



## بررسی و مقایسه آبشارهای مخروطی و مربعی شده سه-بخشی در غنی‌سازی ایزوتوپ پایدار $^{130}\text{Te}$

سیده لیلا میرمحمدی<sup>۱</sup>، سجاد خوشه چین<sup>۱\*</sup>، محمد حسن ملاح<sup>۲</sup>، سیدجابر صفدری<sup>۲</sup>، فرزانه اعزازی<sup>۱</sup>

۱. شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران، ایران

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران، ایران

### چکیده:

در این تحقیق برای اولین بار عملکرد دو آبشار با چیدمان مخروطی و مربعی شده سه-بخشی بهینه‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با تابع هدف حداکثر نمودن ظرفیت تولید محصول و راندمان جداسازی برای غنی‌سازی ایزوتوپ پایدار  $^{130}\text{Te}$  تا غنای ۸۵٪ باهم مقایسه شده‌اند. این دو آبشار در شرایط مشابه از قبیل تعداد مراحل، فاکتور جداسازی و تعداد ماشین سانتریفیوژ گازی با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که آبشارهای مخروطی از راندمان جداسازی بالاتری نسبت به آبشار مربعی شده سه-بخشی در غنی‌سازی ایزوتوپ  $^{130}\text{Te}$  برخوردار است توان تولیدی محصول در آن در حدود ۶٪ بیشتر است و زمانی که یک گام جداسازی مورد نیاز باشد استفاده از آنها مناسب‌تر است. اما زمانی که به بیش از یک گام جداسازی نیاز باشد آبشارهای مربعی شده سه-بخشی انعطاف‌پذیری بالاتری در طراحی و سهولت بیشتری در بهره‌برداری برخوردار است و استفاده از آن مناسب‌تر از آبشار مخروطی است.

**کلمات کلیدی:** ایزوتوپ پایدار  $^{130}\text{Te}$ ، آبشار مخروطی، آبشار مربعی شده سه-بخشی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

## Comparison of Tapered and 3-Sections Squared off Cascades in Enriching Stable Isotope $^{130}\text{Te}$

S. L. Mirmohammadi<sup>1</sup>, S. Khooshechin<sup>1\*</sup>, M. H. Mallah<sup>2</sup>, S. J. Safdari<sup>2</sup>, F. Ezazi<sup>1</sup>

1. Iran Advanced Technologies Company, Atomic Energy Organization of Iran, P.O.BOX: 1339-14155., Tehran, Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, P.O.BOX: 1339-14155., Tehran, Iran

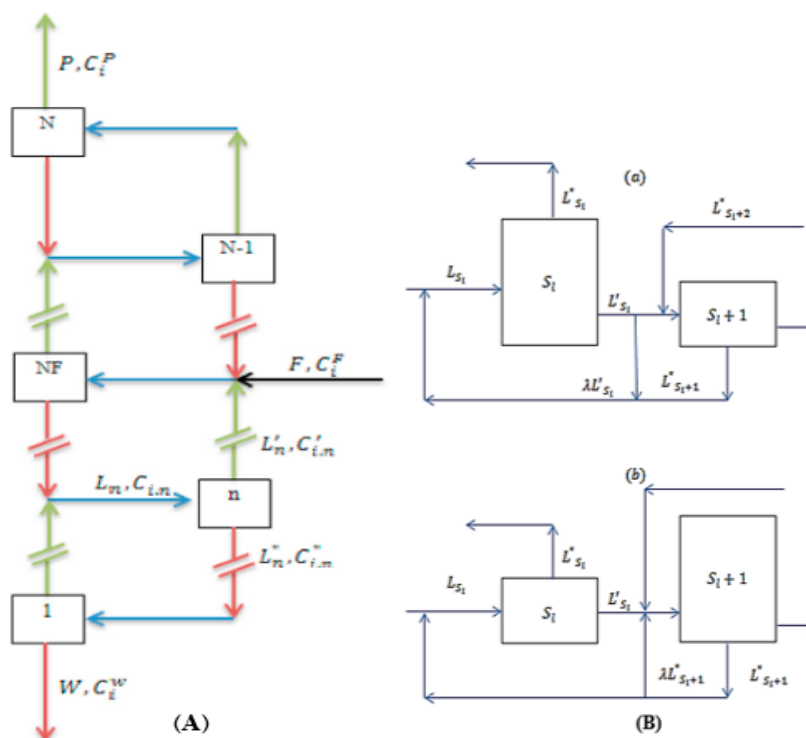
### ABSTRACT

This study comprised the optimized tapered and squared-off cascades for enriching the stable isotope  $^{130}\text{Te}$  by a particle swarm optimization algorithm with objective function such as efficiency and capacity production. The operation of these cascades comprised in the same condition, including the number of stages, the separation factor and the total centrifuge. According to the results the tapered cascade has higher efficiency than the squared-off cascade and production capacity of it is higher about 6%, but the squared off cascade is multi-purpose cascade and more flexible and easier to operate.

**Keywords:** Stable isotope  $^{130}\text{Te}$ , Tapered cascade, the square and squared-off cascade, particle swarm optimization algorithm

## ۱. مقدمه

مجموع تعداد ایزوتوپ‌های پایدار برابر ۲۸۵ ایزوتوپ می‌باشد که بیش از ۱۵۱ از آنها قابلیت جداسازی با استفاده از آبشارهای سانتریفیوژ گازی را دارا می‌باشند [۱]. ایزوتوپ‌های پایدار کاربردهای متنوع و رو به گسترشی در علوم مختلف شامل پزشکی، داروسازی، صنعت، زمین‌شناسی، زیست محیطی و ... دارند. برای نمونه ایزوتوپ‌های پایدار عنصر تلوریوم کاربردهای فراوانی در درمان تیروئید و غدد لنفاوی، انواع تصویربرداری از جمله تصویربرداری گاما، برش نگاری با گسیل پوزیترون و... دارد که از این میان ایزوتوپ  $^{130}\text{Te}$  با تولید رادیو داروی  $^{131}\text{I}$  برای درمان تیروئید، صنایع دارویی و مطالعات واپاشی بتا کاربردهای فراوان دارد [۲]. آبشارها از نظر شکل به دو دسته کلی آبشارهای مخروطی (شکل ۱ (A)) و مربعی تقسیم می‌شوند. آبشارهای مربعی نیز به دو دسته مربعی و مربعی شده تقسیم می‌گردند. آبشارهای مربعی به آبشارهایی گفته می‌شود که در آن‌ها نرخ جریان ورودی به مراحل ثابت و یکسان است. به عبارت دیگر پهنای آبشار در تمام مراحل آبشار ثابت است. یکی از راه‌های ثابت نگاه داشتن نرخ جریان ورودی به مراحل، استفاده از جریان‌های برگشتی  $\varepsilon$  و  $\varepsilon'$  در مراحل ابتدایی و انتهایی آبشار است. به منظور نزدیک کردن آبشارهای مربعی به آبشار ایده‌آل مجموعه‌ای از آبشارهای مربعی را به طور سری به یکدیگر متصل می‌کنند (شکل ۱ (B)). بنابراین هزینه واحد کاهش یافته و همچنین مصرف انرژی واحد نیز به حداقل ممکن می‌رسد. به این آبشار عنوان آبشار مربعی شده اطلاق می‌گردد. واضح است که در این گونه آبشارها، در هر بخش، نرخ جریان ورودی به مراحل ثابت و یکسان بوده و با نرخ جریان ورودی به مراحل در بخش‌های قبل و بعد از آن متفاوت می‌باشد. استفاده از آبشار مربعی شده مقرون به صرفه است، زیرا، بدون اینکه همه مزیت‌های آبشار ایده‌آل به طور کامل از بین برود باعث کاهش هزینه واحد می‌گردد. [۳-۴].



شکل ۱: شماتیکی از یک آبشار مخروطی (A) و مربعی شده (B)

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در مراجع علمی منتشر شده، تا کنون به بحث انتخاب استراتژی جهت جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم به کمک آبشارهای مربعی شده پایا، چه در فاز تئوری و چه در فاز عملیاتی پرداخته نشده است. موارد مطرح شده در مراجع محدود بسیار محدود می‌باشد [۴-۶]. در هیچیک از مراجع، اطلاعات آبشار و نیز نحوه بکارگیری آن به منظور جداسازی، گزارش نگردیده است و همچنین در کلیه موارد مطرح شده، آبشارهای عملیاتی آزمایشی نصب و راه اندازی شده و شبیه‌سازی عملکرد آبشارها به انجام نرسیده است. نکته حائز اهمیت دیگر این است که مدلسازی و تحلیل عملکرد جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم، به دلیل تعداد ایزوتوپ‌های زیاد و گستره وسیع فراوانی طبیعی ایزوتوپ‌های آن،

کار دشواری است و همانطور که گفته شد، در مراجع، به تحلیل عملکرد آبشارهای مخروطی یا مربعی شده تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی مختلف، در جداسازی ایزوتوپ‌های این عنصر پرداخته نشده است. در سال‌های اخیر تمایل زیادی در بین دانشمندان و محققین در بهینه‌سازی مسائل پیچیده به کمک تعدادی از الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت ایجاد شده است. استفاده از این الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی و شبیه‌سازی زنجیره‌های جداسازی مخلوط‌های دو جزئی و چند جزئی روز به روز در حال گسترش است. به عنوان نمونه می‌توان به استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، بازیخت شبیه‌سازی شده، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، کلونی مورچگان و کلونی زنبور عسل مصنوعی اشاره کرد [۷-۱۰]. در این کار تحقیقی برای اولین بار به مقایسه آبشارهای مخروطی و مربعی شده سه-بخشی بر روی عملکرد جداسازی ایزوتوپ  $^{130}\text{Te}$  از غنای خوراک طبیعی تا سطح غنای ۸۵٪ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)<sup>۱</sup> پرداخته شده است.

## ۲. روش کار

هدف از شناخت آبشارها، شبیه‌سازی عملکرد یک آبشار موجود به منظور بهینه‌سازی و رفع عیوب و یا طراحی یک آبشار جدید برای اهداف خاص می‌باشد. روش‌های حل معادلات حاکم بر آبشار غنی‌سازی به یکی از دو روش تحلیلی و یا عددی به کمک زبان برنامه‌نویسی مناسب انجام می‌گیرد. در روش تحلیلی با در نظر گرفتن یک سری فرضیات ساده‌کننده و حل تحلیلی معادلات بر مبنای آن فرضیات، اقدام به طراحی آبشار و استخراج مشخصات آن می‌گردد. از روش عددی در حالت کلی و بدون استفاده از فرضیات ساده‌کننده استفاده می‌گردد. روش عددی به دنبال الگوریتمی می‌باشد که بر اساس آن بتوان یک کد کامپیوتری را به کمک یک زبان برنامه‌نویسی مناسب نوشته و با دادن اطلاعات ورودی به آن و سپس اجرای کد، مشخصات آبشار را به عنوان خروجی دریافت نمود. زبان برنامه‌نویسی مورد استفاده در این پروژه زبان متلب<sup>۲</sup> می‌باشد. در هر دو آبشار تعداد اجزاء مخلوط برابر با  $N_c$  و تعداد مراحل برابر با  $N$  فرض می‌شود. جریان خوراک با دبی  $F$  و غنا  $C_F$  در مرحله  $N_F$  وارد آبشار می‌شود و جریان‌های پسماند و محصول با دبی  $L'_N$  و  $L''_N$  و ترکیب درصدی  $C'_N$  و  $C''_N$  از انتهای آبشار خارج می‌گردند. دبی خوراک، محصول و پسماند مراحل میانی نیز به ترتیب با  $L'_n$  و  $L''_n$  نشان داده می‌شوند.

## ۱/۲. شبیه‌سازی آبشار مخروطی

پارامترهای مجهول آبشار مخروطی جریان‌های ورودی و جریان‌های سبک و سنگین خروجی از مراحل  $(L'_n, L''_n, L_n)$  و غنای مربوط به جریان‌ها  $(C'_{i,n}, C''_{i,n}, C_{i,n})$  است که در مجموع تعداد این مجهولات  $3N_c + 3N$  می‌باشد. از طرفی معادلات آبشار عبارتند از [۳]:

- ✓ معادلات موازنه جرم کلی و جزئی مراحل
- ✓ معادلات موازنه جرم کلی و جزئی گره مراحل
- ✓ معادلات مربوط به فاکتور جداسازی
- ✓ معادلات مربوط به شرط محدودیت کسر جرمی‌ها

که تعداد معادلات حاکم بر یک آبشار مخروطی غنی‌سازی چند جزئی برابر  $3N_c + 2N$  معادله است. با توجه به تعداد مجهولات این آبشار، تعداد  $N$  معادله جهت حل دستگاه معادلات و یافتن مقادیر کلیه مجهولات کم می‌باشد. در روش‌های عددی با استفاده از مدل‌های ارائه شده تعداد  $N$  معادله لازم را تولید کرده و حل دستگاه معادلات را امکان‌پذیر می‌سازد. از جمله مدل‌های ارائه شده می‌توان به مدل‌های تطبیق یافته غلظت  $(X)$ ، تطبیق یافته نسبت فراوانی  $(R)$ ، شبه ایده‌آل، شبه دوجزئی نوع اول، دوم، سوم و ... اشاره کرد. در این تحقیق آبشار مخروطی از نوع آبشار  $R$  در نظر گرفته شده است. در آبشار  $R$  برای دو جزء  $k_1$  و  $k_2$  ( $k_1 < k_2$ ) متناسب با پارامترهای موجود در آبشار جزء  $k_1$  و ایزوتوپ‌های سبکتر از آن در بخش محصول غنی می‌شوند و همچنین جزء  $k_2$  و ایزوتوپ‌های سنگین‌تر از آن در بخش پسماند غنی می‌شوند. در این آبشار شرط انطباقی زیر بین نسبت‌های فراوانی اجزاء  $k_1$  و  $k_2$  در یک نقطه تلاقی در نظر گرفته می‌شود [۱۱]:

$$\beta_{(k_1, k_2)} = \gamma_{(k_1, k_2)} = \sqrt{\alpha_{(k_1, k_2)}} \quad n = (1, N_F, N) \quad (۶)$$

$$R'_{(k_1, k_2), n-1} = R_{(k_1, k_2), n} = R''_{(k_1, k_2), n+1} \quad n \neq (1, N_F, N) \quad (۷)$$

<sup>۱</sup> Particle Swarm Optimization Algorithm

<sup>۲</sup> MATLAB

با برابری تعداد مجهولات و معادلات، توزیع غلظت اجزاء مخلوط نیز از روش تکرار  $q$  به راحتی به دست خواهد آمد [۱۲].

## ۲/۲. شبیه‌سازی آبشار مربعی شده

در این آبشار نرخ جریان ورودی به مراحل در دو بخش مجاور با هم متفاوت است، بنابراین بخشی از جریان بالاسری یا پایین سری مرحله با جریان بزرگتر ( $\lambda$ ) به ورودی همان مرحله برگشت داده می‌شود که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است [۴]. تعداد مجهولات آبشار مربعی شده سه-بخشی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: تعداد مجهولات در هر مرحله و یک آبشار مربعی شده سه-بخشی

ردیف	نام پارامتر	علامت پارامتر	تعداد
۱	شدت جریان سبک مراحل	$L'_n$	$N$
۲	شدت جریان سنگین مراحل	$L''_n$	$N$
۳	شدت جریان محصول سبک	$P$	۱
۴	شدت جریان محصول سنگین	$W$	۱
۵	برش مراحل	$\theta_n$	$N$
۶	برش آبشار	$\theta_{\text{Cascade}}$	۱
۷	کسر جریان بخشی بخش اول و دوم	$\lambda_{2,1}$	۱
۸	کسر جریان بخشی بخش دوم و سوم	$\lambda_{2,3}$	۱
۹	جریان برگشتی ابتدایی	$\varepsilon_1$	۱
۱۰	جریان برگشتی انتهایی	$\varepsilon'_N$	۱
۱۱	غلظت مربوط به جریان ورودی به مراحل	$C_{i,n}$	$NN_c$
۱۲	غلظت مربوط به جریان سبک خروجی از مراحل	$C'_{i,n}$	$NN_c$
۱۳	غلظت مربوط به جریان سنگین خروجی از مراحل	$C''_{i,n}$	$NN_c$
مجموع		$3NN_c + 3N + 7$	

از طرفی معادلات آبشار مربعی شده عبارتند از [۴]:

- ✓ معادلات موازنه جرم کلی و جزئی مراحل و گره‌ها
- ✓ معادله گره ابتدایی و انتهایی آبشار
- ✓ معادله برش آبشار م معادلات برش مراحل
- ✓ معادلات مربوط به فاکتور جداسازی
- ✓ معادلات مربوط به شرط محدودیت کسر جرمی‌ها

که تعداد این معادلات در مجموع برابر است با  $3NN_c + 3N + 3$ . با توجه به اختلاف چهار بین مجهولات و معادلات مربوط به جریان چهار پارامتر شامل کسر جریان‌های برگشتی میان بخشی، برش آبشار و برش مرحله اول به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود. در ادامه مشابه آبشار مخروطی توزیع غلظت اجزاء نیز از روش تکرار  $q$  به راحتی به دست خواهد آمد [۱۲].

## ۳/۲. بهینه‌سازی آبشارها

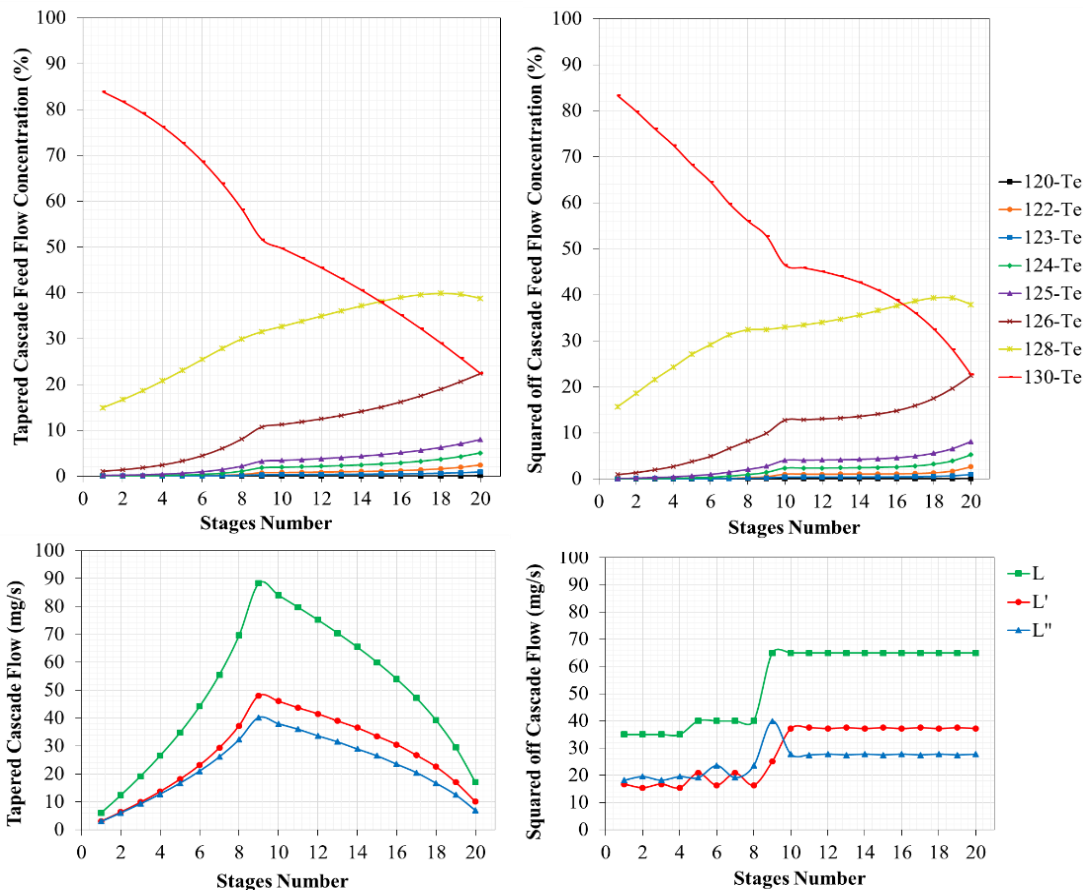
یکی از روش‌های بهینه‌سازی پارامترها استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری می‌باشد که هر روزه بر طیف آنها افزوده می‌شود. مزیت استفاده از این روش بررسی احتمالی همه سطوح به صورت پیوسته و عیب آن به دام افتادن احتمالی در نقاط بهینه محلی می‌باشد. از جمله معیارهای انتخاب الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توان به سازگاری با ساختار مساله (گسسته یا پیوسته بودن پارامترها)، اجتناب از به دام افتادن در نقاط بهینه محلی، سرعت همگرایی و در نهایت حداکثر کمینه یا بیشینه نمودن مقدار تابع هدف می‌باشد. در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی PSO که نخستین بار توسط آلبرت و کندی در سال ۱۹۹۵ ارائه گردید، استفاده شده است که نتایج حاصل از آن معیارهای انتخاب الگوریتم را برآورده می‌نماید [۱۳].

#### ۴. نتایج

در هر دو آبشار مخروطی و مربعی شده تعداد مراحل ( $N$ )، تعداد ماشین‌ها و فاکتور جداسازی اختلاف جرم واحد ( $\alpha_0$ ) جزء معلومات مسئله می‌باشند. که مقادیر این پارامترها به ترتیب برابر 20 مرحله، 160 سانتریفیوژ و  $1.243F_{single}^{-0.051}$  است که  $F_{single}$  خوراک ورودی به سانتریفیوژ است. لازم به ذکر است که در این کار تحقیقی برای آبشار مخروطی شدت جریان خوراک آبشار و مرحله ورود خوراک و علاوه بر این دو پارامتر برای آبشار مربعی شده مقادیر برش مرحله اول، برش آبشار و کسر جریان برگشتی بین بخش‌ها نیز به‌عنوان ورودی‌های متغیر آبشار جهت بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. خروجی آبشار مخروطی و مربعی شده بهینه مطابق جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است تعداد مراحل و سانتریفیوژها در آبشار مخروطی و مربعی شده ثابت و به ترتیب برابر ۲۰ مرحله و ۱۶۰ سانتریفیوژ در نظر گرفته شد.

جدول ۲: خروجی بهینه‌سازی آبشار مخروطی R و مربعی شده سه-بخشی

No	Parameters Name	Squared off Cascade Parameters Value	Tapered Cascade Parameters Value
1	(mg/s)Feed	12.30	13.00
2	$N_F$	10	9
3	$N$	20	20
4	$N_1$	4	-
5	$N_2$	4	-
6	$N_3$	12	-
7	(mg/s) $L_1$	35.00	-
8	(mg/s) $L_2$	40.00	-
9	(mg/s) $L_3$	65.00	-
10	$\theta_{cascade}$	0.780	0.773
11	$\theta_1$	0.480	0.511
12	$\lambda_{1,2}$	0.050	-
13	$\lambda_{2,3}$	0.520	-
14	$\sum L$	1080	978.27
15	Product	2.706	2.960
16	Concentration of $^{130}\text{Xe}$ (%)	85.10	85.66
17	Recovery (%)	54.94	57.13



شکل ۱: نمودار توزیع غلظت جریان خوراک ورودی به مراحل و شدت جریان‌ها در آبشار مخروطی و مربعی شده

یکی از معیارهای آبشار برای کارایی بالاتر حداقل مجموع جریان‌های میان مرحله‌ای است، در نتیجه از جدول ۲ مشاهده می‌شود که آبشار مخروطی با داشتن مجموع شدت جریان‌های میان مرحله‌ای کمتر هم از نظر غلظت، ظرفیت تولید و مصزف خوراک در شرایط مساعدتری نسبت به آبشار مربعی شده دارد. اما همانطور که مشهود است که آبشار مربعی شده در شرایط تقریباً مشابه راندمان مناسب و قابل قیاس (۵۴/۹۴٪) در مقابل آبشار مخروطی (۵۷/۱۳٪) دارد. در صنعت نیز برای جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزئی آبشار مربعی شده نتیجه بسیار خوبی حاصل کرده است. از طرفی به دلیل توان جدایش محدود سانتریفیوژها برای غنی‌سازی اکثر ایزوتوپ‌ها تا غنای بالا به چند گام جداسازی نیاز است. برای سهولت بهره‌برداری لازم است آبشارهای مورد استفاده در هر گام به لحاظ چیدمان و آرایش سانتریفیوژهای گازی یکسان باشند.

## ۵. نتیجه‌گیری

آبشار مربعی شده با راندمان ۵۴/۹۴٪ نشان داد که کارایی مناسبی در مقابل آبشار مخروطی با راندمان ۵۷/۱۳٪ دارد. سهولت بهره‌برداری آبشارهای مربعی شده بسیار بالاتر از آبشارهای مخروطی می‌باشد بالاخص در زمانیکه به چند گام جداسازی برای ایزوتوپ‌ها مورد نیاز باشد. زیرا می‌توان یک چیدمان و آرایش سانتریفیوژهای گازی یکسان از آبشار مربعی شده را در هر گام و یا حتی برای ایزوتوپ‌های مختلف استفاده کرد. بنابراین با احداث یک زیرساخت واحد امکان غنی‌سازی ایزوتوپ‌های چندجزئی تا هر غنایی توسط آبشار مربعی شده وجود دارد. از این رو آبشار مربعی شده آبشاری انعطاف پذیر با راندمان مناسب است که عملکردی مابین آبشار مخروطی با راندمان بالا و آبشار مربعی انعطاف پذیر دارد.



### مراجع

- [۱]. A. Apelblat and Y. Lehrer, *The Theory of a Real Isotope Enriching Cascade*, J. Nuc. Energy 22, 1-14 (1968).
- [۲]. Global-Operations URENCO-Stable-Isotopes/Products/Element/Tellurium, <https://www.urengo.com>
- [۳]. Benedict, M., Pigford, T. H., and Levi, H. W., *Nuclear chemical engineering*. McGraw-Hill Education, (1981)
- [۴]. Kholpanov, L. P., *On the Calculation of a Squared-off Cascade for Multicomponent Isotope Separation*, Chem. Eng. Proc., vol. 37, (1998).
- [۵]. Sosnin, L.Y., Tcheltsov, A.N., Kuchelev, A.P., Remin, G.V., Hobotov, A.A., *Centrifugal Extraction of Highly Enriched  $^{120}\text{Te}$  and  $^{122}\text{Te}$  Using the Non-Steady State Method of Separation*, 480 36-39, (2002).
- [۶]. Sosnin, L.Y., Tcheltsov, A.N., *Centrifugal Extraction of Highly Enriched  $^{123}\text{Te}$  for the Production of  $^{123}\text{I}$  at a Cyclotron*, 438 14-19, (1999).
- [۷]. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P., *Optimization by Simulated Annealing*, Sci., 220, pp. 671-680, (1983)
- [۸]. Song, T., Zeng, S., Sulaberidze, G., Borisevich, V., Xie, Q., *Comparative Study of the Model and Optimum Cascades for Multicomponent Isotope Separation*. Sep. Sci. Tech., 45, pp. 2113-2118, (2010).
- [۹]. Safdari, J., Norouzi, A., Tumari, R., *Using A Real Coded PSO Algorithm in the Design of a Multi-Component Countercurrent Cascade*, Sep. Sci. Tech., 52(18), pp. 2855-2862, (2017).
- [۱۰]. Ezazi, F., Mallah, M. H., Karimi Sabet, J., Norouzi, A. and Mahmoudian, A., *Investigation on the Net Cascade Using Ant Colony Optimization Algorithm*. Prog. Nucl. Energy, 103169, (2020).
- [۱۱]. Zeng, S., Cheng, L., Jiang, D., Borisevich, V.D., Sulaberidze, G.A., *A Numerical Method of Cascade Analysis and Design for Multi-Component Isotope Separation*, Chem. Eng. Res. Des. 92, 2649-2658, (2017).
- [۱۲]. Zeng, S. and Ying, C., *A Robust and Efficient Calculation Procedure for Determining Concentration Distribution of Multicomponent Mixtures*, J. Sep. Sci. Technol., (4), p. 613, (2000).
- [۱۳]. Elbert, R., Kennedy, J., *A new Optimizer Using Particle Swarm Theory*, in: proceeding of sixth international symposium on micro machine and human science 39-43, (1995)