



طراحی آبشار شبه ایده‌آل جهت غنی سازی ایزوتوپ های پایدار و مقایسه آن با مدل تطبیق

یافته R

فاطمه منصورزاده*^۱، سید جابر صفدری^۱، علی اصغر قربانپور خمسه^۱، علی نوروزی^۲، محمد حسن ملاح^۱

۱- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای

۲- سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران

چکیده: در این تحقیق یک آبشار با مدل تطبیق یافته R و مدل شبه ایده‌آل طراحی شده و سپس نتایج بدست آمده برای دو مدل به روش تحلیلی و عددی مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که برای دو جزء k_1 و k_2 از خوراک که N_c جزء دارد، $\frac{N_c(N_c-1)}{2}$ آبشار تطبیق یافته R قابل تعریف است که همگی حالات خاصی از آبشار شبه ایده‌آل برای جزء k_1 می‌باشد و برش جزء k_1 در آن از رابطه $\frac{\beta_{(k_1, k_2), n}}{\beta_{(k_1, k_2), n+1}}$ تعیین می‌شود. بنابراین آبشار شبه ایده‌آل گسترده وسیعی از آبشارها را در بر می‌گیرد و با انتخاب صحیح برش برای جزء مورد نظر در آبشار شبه ایده‌آل می‌توان به شرایط بهینه‌ای دست یافت که در آن علاوه بر دستیابی به غنای مورد نظر از ایزوتوپ مطلوب کمترین ماشین‌های سانتریفیوژ استفاده شود. براساس محاسبات انجام شده برای دستیابی به غنای ۷۰/۱۱٪ از ایزوتوپ $Xe-136$ ، نرخ جریان میان مرحله ای کل در آبشار شبه ایده‌آل ۶٪ کمتر از آبشار تطبیق یافته R می‌باشد.

کلید واژه: ایزوتوپ های چندجزئی، آبشار مدل شبه ایده‌آل، برش جزئی، آبشار مدل تطبیق یافته R

Designing the quasi-ideal cascade for separation of stable isotopes and comparing it with the R-cascade

F. Mansourzadeh*¹, J. Safdari¹, A. GH. Khamseh¹, A. Norouzi², M. Mallah¹

¹Atomic 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.

In this research, a cascade with the matched abundance ratio and the quasi-ideal models has been designed and the results have been compared for both models analytically and numerically. The results show that for two components k_1 and k_2 , there are $\frac{N_c(N_c-1)}{2}$ R-cascades that are special states of the quasi-ideal cascade for the k_1 component. The cut of k_1 determined exactly from the relation $\frac{\beta_{(k_1, k_2), n}}{\beta_{(k_1, k_2), n+1}}$. Therefore, the quasi-ideal cascade encompasses a wide range of cascades, and by choosing the right cut for the desired component in the quasi-ideal cascade, optimal relations can be achieved. Based on the calculations for attaining the 70.11% of $Xe-136$, the total interstage flow rate in the quasi-ideal cascade is 6% less than the R- cascade.

Keywords: Multicomponent, Quasi ideal cascade, Partial cut, R-cascade



۱- مقدمه

از جمله مدل‌های مهم و کارآمد در تحلیل آبشارهای چندجزیی، مدل شبه ایده‌آل و مدل تطبیق یافته R می‌باشند [۱ و ۲]. برای بررسی این مدل‌ها در ابتدا روش‌های حل تحلیلی توسط محققین ارائه شد [۳] که با پیشرفت محاسبات عددی، روش‌های عددی جهت تعیین پارامترهای آبشار در جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی و شبیه سازی عملکرد آنها معرفی شد. در این مقاله پس از معرفی آبشار شبه ایده‌آل و آبشار تطبیق یافته R که در ابتدا بررسی آنها برای جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیوم بوده است، به معرفی الگوریتم مورد استفاده جهت طراحی آنها در کد تهیه شده که با زبان متلب نوشته شده است پرداخته می‌شود. سپس برای یک نمونه خاص طراحی دو آبشار انجام شده و نتایج این پارامترها در آبشار تطبیق یافته R و آبشار شبه ایده‌آل به شکل عددی مقایسه می‌شوند. در نهایت به شکل تحلیلی نیز نتایج مورد بررسی قرار گرفته و اثبات می‌شود که آبشار تطبیق یافته R حالت خاصی از آبشار شبه ایده‌آل می‌باشد. در بخش بعدی نیز پارامترها برای یک آبشار شبه ایده‌آل محاسبه می‌شود که نسبت به آبشار تطبیق یافته در حالت بهینه‌تری قرار دارد.

۲- تئوری

در این بخش به تئوری‌های مربوط به دو مدل شبه ایده‌آل و تطبیق یافته R اشاره می‌شود. در آبشار مدل تطبیق یافته R شرط انطباقی زیر بین نسبت‌های فراوانی اجزاء k_1 و k_2 در یک نقطه تلاقی مشابه آبشار ایده‌آل در جداسازی اورانیوم در نظر گرفته می‌شود. در آبشار تطبیق یافته R ، ارتباط نسبت فراوانی برای دو جزء k_1 و k_2 در مراحل به شکل زیر است:

$$R''_{(k_1, k_2), n+1} = R_{(k_1, k_2), n} = R'_{(k_1, k_2), n-1} \quad , \quad 2 \leq n \leq N - 1 \quad (1)$$

که تعریف R' ، R'' و R به عنوان نسبت فراوانی برای دو جزء k_1 و k_2 به ترتیب در جریان‌های غنی شده، تهی شده و خوراک در مرحله n م برابر است با:

$$R'_{(k_1, k_2), n} = \frac{y_{k_1, n}}{y_{k_2, n}}, \quad R''_{(k_1, k_2), n} = \frac{x_{k_1, n}}{x_{k_2, n}}, \quad R_{(k_1, k_2), n} = \frac{z_{k_1, n}}{z_{k_2, n}} \quad (2)$$

از تعریف فاکتورهای غنی سازی (β) و تهی سازی (γ) داریم:

$$R'_{(k_1, k_2), n} = \beta_{(k_1, k_2), n} R_{(k_1, k_2), n} \quad (3)$$



$$R''_{(k_1, k_2), n} = \frac{R_{(k_1, k_2), n}}{Y_{(k_1, k_2), n}} \quad (4)$$

در نتیجه:

$$\frac{R'_{(k_1, k_2), n-1}}{\beta_{(k_1, k_2), n-1}} = \frac{R_{(k_1, k_2), n}}{Y_{(k_1, k_2), n}} \quad (5)$$

بنابراین با استفاده از رابطه (۱) و (۵) نتیجه کلی مطابق رابطه (۶) در آبخار تطبیق یافته مدل R برقرار خواهد بود:

$$\beta_{(k_1, k_2), n} = Y_{(k_1, k_2), n+1} \quad (6)$$

به عبارتی دیگر مقدار فاکتور غنی سازی برای دو جزء k_1 و k_2 در مرحله n برابر با مقدار فاکتور تهی سازی برای این دو جزء در مرحله n+1 بوده و در صورتی که فاکتور جداسازی در تمام مراحل یکسان باشد نیز دو فاکتور غنی سازی و تهی سازی در تمام مراحل با یکدیگر برابرند. در آبخار شبه ایده آل نیز شرط انطباقی، مطابق آبخار ایده آل برای سیستم های دو جزئی به صورت رابطه (۷) برقرار است:

$$\theta_{k, n} = \frac{C'_{k, n} * M_n}{C_{k, n} * Z_n} \quad (7)$$

که در آن $\theta_{k, n}$ برش جزئی ایزوتوپ kام می باشد. در این آبخار فرض بر این است که $\theta_{k, n}$ در تمامی مراحل آبخار ثابت در نظر گرفته می شود [۴]. با این وجود این شرط در این مدل ضروری نبوده و مقدار $\theta_{k, n}$ بین مراحل مختلف می تواند متفاوت باشد. در رابطه (۷)، $C'_{k, n}$ و $C_{k, n}$ به مقدار غلظت ایزوتوپ kام در جریانهای بالادستی و خوراک برای مرحله n اشاره دارند. همچنین M_n و Z_n نشان دهنده جریانهای بالادستی و خوراک وردی به مرحله n می باشند.

۳- روش کار

در این تحقیق ابتدا یک آبخار با استفاده از مدل تطبیق یافته R به منظور دستیابی به غنای مشخص یک ایزوتوپ خاص در محصول و پسماند آبخار طراحی می شود. سپس نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از طراحی آبخار مدل شبه ایده آل مورد مقایسه و ارزیابی قرار می گیرد و نشان داده می شود در حالتی که مقدار برش جزئی $\theta_{k_1, n}$ برای جزء k_1 در آبخار مدل تطبیق یافته R، در طراحی آبخار شبه ایده آل قرار گیرد نتایج برای دو آبخار یکسان خواهد بود. روند الگوریتم طراحی در کد MODE (Model Design) به این صورت است که ابتدا تعداد مراحل آبخار



$N=2$ در نظر گرفته شده و وارد الگوریتم مربوط به شبیه‌سازی با عنوان MARCSimulation می‌گردد. در این مرحله، غناها و دبی‌های هر یک از مراحل موجود در آبشار محاسبه می‌شود. بر اساس اینکه غنای بدست آمده برای محصول و پسماند آبشار، بزرگتر و یا کوچکتر از مقدار مورد نظر یعنی CP_{Fin} و CW_{Fin} شود، الگوریتم چهار مسیر اصلی را در پیش می‌گیرد. اگر غنای محصول کوچکتر از CP_{Fin} و غنای پسماند بزرگتر از CW_{Fin} شود، مسیر اول انتخاب شده و پس از اضافه شدن یک مرحله به تعداد مراحل مکان ورود خوراک از رابطه $NF=Floor(N/2+0.1)+1$ بدست می‌آید و این چرخه ادامه می‌یابد تا زمانی که یکی از شروط پسماند یا محصول اغنا شود. بر حسب اینکه شرط محصول اغنا شود یا شرط پسماند، الگوریتم وارد مسیر دوم و یا سوم می‌شود. مسیر دوم مربوط به حالتی است که غلظت ایزوتوپ هدف در محصول زنجیره به مقدار مورد نظر CP_{Fin} و یا بیشتر از آن رسیده است. بنابراین لازم است یک واحد از تعداد مراحل غنی سازی کم شده و به مرحله تهی سازی اضافه شود. پس یک مرحله از تعداد مراحل کم شده و مرحله ورود خوراک یک مرحله جلو می‌رود. مسیر سوم مربوط به حالتی است که غلظت ایزوتوپ هدف در پسماند آبشار به مقدار مورد نظر CW_{Fin} و یا کمتر از آن رسیده است. بنابراین لازم است یک واحد از تعداد مراحل تهی سازی و از تعداد کل مراحل زنجیره کم شود. بدین منظور، از تعداد مراحل یکی کم شده و همچنین مرحله ورود خوراک نیز یک واحد به عقب برده می‌شود. این چرخه‌ها تکرار می‌شوند تا زمانی که هر دو شرط محصول و پسماند اغنا شد و الگوریتم وارد مسیر چهارم شود. در این مسیر یک مرحله از تعداد مراحل که در ابتدای الگوریتم اضافه شده بود کم می‌شود و بنابراین برنامه پایان یافته و طراحی انجام می‌گیرد. الگوریتم مربوط به شبیه‌سازی آبشار شبه ایده‌آل با عنوان QUASISimulation می‌باشد که در هنگام طراحی این آبشار از آن استفاده می‌شود. در الگوریتم شبیه‌سازی دو آبشار جریان برگشتی از نوع تطبیق یافته R و شبه ایده‌آل نیز ابتدا جریان در مراحل مختلف آبشار به عنوان حدس اولیه در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روش تکرار Q مقدار غلظت تمام ایزوتوپ‌ها در جریان‌های مختلف محاسبه می‌شود. پس از آن با استفاده از روش حل معادلات غیر خطی ناحیه اطمینان و روش کمکی تکنیک پیوسته تمام پارامترها در آبشارهای مدل محاسبه می‌شوند که به تفصیل در مرجع [۵] آورده شده است. لازم به ذکر است که این کد توانایی طراحی آبشار برای جداسازی ایزوتوپ‌های میانی، و همچنین ایزوتوپ‌های ابتدایی و انتهایی را نیز داراست.

در این مقاله ابتدا با استفاده از کد $MODE$ به شکل عددی نشان داده می‌شود که آبشار مدل R حالت خاصی از آبشار شبه ایده‌آل است. همچنین به شکل تحلیلی نیز ثابت می‌شود که آبشار تطبیق یافته R برای جداسازی متقارن دو جزء k_1 و k_2 یک آبشار شبه ایده‌آل است که برش جزئی برای جزءهای k_1 و k_2 در تمام مراحل ثابت می‌باشد.



در نهایت پارامترها در یک آبشار شبه ایده آل محاسبه می شود که نسبت به آبشار تطبیق یافته در حالت بهینه تری قرار دارد.

۴- نتایج

محاسبات برای یک آبشار با نرخ جریان خوراک 20 (gr/hr) ، فاکتور جداسازی کل برای اختلاف جرم واحد $1/1$ انجام شده است که هدف غنی سازی ایزوتوپ دوم تنگستن در جریان سبک تا غنای $0/5790$ و تهی سازی آن تا غنای $0/1952$ در جریان سنگین می باشد. اجزاء k_1 و k_2 نیز به ترتیب ۲ و ۳ در نظر گرفته شده اند. مقدار برش جزئی برای جزء دوم در آبشار مدل R برابر با $0/5119$ به دست می آید و در صورتی که با استفاده از این مقدار طراحی برای آبشار مدل شبه ایده آل انجام گیرد نتایج دقیقاً مطابق آبشار تطبیق یافته R بوده که در جدول (۱) به شکل خلاصه آورده شده است. در این حالت آبشار طراحی شده با استفاده از دو مدل شامل ۱۵ مرحله می باشد که خوراک در مرحله ۵ به آن وارد می شود. در جدول (۱) غلظت ایزوتوپ دوم تنگستن در جریان های پیشرونده و پسرونده و همچنین نرخ جریانها برای دو مدل آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود آبشار تطبیق یافته حالت خاصی از آبشار شبه ایده آل است و جهت یافتن بهترین مدل برای جداسازی ایزوتوپ های چند جزئی می توان از آبشار شبه ایده آل با تغییر دادن مقدار برش جزئی جهت دست یابی به بهترین آبشار با کمترین نرخ جریان میان مرحله ای استفاده نمود. همچنین جدول (۲) نشان می دهد که مقدار برش جزئی برای جزء دوم نیز در آبشار تطبیق یافته در تمام مراحل یکسان بوده که مجموع برش جزئی برای دو جزء کلیدی در آبشار تطبیق یافته برابر یک می گردد.

همانطور که به شکل عددی ملاحظه شد مقدار برش جزئی برای ایزوتوپ نام در آبشار تطبیق یافته در تمام مراحل برابر و یکسان است یا به عبارتی دیگر آبشار تطبیق یافته R حتماً شبه ایده آل هم هست. در ادامه به شکل تحلیلی نیز اثبات می شود در صورتیکه جداسازی متقارن باشد، مقدار برش جزء نام $(\theta_{i,n})$ بدست آمده در آبشار R یک مقدار ثابت است و اگر این مقدار در شبیه سازی آبشار شبه ایده آل قرار گیرد، به ازای آن آبشار شبه ایده آل، یک آبشار تطبیق یافته R نیز می باشد. از تعریف برش و فاکتور غنی سازی در مراحل داریم:

$$\theta_n = \frac{M_n}{Z_n} = \frac{z_{i,n} - x_{i,n}}{y_{i,n} - x_{i,n}} \quad (8)$$

$$\beta_{ij,n} = \frac{y_{i,n}}{z_{i,n}} \rightarrow \beta_{ij,n} = \frac{y_{i,n}}{z_{i,n}} \cdot \frac{z_{j,n}}{y_{j,n}} \quad (9)$$



همچنین برای مقادیر $y_{i,n}$ و (β, z) روابط زیر برقرارند [۶]:

جدول ۱- مقادیر نرخ جریان خوراک، جریان پیشرونده پسرونده مراحل و برش مراحل برای دو آبشار مدل

No	$y_{2,n}$	$x_{2,n}$	Z(gr/hr)	M(gr/hr)	N(gr/hr)	Cut	$\theta_{2,n}$	$R_{(2,3),n}$	$\theta_{3,n}$
1	0.2372	0.1952	30.481	14.119	16.362	0.4632	0.5119	-	0.4881
2	0.2585	0.2147	57.032	26.551	30.481	0.46555	0.5119	1.6052	0.4881
3	0.2797	0.2343	80.627	37.713	42.913	0.46775	0.5119	1.6835	0.4880
4	0.3007	0.2541	102	47.922	54.076	0.46983	0.5119	1.7657	0.4881
5	0.3216	0.2739	121.7	57.417	64.284	0.47179	0.5119	1.8519	0.4881
6	0.3524	0.3042	102.46	48.684	53.779	0.47513	0.5119	1.9422	0.4881
7	0.3824	0.3341	86.326	41.279	45.046	0.47818	0.5119	2.037	0.4881
8	0.4113	0.3634	72.522	34.88	37.642	0.48096	0.5119	2.1365	0.4881
9	0.4390	0.3918	60.484	29.241	31.243	0.48345	0.5119	2.2407	0.4881
10	0.4655	0.4192	49.783	24.18	25.603	0.4857	0.5119	2.3501	0.4881
11	0.4907	0.4454	40.098	19.556	20.542	0.48771	0.5119	2.4648	0.4881
12	0.5146	0.4705	31.184	15.265	15.919	0.48952	0.5119	2.5851	0.4881
13	0.5372	0.4944	22.85	11.223	11.628	0.49114	0.5119	2.7113	0.4881
14	0.5587	0.5172	14.95	7.3645	7.5851	0.49262	0.5119	2.8436	0.4881
15	0.5790	0.5389	7.3645	3.6377	3.7268	0.49395	0.5119	-	0.4881

$$y_{i,n} = \beta_{ij,n} z_{i,n} (\beta, z)^{-1}, (\beta, z) = \sum \beta_{ij,n} z_{i,n} \quad (10)$$

بنابراین از تعریف برش جزئی $\theta_{i,n}$ که در حالت دو جزئی معادل ضریب بازیابی [۷] می باشد، طبق رابطه (۱۱)، و با جایگذاری $y_{i,n}$ از (۱۰) به رابطه (۱۲) خواهیم رسید:

$$\theta_{i,n} = \frac{M_n}{Z_n} \cdot \frac{y_{i,n}}{z_{i,n}} \quad (11)$$

$$\theta_{i,n} = \frac{M_n}{Z_n} \cdot \frac{\beta_{ij,n}}{\sum \beta_{ij,n} z_{i,n}} \quad (12)$$



همچنین برای برش مراحل رابطه (۱۳) برقرار است [۶]:

$$\theta_n = \frac{M_n}{Z_n} = \frac{\delta_{ij,n}}{\varepsilon_{ij,n} + \delta_{ij,n}} (\beta, z) = \frac{(1 - \bar{\gamma}_{ij,n})}{\beta_{ij,n} - 1 + 1 - \bar{\gamma}_{ij,n}} \sum \beta_{ij,n} z_{i,n} \quad (13)$$

که در آن:

$$\bar{\gamma}_{ij,n} = \frac{1}{\gamma_{ij,n}}, \quad \delta_{ij,n} = 1 - \bar{\gamma}_{ij,n}, \quad \varepsilon_{ij,n} = \beta_{ij,n} - 1 \quad (14)$$

از قرار دادن مقدار $\frac{M_n}{Z_n}$ مربوط به رابطه (۱۳) در رابطه (۱۱) به رابطه (۱۵) می‌رسیم:

$$\theta_{i,n} = \frac{(1 - \bar{\gamma}_{ij,n})}{\beta_{ij,n} - \bar{\gamma}_{ij,n}} \cdot \sum \beta_{ij,n} z_{i,n} \cdot \frac{\beta_{ij,n}}{\sum \beta_{ij,n} z_{i,n}} \quad (15)$$

با انجام عملیات جبری و قرار دادن معادل $\bar{\gamma}_i$ در آن، رابطه (۱۶) را خواهیم داشت:

$$\theta_{i,n} = \frac{(1 - \bar{\gamma}_{ij,n})\beta_{ij,n}}{\beta_{ij,n} - \bar{\gamma}_{ij,n}} = \frac{\left(\beta_{ij,n} - \frac{\beta_{ij,n}}{\gamma_{ij,n}}\right)}{\beta_{ij,n} - \frac{1}{\gamma_{ij,n}}} = \frac{(\beta_{ij,n}\gamma_{ij,n} - \beta_{ij,n})}{\beta_{ij,n}\gamma_{ij,n} - 1} \quad (16)$$

با ساده سازی و استفاده از رابطه فاکتور جداسازی به رابطه (۱۷) می‌رسیم:

$$\theta_{i,n} = \frac{\alpha_{ij,n} - \beta_{ij,n}}{\alpha_{ij,n} - 1} \quad (17)$$

رابطه (۱۷) یک رابطه کلی برای بیان ارتباط آبشار شبه ایده‌آل و آبشار تطبیق یافته R می‌باشد. در آبشار تطبیق یافته R معمولاً $\beta_{ij,n} = \gamma_{ij,n}$ است. بنابراین رابطه (۱۷) به رابطه (۱۸) ساده می‌شود.

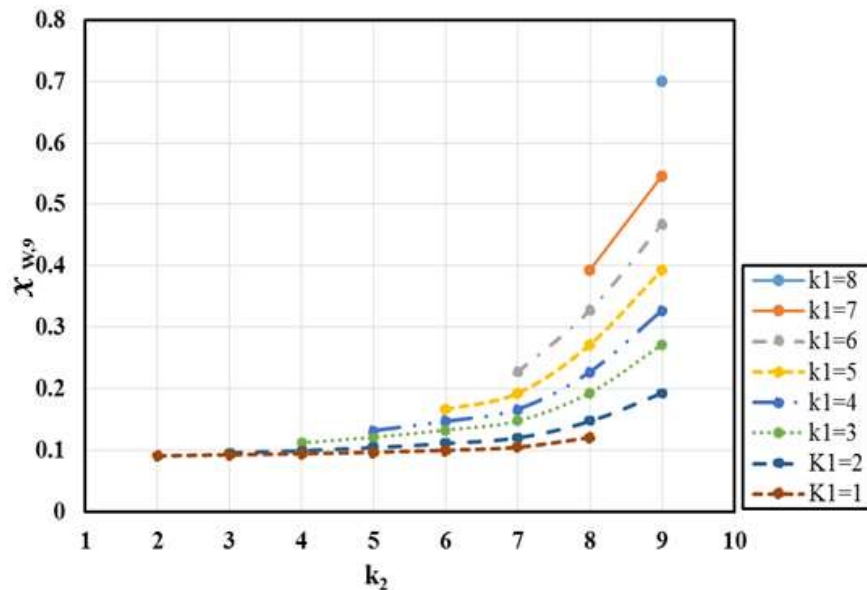
$$\theta_{i,n} = \frac{\beta_{ij,n}}{(\beta_{ij,n} + 1)} \rightarrow \beta_{ij,n} = \frac{\theta_{i,n}}{(1 - \theta_{i,n})} \quad (18)$$

با توجه به مطالب ارائه شده اگر این رابطه بین برش جزئی و فاکتورهای غنی‌سازی موجود باشد آبشار شبه ایده‌آل همان آبشار تطبیق یافته R می‌باشد. همچنین از آنجا که برای مدلسازی آبشار تطبیق یافته باید دو جزء را از میان اجزای خوراک انتخاب نمود که جرم مولکولی جزء k_1 از جرم مولکولی جزء k_2 بیشتر باشد. بنابراین تنها $\frac{N_c(N_c-1)}{2}$ آبشار تطبیق یافته R قابل تعریف است که همگی حالت خاصی از آبشار شبه ایده‌آل برای جزء k_1 می‌باشد. بنابراین



آبشار شبه ایده آل گستره وسیعی از آبشارها را در مدل‌سازی ایجاد می‌کند که امکان دسترسی به آبشار بهینه را فراهم می‌کند.

در این بخش نتایج یک آبشار شبه ایده‌آل بهینه با بهترین آبشار تطبیق یافته R برای غنی‌سازی جزء نهم زینان مقایسه می‌شود. از آنجایی که در محاسبات آبشار مدل R انتخاب k_1 و k_2 یکی از مراحل اصلی کار است، در ابتدا برای انتخاب k_1 و k_2 مناسب مطالعات پارامتریک روی یک آبشار مدل R ($N = 15, nf = 10, \alpha_0 = 1.14, F =$) $1000(\frac{mg}{s})$ انجام می‌گیرد. در این بررسی هدف رسیدن به بیشترین غنای ممکن برای جزء ۹ در جریان سنگین می‌باشد. براساس محاسبات انجام شده که در شکل (۱) نشان داده شده، در صورتی که اجزاء k_1 و k_2 به ترتیب اجزاء ۸ و ۹ انتخاب شوند مقدار $x_{9,p}$ در جریان سنگین به بیشترین مقدار معادل $70/08\%$ می‌رسد که در این حالت مقدار $\gamma_{9,w}$ برابر با $3/65\%$ خواهد بود. پس از آن مقادیر $x_{9,p}$ و $\gamma_{9,w}$ حاصله از محاسبات آبشار مدل R در کد آبشار شبه ایده‌آل با تعداد مراحل یکسان مورد استفاده قرار گرفت. همانطور که از جدول (۲) ملاحظه می‌شود آبشار شبه ایده‌آلی وجود دارد که نتایج آن از آبشار تطبیق یافته R بهتر می‌باشد. یعنی نه تنها به مقادیر غلظت مورد نظر برای ایزوتوپ نهم دست یافته است بلکه مقدار نرخ جریان میان مرحله‌ای در آن نیز کمتر بوده و به عبارتی دیگر از تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ کمتری استفاده می‌نماید. در این آبشار خوراک در مرحله ۱۲ وارد می‌شود.



شکل ۱- تغییرات غلظت ایزوتوپ Xe-136 در جریان سنگین بر حسب k_2



جدول ۲- مقایسه مدل‌های تطبیق یافته R و شبه ایده‌آل ($\alpha_0=1.14, I_{opt}=71\text{mg/s}$)

No	Z		θ_n		$x_{g,n}$		$y_{g,n}$		$\theta_{g,n}$	
	Quasi Ideal	R	Quasi Ideal	R	Quasi Ideal	R	Quasi Ideal	R	Quasi Ideal	R
1	159.62	156.02	0.5056	0.4964	0.7011	0.7008	0.6193	0.6234	0.4785	0.4673
2	306.00	312.84	0.4783	0.5012	0.6605	0.6624	0.5755	0.5780	0.4473	0.4673
3	551.90	477.51	0.5917	0.5070	0.6201	0.6190	0.5362	0.5278	0.5568	0.4673
4	811.27	659.93	0.5001	0.5140	0.5686	0.5702	0.4761	0.4728	0.4579	0.4673
5	905.15	875.08	0.4645	0.5225	0.5130	0.5157	0.4179	0.4133	0.4156	0.4673
6	1329.40	1146.80	0.6243	0.5327	0.4629	0.4554	0.3690	0.3504	0.5691	0.4673
7	1778.06	1515.00	0.4888	0.5448	0.3980	0.3903	0.2998	0.2860	0.4211	0.4673
8	1823.87	2049.10	0.4801	0.5588	0.3334	0.3220	0.2403	0.2230	0.4015	0.4673
9	1720.25	2875.60	0.4450	0.5744	0.2785	0.2536	0.1909	0.1648	0.3570	0.4673
10	2254.90	4231.60	0.6255	0.5910	0.2388	0.1891	0.1594	0.1148	0.5252	0.4673
11	2929.30	3911.60	0.4915	0.5961	0.1882	0.1604	0.1163	0.0953	0.3765	0.4673
12	4146.82	3538.60	0.6337	0.6013	0.1468	0.1338	0.0879	0.0778	0.5053	0.4673
13	3895.86	3069.30	0.5618	0.6068	0.1159	0.1093	0.0663	0.0621	0.4233	0.4673
14	2833.77	2430.00	0.5525	0.6126	0.0883	0.0872	0.0488	0.0483	0.4067	0.4673
15	1565.89	1488.80	0.5882	0.6189	0.0672	0.0676	0.0362	0.0365	0.4353	0.4673

۵- بحث و نتیجه گیری

مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. R در این تحقیق عملکرد جداسازی آبشارهای مدل شبه ایده‌آل و تطبیق یافته برای تجزیه و تحلیل و تعیین پارامترهای این دو آبشار مدل تهیه MODE در این راستا یک کد محاسباتی با نام باشد عملکرد $\theta_{k_1,n} = \frac{\beta_{k_1,k_2,n}}{(\beta_{k_1,k_2,n}+1)}$ شد. در این تحقیق به روش تحلیلی و عددی نشان داده شد در صورتی که حالت خاصی از k_1 و k_2 برای دو جزء R این دو مدل مشابه یکدیگر می‌باشد. به عبارتی دیگر آبشار تطبیق یافته می‌باشد. این بدان معناست که آبشار شبه ایده‌آل گستره وسیعی از آبشارها را در k_1 آبشار شبه ایده‌آل برای جزء بر می‌گیرد و با انتخاب صحیح برش برای جزء مورد نظر در آبشار شبه ایده‌آل می‌توان به شرایط بهینه‌ای دست یافت که در آن علاوه بر دستیابی به غنای مورد نظر از ایزوتوپ مطلوب کمترین ماشین‌های سانتریفیوژ در آن R استفاده شود. طبق محاسبات انجام گرفته مقدار جریان میان مرحله‌ای کل بدست آمده در محاسبات آبشار مدل و آبشار شبه ایده‌آل برای غنی سازی ایزوتوپ نهم زینان به ترتیب برابر با $287337/8$ و $27012/05$ می‌باشد که قرار دارد. R آبشار شبه ایده‌آل در حالت بهینه‌ای نسبت با مدل تطبیق یافته

۶- مراجع

[1] De la Garza, A., Garret, G.A., Murphy, J.E., 1961. "Multicomponent isotope separation in cascade," Chem. Eng. Sci. 15, 188.



- [2] Apelblat, A., Ilamed-Lehrer, Y., 1968. "The theory of a real isotope enriching cascade," I. J. Nucl. Energy. 22, 1.
- [3] Zeng, S., Cheng, Y., 2013, "A numerical method of cascade analysis and design for multi-component isotope separation," J. Chem. Eng. Res. Des. 92, 2649.
- [4] Sazykin, A.A., 2000. in: Baranov, V.Yu. (Ed.), Thermodynamic approach to isotope separation. Isotopes. Properties. Production. Applications. IzdAT, Moscow.
- [۵] بررسی انواع آبشارهای جریان برگشتی با سانتریفیوژ گازی برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدارا زینان، منصورزاده فاطمه، رساله دکتری مهندسی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۳۹۷.
- [6] Lehrer-Ilamd, Y., 1969, "On the Value Function for Multicomponent Isotope Separation," Nuclear Energy, 23, 559.
- [7] Benedict, M., Pigford, T. H., Wolfganglevi, H., 1981, "Nuclear Chemical Engineering," New York: McGraw-Hill book Co.