



## مقایسه غنی‌سازی ایزوتوپ‌های میانی و انتهایی تنگستن با استفاده از آبشار مربعی

فاطمه منصورزاده<sup>۱</sup>، سجاد خوشه چین<sup>۲\*</sup>، سید جابر صفدری<sup>۱</sup>، محمد حسن ملاح<sup>۱</sup>

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:

یکی از مباحث مهم در جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار دستیابی به ایزوتوپ‌های یک ماده با حداکثر مقدار غلظت مورد نظر می‌باشد. برای این منظور تعیین تعداد گام‌های جداسازی و نیز پارامترهای آبشار در هر گام بسیار حائز اهمیت است تا بتوان جداسازی را به بهترین نحو انجام داد. در این مقاله به جداسازی سه ایزوتوپ اول و دوم و سوم تنگستن از حالت طبیعی با استفاده از آبشار مربعی تا غنای بیش از ۹۰٪ پرداخته شده است. پس از آن به مقایسه نتایج جداسازی برای ایزوتوپ‌های میانی و انتهایی پرداخته شده است. در این بررسی غلظت ایزوتوپ‌های W-180، W-182 و W-183 به ترتیب از مقادیر طبیعی ۰/۰۰۱۲، ۰/۲۶۵۰ و ۰/۱۴۳۱ به ۰/۹۱۷۵، ۰/۹۱۴۵ و ۰/۹۱۰۰ رسیده است.

کلید واژه: ایزوتوپ‌های پایدار، جداسازی، تنگستن، آبشار مربعی

## Comparison of middle and end isotopes of tungsten enrichment using square Cascade

Fatemeh Mansourzadeh<sup>1</sup>, Sajad Khooshechin<sup>2\*</sup>, Jaber Safdari<sup>1</sup>, M. H. Mallah<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Material and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box: 11365-8486, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Iran Advanced Technologies Company, Atomic Energy Organization of Iran, P. O. Box: 143995531, Tehran, Iran.

### Abstract:

One of the important issues in the separation of stable isotopes is the achievement of isotopes with the maximum concentration. For this purpose, determining the number of separation steps as well as the parameters of the cascade in each step is very important so that the separation can be done in the best way. In this paper, the first, second and third isotopes of tungsten are separated from the natural state using a square cascade more than 0.90%. The separation results for the middle and end isotopes are then compared. In this study, the concentrations of W-180, W-182 and W-183 isotopes have increased from natural values of 0.0012, 0.2650 and 0.1431 to 0.9175, 0.9145 and 0.9100, respectively.

**Keywords:** Stable isotopes, separation, tungsten, square cascade

\* Email: khooshechinsajad @ gmail.com

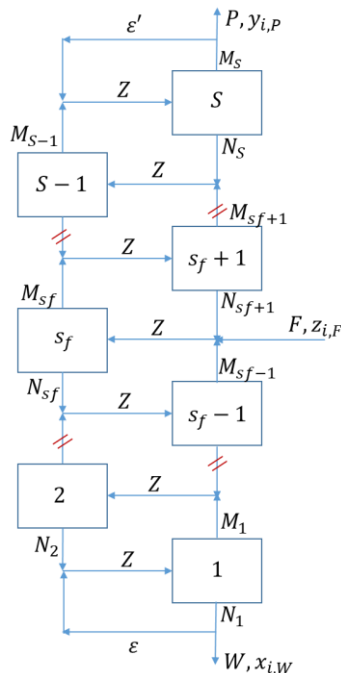
## ۱- مقدمه

ایزوتوپ‌های پایدار در علوم مختلف کاربردهای متفاوت و متنوعی دارند. یکی از عناصر با کاربردهای مهم تنگستن با ۱۵ ایزوتوپ پایدار می‌باشد که از جمله کاربردهای مهم ایزوتوپ‌های آن می‌توان به استفاده در علوم پزشکی، صنعت الکترونیک و تحقیقات در زمینه تجهیزات فیزیک پلاسما اشاره نمود [۱].

تا کنون، روش‌های مختلفی برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار معرفی شده اند که استفاده از آبشار مربعی یکی از روش‌های متداول می‌باشد [۲ و ۳]. به علت جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر در آبشار مربعی، این آبشار قابلیت بهره‌برداری در خوراک‌های پایین و همچنین ضریب برش‌های مختلف را دارا می‌باشند که اصطلاحاً از انعطاف‌پذیری بالایی در بهره‌برداری برخوردار است. لذا آبشارهای مربعی به منظور جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار مناسب می‌باشد. در این مقاله با تغییر برش یک آبشار، مرحله ورود خوراک، برش مراحل آن و مقدار نرخ خوراک ورودی به ماشین سانتریفیوژ در آبشار با ۲۵ مرحله به جداسازی سه ایزوتوپ اول و دوم و سوم تنگستن طبیعی پرداخته شده است. سپس به مقایسه نتایج جداسازی هر یک از ایزوتوپ‌ها پرداخته شده است. علت انتخاب این اجزا نیز بررسی اثر مقدار غنای ایزوتوپ در جریان خوراک و نیز اثر میانی و انتهایی بودن هر ایزوتوپ در فرایند جداسازی می‌باشد.

## ۲- تئوری

در یک آبشار مربعی نرخ جریان ورودی به تمام مراحل و در نتیجه تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ در هر مرحله ثابت می‌باشد (رابطه (۱)) و مقدار آن در طول آبشار تغییر نمی‌کند [۳]. نمایی از آبشار مربعی در شکل (۱) آورده شده است که در آن جریان خوراک با نرخ  $F$  در مرحله  $S_f$  با غنای  $Z_{i,F}$  وارد آبشار می‌شود. جریان‌های میان مرحله‌ای با نرخ  $M_s$  و  $N_s$  و ترکیب درصدی  $x_{i,s}$  و  $y_{i,s}$  و جریان‌های پسماند و محصول  $W$  و  $P$  به ترتیب با ترکیب درصد  $x_{i,W}$  و  $y_{i,P}$  بیان می‌گردد. در ادامه به بیان معادلات و پارامترهای مربوطه پرداخته می‌شود. در این معادلات تعداد ایزوتوپ‌ها در جریان خوراک برابر  $N_C$  و تعداد کل مراحل آبشار برابر با  $S$  می‌باشد. اطلاعات کامل مربوط به معادلات حاکم بر آبشار مربعی در مرجع [۴] آورده شده است.



شکل ۱. شمایی از یک آبشار مربعی

معادلات (۲) تا (۵) مربوط به موازنه جریان در تمام نقاط تلاقی جریان‌ها می‌باشند. همچنین با استفاده از تعریف برش و معادلات بقای جریان در هر مرحله روابط (۶) و (۷) برقرار خواهند بود. در این روابط  $M_s$ ،  $N_s$  و  $Z_s$  به ترتیب به برش مرحله  $s$ ، نرخ جریان پیش‌رونده، پس‌رونده و نرخ جریان ورودی به مرحله  $s$  اشاره دارند [۵ و ۴]. پارامترهای  $\varepsilon$  و  $\varepsilon'$  نیز به ترتیب بیانگر جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر آبشار مربعی می‌باشند.

$$Z_1 = Z_2 = \dots = Z_S = Z \quad (۱)$$

$$Z = M_{s-1} + N_{s+1}, \quad s \neq s_f \quad (۲)$$

$$Z = M_{s-1} + N_{s+1} + F, \quad s = s_f \quad (۳)$$

$$Z = M_{s-1} + \varepsilon', \quad s = S \quad (۴)$$

$$Z = N_2 + \varepsilon, \quad s = 1 \quad (۵)$$

$$M_s = Z\theta_s \quad (۶)$$

$$N_s = Z(1 - \theta_s) \quad (۷)$$

معادله (۸) مربوط به بقای جرم برای جزء  $i$ ام، در مرحله  $n$ ام می‌باشد.

$$ZZ_{i,s} = M_s y_{i,s} + N_s x_{i,s} \quad (۸)$$

معادلات (۹) تا (۱۲)، رابطه بقای جرم در نقاط اختلاط جریان‌ها را نشان می‌دهد.

$$ZZ_{i,s} = M_{s-1} y_{i,s-1} + N_{s+1} x_{i,s+1} + F Z_{i,F}, \quad s = s_f \quad (۹)$$

$$ZZ_{i,s} = M_{s-1} y_{i,s-1} + N_{s+1} x_{i,s+1}, \quad s \neq s_f \quad (۱۰)$$

$$, \quad s = S Z Z_{i,s} - M_{s-1} y_{i,s-1} - \varepsilon' y_{i,P} = 0 \quad (۱۱)$$

$$, \quad s = 1 Z Z_{i,s} - N_{s+1} x_{i,s+1} - \varepsilon x_{i,W} = 0 \quad (۱۲)$$

رابطه فاکتور جداسازی برای استفاده در آبشار جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی به فرم معادله (۱۳) می‌باشد و با کمک معادله (۱۴) نیز، شرط محدودیت غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام مراحل اعمال می‌شود.

$$\alpha_{ij,s} = \frac{(y_{i,s}/y_{j,s})}{(x_{i,s}/x_{j,s})} = \alpha_{0,s}^{(M_j - M_i)}, \quad (i = j - 1, \quad j = 2, \dots, N_c) \quad (۱۳)$$

$$\sum_{i=1}^{N_c} z_{i,s} = \sum_{i=1}^{N_c} y_{i,s} = \sum_{i=1}^{N_c} z x_{i,s} = 1 \quad (۱۴)$$

### ۳- روش کار

جداسازی اجزاء مختلف خوراک به این ترتیب انجام می‌شود که با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار در هر گام، مرحله ورود خوراک به آبشار، برش آبشار و برش تمام مراحل بهینه می‌شود. جهت محاسبه پارامترهای آبشار نیز ابتدا معادلات جریان مطابق روابط ۱ تا ۷ استفاده می‌شوند. پس از تعیین نرخ جریان‌ها با استفاده از روابط ۸ تا ۱۴ مقدار غلظت ایزوتوپ‌ها قابل محاسبه است.

چگونگی قرار گرفتن هر ایزوتوپ در جریان سبک یا سنگین و تعیین مسیر جداسازی براساس روابط (۱۵) و (۱۶) انجام می‌شود. هنگامی که ایزوتوپ  $k$  در جریان سبک آبشار غنی می‌شود، حداکثر غلظت قابل استحصال در آن از رابطه (۱۵) ارزیابی می‌شود. زمانی که ایزوتوپ  $k$  در جریان پسماند آبشار غنی می‌شود، برای ارزیابی حداکثر غلظت قابل استحصال در آن می‌توان رابطه (۱۶) را مبنا قرار داد [۶].

$$(y_{k,P})_{\lim} = \frac{z_{k,F}}{\sum_{i=1}^k z_{i,F}} \quad (۱۵)$$

$$(x_{k,W})_{\lim} = \frac{z_{k,F}}{\sum_{i=k}^{N_c} z_{i,F}} \quad (16)$$

بر این اساس نیز پارامترهای آبشار برای گام‌های دوم به بعد بهینه‌سازی شده و مسیر جداسازی ایزوتوپ هدف  $k$  در جریان سبک یا سنگین تعیین می‌شود. جهت بهینه‌سازی پارامترهای آبشار مربعی در این کد از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است. در این مقاله به جداسازی ایزوتوپهای اول تا سوم تنگستن تا غنای بیش از ۹۰٪ پرداخته شده و در نهایت نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده است.

#### ۴- نتایج

مشخصات آبشار مربعی مورد بررسی در جدول (۱) آمده است. این آبشار دارای ۲۵ مرحله است و مقدار خوراک بهینه ماشین سانتریفیوژ برابر با ۲۵mg/s در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد ماشین‌های مورد در هر مرحله ۸ می‌باشد.

جدول ۱. پارامترهای اصلی آبشار مربعی برای جداسازی ایزوتوپ‌های زینان

| تعداد ماشین در هر مرحله | نرخ جریان خوراک آبشار | خوراک بهینه ماشین | $\alpha_0$           | تعداد مراحل |
|-------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------|
| ۸                       | mg/s ۱۰               | mg/s ۲۵           | $-0.1229 \times f/5$ | ۲۵          |

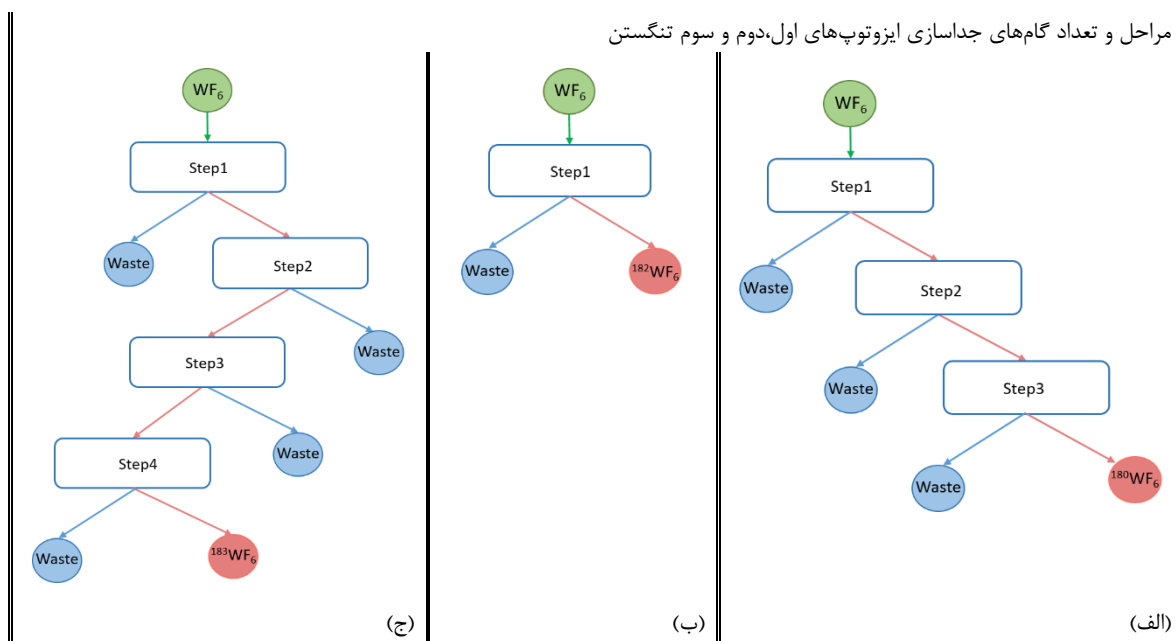
همانطور که از جدول (۲) و شکل (۲) ملاحظه می‌شود، تعداد گام‌های جداسازی به ترتیب برای ایزوتوپ‌های اول تا سوم، سه، یک و چهار می‌باشد. یکی از نتایج مهم این است که علی‌رغم اینکه انتظار بر آن است که ایزوتوپ‌های انتهایی جداسازی راحت‌تری داشته باشند و ایزوتوپ‌های میانی جداسازی سخت‌تر داشته باشند، اما آنها میانی یا انتهایی بودن تاثیر گذار نیست. بلکه غلظت ایزوتوپ هدف در جریان خوراک نیز بسیار حائز اهمیت است. به عنوان مثال ایزوتوپ دوم تنگستن با توجه به اینکه غلظت بسیار بیشتری نسبت به ایزوتوپ اول دارد، به عنوان ایزوتوپ انتهایی عمل کرده و بسیار سریعتر از ایزوتوپ اول به غنای مورد نظر می‌رسد. از طرفی دیگر سخت‌ترین جداسازی مربوط به ایزوتوپ سوم است. همانطور که ملاحظه می‌شود این ایزوتوپ علاوه بر اینکه یک ایزوتوپ میانی است، بلکه در میان ایزوتوپهای دوم و چهارم با غنای بیشتر قرار گرفته است که این مسئله جداسازی را پیچیده‌تر می‌کند. همچنین در مورد ایزوتوپ اول تذکر این نکته لازم است که برخلاف این موضوع که این ایزوتوپ انتهایی است اما غلظت آن در خوراک بسیار کمتر بوده و با توجه به غلظت بسیار بیشتر ایزوتوپ دوم، جداسازی پیچیده‌ای دارد. بنابراین بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد هر اندازه غنای ایزوتوپ در خوراک کمتر شود و یا اینکه ایزوتوپ میانی‌تر باشد علاوه بر پیچیدگی‌های بیشتر جهت جداسازی، تعداد گام‌های بیشتری برای رسیدن به غنای بالا لازم است. ضریب بازیابی نیز به ترتیب برای این سه ایزوتوپ برابر است با ۹۸٪، ۹۲٪ و ۵۸٪ می‌باشد. همچنین اگر مقدار خوراک برابر با ۱۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شود، مقدار جرم محصول به ترتیب برابر با ۱۲۹ گرم، ۲۶/۶ کیلوگرم و ۹ کیلوگرم می‌باشد.

جدول ۲. غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام گام‌های جداسازی ایزوتوپ‌های ۱ و ۲ و ۳ تنگستن

| گام                     | غلظت           | W-180  | W-182  | W-183  | W-184  | W-185  |
|-------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>W-180 Separation</b> |                |        |        |        |        |        |
| گام اول                 | C <sub>P</sub> | ۰/۰۲۴۰ | ۰/۹۶۴۸ | ۰/۰۱۰۵ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰ |
|                         | C <sub>F</sub> | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۲۶۵۰ | ۰/۱۴۳۱ | ۰/۳۰۴۶ | ۰/۲۸۴۳ |
|                         | C <sub>W</sub> | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۲۲۸۲ | ۰/۱۵۰۱ | ۰/۳۲۲۵ | ۰/۲۹۹۳ |
| گام دوم                 | C <sub>P</sub> | ۰/۴۷۴۶ | ۰/۵۲۵۳ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۰ |
|                         | C <sub>F</sub> | ۰/۰۲۴۰ | ۰/۹۶۴۸ | ۰/۰۱۰۵ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰ |
|                         | C <sub>W</sub> | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۹۸۸۰ | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰ |
| گام سوم                 | C <sub>P</sub> | ۰/۹۱۷۷ | ۰/۰۸۲۳ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۰ |
|                         | C <sub>F</sub> | ۰/۴۷۴۶ | ۰/۵۲۵۳ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۰ |
|                         | C <sub>W</sub> | ۰/۰۰۴۱ | ۰/۹۹۵۷ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۰ |
| <b>W-182 Separation</b> |                |        |        |        |        |        |
| گام چهارم               | C <sub>P</sub> | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۱۴۵ | ۰/۰۷۶۸ | ۰/۰۰۴۱ | ۰/۰۰۰۰ |
|                         | C <sub>F</sub> | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۲۶۵۰ | ۰/۱۴۳۱ | ۰/۳۰۶۴ | ۰/۲۸۴۳ |
|                         | C <sub>W</sub> | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۲۹۶ | ۰/۱۶۷۱ | ۰/۴۱۵۹ | ۰/۳۸۷۳ |
| <b>W-183 Separation</b> |                |        |        |        |        |        |
| گام اول                 | C <sub>P</sub> | ۰/۰۰۲۹ | ۰/۶۴۴۳ | ۰/۲۹۴۷ | ۰/۰۵۸۰ | ۰/۰۰۰۱ |
|                         | C <sub>F</sub> | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۲۶۵۰ | ۰/۱۴۳۱ | ۰/۳۰۶۴ | ۰/۲۸۴۳ |
|                         | C <sub>W</sub> | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۱۴ | ۰/۰۳۷۷ | ۰/۴۷۹۰ | ۰/۴۸۱۸ |
| گام دوم                 | C <sub>P</sub> | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۱۹۷ | ۰/۰۷۵۲ | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۰۰۰ |
|                         | C <sub>F</sub> | ۰/۰۰۲۹ | ۰/۶۴۴۳ | ۰/۲۹۴۷ | ۰/۰۵۸۰ | ۰/۰۰۰۱ |
|                         | C <sub>W</sub> | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۱۵۴۶ | ۰/۶۸۴۹ | ۰/۱۶۰۲ | ۰/۰۰۰۳ |
| گام سوم                 | C <sub>P</sub> | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۵۷۳۳ | ۰/۴۲۲۶ | ۰/۰۰۴۰ | ۰/۰۰۰۰ |
|                         | C <sub>F</sub> | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۱۵۴۶ | ۰/۶۸۴۹ | ۰/۱۶۰۲ | ۰/۰۰۰۳ |
|                         | C <sub>W</sub> | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۱۵۰ | ۰/۷۷۲۳ | ۰/۲۱۲۳ | ۰/۰۰۰۴ |
| گام چهارم               | C <sub>P</sub> | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۱۸۳ | ۰/۹۱۰۰ | ۰/۰۷۱۷ | ۰/۰۰۰۰ |
|                         | C <sub>F</sub> | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۱۵۰ | ۰/۷۷۲۳ | ۰/۲۱۲۳ | ۰/۰۰۰۴ |
|                         | C <sub>W</sub> | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۱۴۴۹ | ۰/۸۵۲۸ | ۰/۰۰۲۲ |

جدول ۳. ضریب بازیابی و مقدار محصول برای جداسازی ایزوتوپ‌های ۱ و ۲ و ۳ تنگستن

| ایزوتوپ      | W-180 | W-182  | W-183 |
|--------------|-------|--------|-------|
| ضریب بازیابی | ۹۸٪   | ۹۲٪    | ۵۸٪   |
| مقدار محصول  | gr۱۲۹ | kg۲۶/۶ | kg۹   |



شکل ۲. مراحل جداسازی ایزوتوپ‌های الف (W-180، ب (W-182، ج (W-183

## ۵- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به مقایسه نتایج جداسازی ایزوتوپ‌های اول، دوم و سوم تنگستن با استفاده از آبشار مربعی پرداخته شد. در این راستا از یک آبشار مربعی با ۲۵ مرحله استفاده شد. تعداد دفعات استفاده از آبشار جهت جداسازی ایزوتوپ‌های اول، دوم و سوم تا غنای ۹۱٪ به ترتیب برابر با ۳، ۱ و ۴ گام می‌باشد. همچنین ضریب بازیابی برای ایزوتوپ‌ها به ترتیب برابر با ۹۸٪، ۹۳٪ و ۶۷٪ درصد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر میانی یا انتهایی بودن ایزوتوپ‌ها در خوراک، غلظت آنها نیز بسیار مهم می‌باشد که این امر تعداد دفعات استفاده از آبشار و گام‌های جداسازی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد.

## مراجع

- 1- Ragheb, M., "Isotopic separation and enrichment," University of Illinois Urbana-Champaign Course Materials, 2012.
- 2- L. P. Kholpanov, "Calculation of a Square Cascade with Losses of the Working Material in the Steps and Pipelines during Separation of Multicomponent Isotope Mixtures," Atomic Energy, vol. 104, no. 1, pp. 17-23, 2008.
- 3- S. Villani, Enrichment of Uranium, -: Sprinber-Verlag, N.Y, 1979.
- 4- F. Mansourzadeh, J. Safdari, A. GH. Khamseh, A. Norouzi, "Comparison of optimum tapered cascade and optimal square cascade for separation of xenon isotopes using enhanced TLBO algorithm", Separation Science and Technology, 2018.
- 5- Zeng, S., Chuntong Y., "A method of separating a middle component in multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge cascades," Sep. Sci. Tech., 35(14), 2173, 2000.
- 6- Smirnov, A.Y., Sulaberidze, G. A., "Features of mass transfer of intermediate components in square gas centrifuge cascade for separating multicomponent mixtures," Theo. Found. Chem. Eng., 48(5), 629, 2014.