای ایده‌آل را پیشنهاد نمودند [۸]. یکی از موارد مطرح در رابطه با این زنجیره‌ها، کاهش نرخ جریان ورودی به مراحل در لایه‌های آخر زنجیره و همچنین مراحل منتهی به دو انتهای زنجیره در لایه‌های مختلف می‌باشد. یکی از راهکارها برای رفع این مورد، برگشت دادن جریان برخی از مراحل لایه‌های پایینی به ورودی لایه‌های بالاتر می‌باشد. بدین صورت می‌توان تلفیقی از زنجیره‌های جریان برگشتی و زنجیره شبکه‌ای ایده‌آل را به صورت توأمان در نظر گرفت. زنگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ زنجیره شبکه‌ای با جریان برگشتی از لایه آخر را که شرایط زنجیره نسبت فراوانی تطبیق یافته بر آن حاکم باشد، معرفی و بررسی نمودند [۹]. در این تحقیق، عملکرد این زنجیره، با زنجیره جریان برگشتی متداول نسبت فراوانی تطبیق یافته معادل آن، جهت جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم مقایسه و تحلیل می‌گردد.

۲- تئوری

۲-۱- معرفی زنجیره شبکه‌ای و پیکر بندی های مختلف آن

در ابتدا شمای کلی یک زنجیره شبکه ای بیان می گردد. زنجیره شبکه‌ای، یک زنجیره دو بعدی است که در شکل (۱) نشان داده شده است. دو اندیس l و s به صورت زوج مرتب (l, s) ، برای نامگذاری مکان مراحل مورد استفاده قرار می گیرد. اندیس l معرف لایه در جهت عمودی و اندیس s نشان دهنده شماره مرحله در جهت افقی است. فلش‌های به سمت راست و چپ نیز به ترتیب نشان‌دهنده جریان بالاسری و پایین دستی هر مرحله می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص است، تعداد مراحل در هر لایه برابر با شماره آن لایه است و خوراک زنجیره به مرحله $(0, 1)$ که بالاترین مرحله در زنجیره و واقع در لایه اول است، وارد می‌گردد. با توجه به اینکه زنجیره شامل چند لایه و چه تعداد جریان برگشتی باشد و این جریان‌ها به چه مرحله‌ای در لایه‌های بالاتر وارد شوند، تعداد جریان‌های محصول و پسماند نهایی در زنجیره شبکه ای ثابت و منحصر به فرد نخواهد بود.



شکل (۱) شمایی از یک زنجیره شبکه ای (a) با جریان برگشتی از لایه آخر (b) ایده آل

۲-۲- معادلات حاکم بر زنجیره شبکه ای و حل آن

جریان‌های خوراک، بالاسری و پایین دستی مرحله (l, s) به ترتیب با $L_{(l,s)}$ ، $L'_{(l,s)}$ و $L''_{(l,s)}$ نشان داده شده و غلظت در این جریان‌ها به ترتیب $G_{i,(l,s)}$ ، $G'_i(l,s)$ و $G''_{i,(l,s)}$ می‌باشند. غلظت ایزوتوپ i ام در خوراک زنجیره با $C^{i,F}$ بیان می‌شود. همچنین تعداد ایزوتوپ‌های موجود در مخلوط با N_C نمایش داده می‌شود. نرخ جریان خوراک ورودی به مرحله (l, s) به کمک موازنه جرم کلی برای هر مرحله بدست می‌آید و با در نظر گرفتن اینکه در آن مرحله جریان برگشتی لایه‌های



دیگر وارد می شوند یا خیر متفاوت خواهد بود. جدول (۱) روابط مربوطه را نشان می دهد. همچنین غلظت جریان ورودی به مرحله (l, s) نیز به کمک موازنه جرم جزء مطلوب قابل محاسبه خواهد بود که در جدول (۲) روابط آن آورده شده است.

جدول (۱) نرخ جریان خوراک ورودی به مرحله (\square, \square)

Stage (l, s)	Material Balance
$l = 1, s = 0$	$L_{(l,s)} = Feed$
* $s = -(l - 1)$	$L_{(l,s)} = [1 - \theta_{(l-1,s+1)}]L_{(l-1,s+1)}$
* $s = (l - 1)$	$L_{(l,s)} = \theta_{(l-1,s-1)}L_{(l-1,s-1)}$
* $-(l - 1) < s < l - 1$	$L_{(l,s)} = \theta_{(l-1,s-1)}L_{(l-1,s-1)} + [1 - \theta_{(l-1,s+1)}]L_{(l-1,s+1)}$
** $s = -(l - 1)$	$+ \theta_{(l+1,s-1)}L_{(l+1,s-1)}L_{(l,s)} = [1 - \theta_{(l-1,s+1)}]L_{(l-1,s+1)}$
** $s = (l - 1)$	$+ [1 - \theta_{(l+1,s+1)}]L_{(l+1,s+1)}L_{(l,s)} = \theta_{(l-1,s-1)}L_{(l-1,s-1)}$
** $-(l - 1) < s < l - 1$	$+ [1 - L_{(l,s)} = \theta_{(l-1,s-1)}L_{(l-1,s-1)} + [1 - \theta_{(l-1,s+1)}]L_{(l-1,s+1)}$ $\theta_{(l-1,s+1)}]L_{(l-1,s+1)} + \theta_{(l+1,s-1)}L_{(l+1,s-1)} + [1 - \theta_{(l+1,s+1)}]L_{(l+1,s+1)}$

*(Stage without Recirculation)
**(Stage with Recirculation)

جدول (۲) غلظت جریان خوراک ورودی به مرحله (l, s)

Stage (l, s)	Partial Balance for $(i = 1, 2, \dots, N_c)$
$l = 1, s = 0$	$C_{i,(l,s)} = (Feed C^{i,F})/L_{(l,s)}$
* $s = -(l - 1)$	$C_{i,(l,s)} = ([1 - \theta_{(l-1,s+1)}]L_{(l-1,s+1)}C''_{i,(l-1,s+1)})/L_{(l,s)}$
* $s = (l - 1)$	$C_{i,(l,s)} = (\theta_{(l-1,s-1)}L_{(l-1,s-1)}C'_{i,(l-1,s-1)})/L_{(l,s)}$
* $-(l - 1) < s < l - 1$	$C_{i,(l,s)} = (\theta_{(l-1,s-1)}L_{(l-1,s-1)}C'_{i,(l-1,s-1)} + [1 - \theta_{(l-1,s+1)}]L_{(l-1,s+1)}C''_{i,(l-1,s+1)})/L_{(l,s)}$
** $s = -(l - 1)$	$+ \theta_{(l+1,s-1)}L_{(l+1,s-1)}C'_{i,(l+1,s-1)})/C_{i,(l,s)} = ([1 - \theta_{(l-1,s+1)}]L_{(l-1,s+1)}C''_{i,(l-1,s+1)})/L_{(l,s)}$
** $s = (l - 1)$	$+ [1 - \theta_{(l+1,s+1)}]L_{(l+1,s+1)}C''_{i,(l+1,s+1)})/C_{i,(l,s)} = (\theta_{(l-1,s-1)}L_{(l-1,s-1)}C'_{i,(l-1,s-1)})/L_{(l,s)}$
** $-(l - 1) < s < l - 1$	$C_{i,(l,s)} = (\theta_{(l-1,s-1)}L_{(l-1,s-1)}C'_{i,(l-1,s-1)} + [1 - \theta_{(l-1,s+1)}]L_{(l-1,s+1)}C''_{i,(l-1,s+1)})/L_{(l,s)}$



$$\theta_{(l-1,s+1)}]L_{(l-1,s+1)}C''_{i,(l-1,s+1)} + \theta_{(l+1,s-1)}L_{(l+1,s-1)}C'_{i,(l+1,s-1)} + [1 - \theta_{(l+1,s+1)}]L_{(l+1,s+1)}C''_{i,(l+1,s+1)} / L_{(l,s)}$$

*(Stage without Recirculation)

** (Stage with Recirculation)

پس از اینکه با استفاده از روابط مندرج در جداول ۱ و ۲، نرخ جریان ورودی به مراحل و غلظت این جریان ها در لایه مورد نظر محاسبه شد، برای هر یک از مراحل آن لایه، به کمک روابط ۱ الی ۳، دستگاه معادلات غیر خطی تشکیل داده و به کمک یک روش حل مناسب مانند روش ناحیه اطمینان داگ لگ، غلظت جریان های بالاسری مراحل آن لایه و برش آن مراحل محاسبه می گردند.

$$C_i = \theta C'_i + (1 - \theta) \frac{C'_i}{\sum_{j=1}^{N_c} \alpha_{ij} C'_j} \quad (i = 1, 2, \dots, N_c) \quad (1)$$

$$\frac{C'_{k_1}}{C'_{k_2}} = \alpha_{k_1 k_2}^{1/2} \frac{C_{k_1}}{C_{k_2}} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_c} C'_i = 1 \quad (3)$$

پس از آن، غلظت پسماند مراحل لایه مورد نظر نیز از رابطه ۴ محاسبه می شود.

$$C''_{i,(l,s)} = \frac{C'_{i,(l,s)}}{\sum_{j=1}^{N_c} \alpha_{ij} C'_{j,(l,s)}} \quad (4)$$

برای هر مرحله فاکتور جداسازی با رابطه ۵ تعریف می شود [۱۰].

$$\alpha_{ij,n} = \frac{C'_{i,n}/C'_{j,n}}{C''_{i,n}/C''_{j,n}} = \alpha_{0,n}^{M_j - M_i} \quad (i = j - 1, j = 2, \dots, N_c) \quad (5)$$

که در آن $\alpha_{i,j}$ فاکتور جداسازی بین اجزاء i و j است و M_i و M_j به ترتیب وزن مولکولی این اجزاء می باشند. اجزاء طوری مرتب شده اند که اگر $i < j$ باشد آنگاه $M_i < M_j$ و $\alpha_{0,n}$ فاکتور جداسازی کلی برای اختلاف جرم واحد ($M_i = 1$) - M_j می باشد.

بدین ترتیب برای حصول زنجیره شبکه ای ایده آل، لایه به لایه پارامترها محاسبه شده تا به انتهای زنجیره رسیده شود. در حالتی که جریان برگشتی در زنجیره وجود داشته باشد، روند محاسبات به همین صورت خواهد بود با این تفاوت که برای لایه های با جریان برگشتی لازم است یک حلقه تکرار در نظر گرفته شود تا نرخ جریان مراحل در لایه های درگیر با جریان برگشتی همگرا شود. برای شرط همگرایی نرخ جریان ها در لایه های با جریان برگشتی، از رابطه ۶ استفاده می گردد که در آن، m شماره تکرار، N مجموع تعداد کل مراحل در زنجیره و ϵ پارامتر همگرایی است که در این مقاله از مرتبه 10^{-8} در نظر گرفته شده است.



$$\frac{1}{N} \sqrt{\sum_l \sum_s |L_{(l,s)}^{m+1} - L_{(l,s)}^m|^2} \ll \varepsilon \quad (6)$$

به منظور آشنایی با شبیه سازی زنجیره جریان برگشتی متداول نسبت فراوانی تطبیق یافته (R)، به مرجع ۷ مراجعه شود. در این تحقیق، کد RSIMCAS جهت شبیه سازی این زنجیره توسعه داده شده است و به دلیل محدودیت صفحات در اینجا به جزئیات روش پرداخته نشده است.

۳- نتایج

در راستای شبیه سازی زنجیره شبکه‌ای با جریان برگشتی، کد RNETCAS توسعه داده شده است که قابلیت شبیه سازی زنجیره شبکه‌ای با جریان برگشتی برای ایزوتوپ‌های عناصر مختلف در مقادیر مختلف فاکتور جداسازی را دارا می‌باشد. برای مقایسه عملکرد این دو زنجیره، زنجیره شبکه‌ای R با ۸ لایه و نرخ جریان خوراک ۲۰ gr/h و فاکتور جداسازی به ازای اختلاف جرم واحد ۱/۲ انجام شده است. در این زنجیره جزء k_1 برابر با ۲ و جزء k_2 برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. مشخصات خوراک ورودی به زنجیره و ترکیب درصد اجزاء آن در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین زنجیره جریان برگشتی متداول R با تعداد ۱۵ مرحله، مرحله ورود خوراک ۸، فاکتور جداسازی به ازای اختلاف جرم واحد ۱/۲، نرخ جریان خوراک ۲۰ gr/h و جزء k_1 برابر با ۲ و جزء k_2 برابر با ۳ در نظر گرفته شده است.

جدول (۳) مشخصات خوراک ورودی به زنجیره و ترکیب درصد اجزاء آن

ترکیب درصد خوراک								
$^{120}\text{TeF}_6$	$^{122}\text{TeF}_6$	$^{123}\text{TeF}_6$	$^{124}\text{TeF}_6$	$^{125}\text{TeF}_6$	$^{126}\text{TeF}_6$	$^{128}\text{TeF}_6$	$^{130}\text{TeF}_6$	ایزوتوپ
۲۳۴	۲۳۶	۲۳۷	۲۳۸	۲۳۹	۲۴۰	۲۴۲	۲۴۴	جرم مولی
۰/۰۰۰۸۹	۰/۰۲۴۶	۰/۰۰۸۷	۰/۰۴۶۱	۰/۰۶۹۹	۰/۱۸۷۲	۰/۳۱۷۹	۰/۳۴۴۷	غلظت

مقایسه نرخ جریان‌ها در این دو زنجیره و همچنین غلظت‌های محصول و پسماند هر دو زنجیره در جداول (۶) و (۷) آورده شده اند. به عنوان نمونه، نماد $\sum L(:, -7)$ به معنای مجموع نرخ جریان‌های ورودی به مراحل با شماره ۷- در لایه‌های مختلف می‌باشد. $\sum L_{Net}$ و $\sum L_R$ نرخ جریان بین مراحل کل به ترتیب برای زنجیره متداول R و زنجیره شبکه‌ای R می‌باشند. L_n نیز نرخ جریان ورودی به مرحله n در زنجیره متداول R می‌باشد.



جدول (۶) نرخ جریان بین مراحل زنجیره‌های جریان برگشتی و شبکه‌ای نسبت فراوانی تطبیق یافته

زنجیره	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8
زنجیره	۲۷/۲۷۲۴۹	۳۸/۷۶۳۹۹	۴۴/۴۱۳۸۶	۴۷/۶۵۰۴۵	۴۹/۷۸۱۷۸	۵۱/۳۶۵۴۷	۵۲/۶۶۷۵۵	۵۳/۸۲۹۹۳
متداول R	L_9	L_{10}	L_{11}	L_{12}	L_{13}	L_{14}	L_{15}	$\sum L_R$
	۲۶/۵۵۷۴۵	۱۵/۰۶۵۹۹	۹/۱۴۶۱۳۷	۶/۱۷۹۵۴۶	۴/۰۴۸۱۹۹	۲/۴۶۴۴۹۸	۱/۱۶۲۳۹۸	۴۳۰/۶۳۹۷
زنجیره شبکه ای R	$\sum L(:, -7)$	$\sum L(:, -6)$	$\sum L(:, -5)$	$\sum L(:, -4)$	$\sum L(:, -3)$	$\sum L(:, -2)$	$\sum L(:, -1)$	$\sum L(:, 0)$
	۲۷/۲۷۲۳۸	۳۸/۷۶۳۶۸	۴۴/۴۱۳۴۱	۴۷/۶۴۹۹۲	۴۹/۷۸۱۲	۵۱/۳۶۴۸۶	۵۲/۶۶۶۹۲	۵۳/۸۲۹۲۹
	$\sum L(:, 1)$	$\sum L(:, 2)$	$\sum L(:, 3)$	$\sum L(:, 4)$	$\sum L(:, 5)$	$\sum L(:, 6)$	$\sum L(:, 7)$	$\sum L_{Net}$
	۲۶/۵۵۶۹۲	۱۵/۰۶۵۶۳	۹/۴۱۵۹۰۱	۶/۱۷۹۳۹۶	۴/۰۴۸۱۱	۲/۴۶۴۴۵۲	۱/۱۶۲۳۸۱	۴۳۰/۶۳۴۴

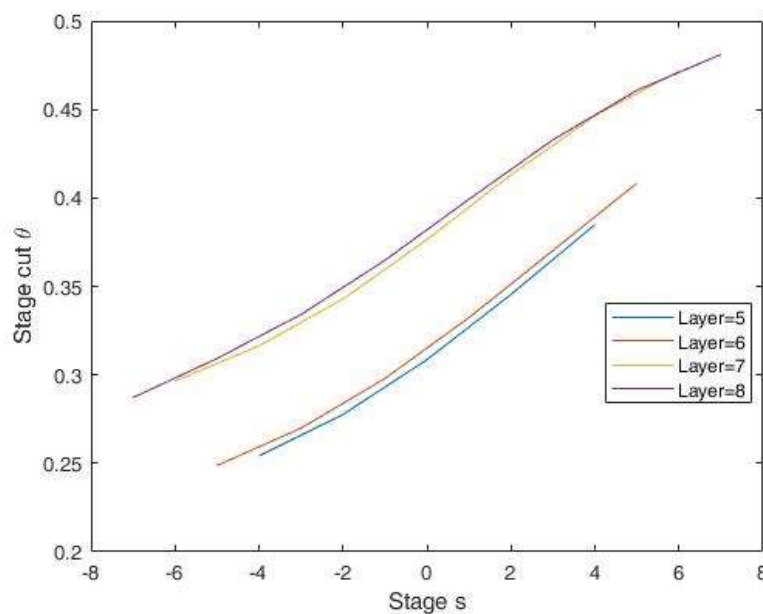
جدول (۷) غلظت‌های محصول و پسماند زنجیره‌های جریان برگشتی و شبکه‌ای نسبت فراوانی تطبیق یافته

ایزوتوپ	غلظت محصول		غلظت پسماند	
	زنجیره متداول R	زنجیره شبکه ای R	زنجیره متداول R	زنجیره شبکه ای R
$^{120}\text{TeF}_6$	۰/۰۳۱۰۲۳	۰/۰۳۱۰۲۳	۰/۰۰۰۰۲۳۳	۰/۰۰۰۰۲۳۳
$^{122}\text{TeF}_6$	۰/۰۵۹۳۵۹۳	۰/۰۵۹۳۵۹۱	۰/۰۰۸۲۳۴	۰/۰۰۸۲۳۴
$^{123}\text{TeF}_6$	۰/۱۰۱۲۳۹	۰/۱۰۱۲۳۹	۰/۰۰۶۰۳۸	۰/۰۰۶۰۳۸
$^{124}\text{TeF}_6$	۰/۱۶۶۲۷۷	۰/۱۶۶۲۷۸	۰/۰۴۲۶۴۳	۰/۰۴۲۶۴۳
$^{125}\text{TeF}_6$	۰/۰۶۳۵۵۳	۰/۰۶۳۵۵۴	۰/۰۷۰۰۸۳	۰/۰۷۰۰۸۳
$^{126}\text{TeF}_6$	۰/۰۴۰۳۶۷	۰/۰۴۰۳۶۸	۰/۱۹۱۴۰۳	۰/۱۹۱۴۰۳
$^{128}\text{TeF}_6$	۰/۰۰۳۷۲۹	۰/۰۰۳۷۲۹	۰/۳۲۶۹۳۷	۰/۳۲۶۹۳۷

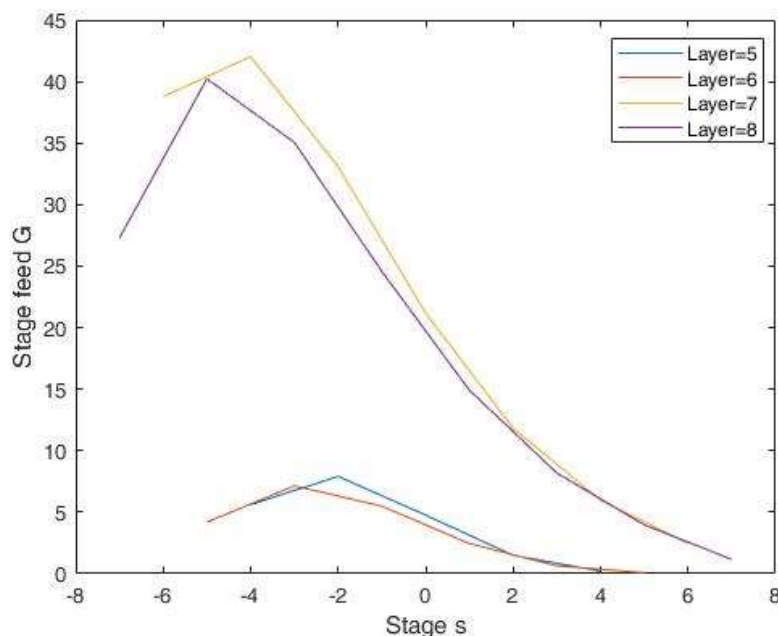


$^{130}\text{TeF}_6$	۰/۰۰۰۲۱۹	۰/۰۰۰۲۱۹	۰/۳۵۴۶۳۹	۰/۳۵۴۶۳۹
----------------------	----------	----------	----------	----------

همچنین شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب برش مراحل و نرخ جریان ورودی به مراحل در لایه‌های ۵ الی ۸ در زنجیره شبکه‌ای R را نشان می‌دهند.



شکل (۲) برش مراحل در لایه‌های ۵ الی ۸ در زنجیره شبکه‌ای R



شکل (۳) نرخ جریان ورودی به مراحل در لایه‌های ۵ الی ۸ در زنجیره شبکه‌ای R

۴- بحث و نتیجه‌گیری

همان طور که از جدول (۶) مشاهده می‌شود، مجموع نرخ جریان‌ها در مراحل با شماره‌های یکسان در لایه‌های مختلف، در زنجیره شبکه‌ای جریان برگشتی R، معادل با نرخ جریان ورودی به مرحله معادل آن‌ها در زنجیره جریان برگشتی متداول R می‌باشد. همچنین جدول (۷) نشان می‌دهد که عملکرد جداسازی این دو زنجیره با یکدیگر یکسان می‌باشد. با توجه به شکل (۲) نتیجه می‌شود با اعمال جریان برگشتی در زنجیره شبکه‌ای، برش لایه‌های دارای جریان برگشتی افزایش یافته و برش مراحل در لایه‌های با جریان برگشتی و همچنین در لایه‌های بدون جریان برگشتی تقریباً با یکدیگر برابر می‌باشند. با توجه به شکل (۳)، همین نتیجه‌گیری، در مورد نرخ جریان ورودی به مراحل این لایه‌ها برقرار می‌باشد.

مراجع

[1] A.G. Kudziev, Production and Application of Stable Enriched Isotopes in the USSR, Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A282, 267-270, 1989

[2] D. E. Armstrong, A. C. Briesmeister, B. B. McInteer, R. M. Potter, 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] De la Garza, A., Garret, G.A., Murphy, J.E., Multicomponent isotope separation in cascade. Chem. Eng. Sci. 15, 188-209, 1961
- [5] Kucherov, R.Ya, Minenko, V.P., Theory of cascade for separating Multi-component isotope mixtures. At. Energy. 19(4), 1290-1300, 1965
- [6] Apelblat, A., Ilamed-Lehrer, Y., The theory of a real isotope enriching cascade - I. J. Nucl. Energy. 22, 1-14, 1968
- [7] Shi Zeng, Lu Cheng, Dongjun Jiang, Valentin D. Borisevich, Georgy A. Sulaberidze, A Numerical Method Of Cascade Analysis And Design For Multi-Component Isotope Separation . Chemical Engineering Research And Design, Vol 92, pp 2649-2658, 2014
- [8] Shi Zeng, Zhengen Ying, A Truly Ideal Cascade: Net Cascade, Separation Science and Technology, 47, 929-935, 2012
- [9] Shi Zeng, Zhengen Ying, separation of Multi-component Isotope Mixtures by Matched Abundance Ration Net Cascade, Atomic Energy Science and Technology, 49(1), 6-12, 2015
- [10] Chuntong Ying, Zhixiong Guo, Houston G. Wood, Solution of the Diffusion Equations in a Gas Centrifuge for Separation of Multicomponent Mixtures, Separation Science and Technology, 31(18), pp. 2455-2471, 1996