



## استفاده از راهبردهای جدید جهت تولید اورانیم غنی شده از اورانیم طبیعی برای سوخت یک رآکتور تحقیقاتی

سیده‌لیلا میرمحمدی<sup>ID</sup>، سیدجابر صفدری<sup>ID</sup>، محمدحسن ملاح<sup>ID</sup>

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران

\*Email: lmirmohammadi@aeoi.org.ir

### مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۶ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۳/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۳/۹

### چکیده

هدف اصلی این مقاله تولید اورانیم با غنای ۲۰٪ برای سوخت رآکتورهای تحقیقاتی به صورت مستقیم از اورانیم طبیعی با پسماند  $xw \leq 0.3\%$  از طریق یک آشبار است. برای این کار از پنج راهبرد شامل استفاده از تک آشبارهای بهینه‌شده مخروطی، مربعی، مربعی‌شده ۲-بخشی، مربعی‌شده ۳-بخشی و مربعی‌شده ۴-بخشی استفاده شده است. برای طراحی و بهینه‌سازی آشبارها پنج کد نرم‌افزاری "STC-PSOA"، "SQC-PSOA"، "2SQC-PSOA"، "3SQC-PSOA" و "4SQC-PSOA" توسعه داده شده‌اند و از الگوریتم بهینه‌سازی PSO برای بهینه‌سازی آنها استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد (۱) در راهبرد اول امکان تولید محصول با غنای ۲۰٪ با یک چیدمان واحد و یک گام وجود ندارد و حداکثر غنای محصول ۳٫۷۳ درصد خواهد بود؛ (۲) در چهار راهبرد دیگر امکان تولید محصول ۲۰٪ با یک چیدمان واحد در دو گام جداسازی وجود دارد. (۳) راهبرد استفاده از آشبارهای مربعی‌شده ۴ بخشی در یک زمان مشخص، میزان تولید محصول نسبت به آشبارهای مربعی و مربعی‌شده ۲-بخشی و ۳-بخشی در حدود ۱۱٫۱٪، ۳٫۱٪ و ۱٫۰ درصد بیشتر است.

**کلیدواژه‌ها:** آشبارهای مخروطی بهینه، آشبارهای مربعی بهینه، آشبارهای مربعی‌شده بهینه، سوخت رآکتورهای تحقیقاتی، الگوریتم بهینه‌سازی PSO

## Using new strategies to produce enriched uranium from natural uranium for research reactors fuel

S.L. Mirmohammadi\*, S.J. Safdari, M.H. Mallah

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran

### Research Article

Received: 25.2.2024, Revised: 26.5.2024, Accepted: 29.5.2024

### Abstract

This paper aims to produce uranium with 20% enrichment for research reactor fuel directly from natural uranium with waste  $xw \leq 0.3\%$  through a cascade. This purpose has utilized five strategies, including single-optimized tapered, square, 2-section squared-off, 3-section squared-off, and 4-section squared-off cascades. To design and optimize the cascades, five software codes, "STC-PSOA," "SQC-PSOA," "2SQC-PSOA," "3SQC-PSOA," and "4SQC-PSOA," have been developed, with the PSO optimization algorithm employed for optimization. In the first strategy, it is not possible to achieve uranium with a 20% enrichment level using one arrangement and one step. The maximum product enrichment level attainable is 3.73%. However, in the other four strategies, uranium with a 20% enrichment level can be produced in two separation steps with a single arrangement. Notably, when employing the strategy of using 4-section squared-off cascades, the product production is 11.1%, 3.1%, and 1.0% higher compared to square, 2-section, and 3-section squared-off cascades, respectively.

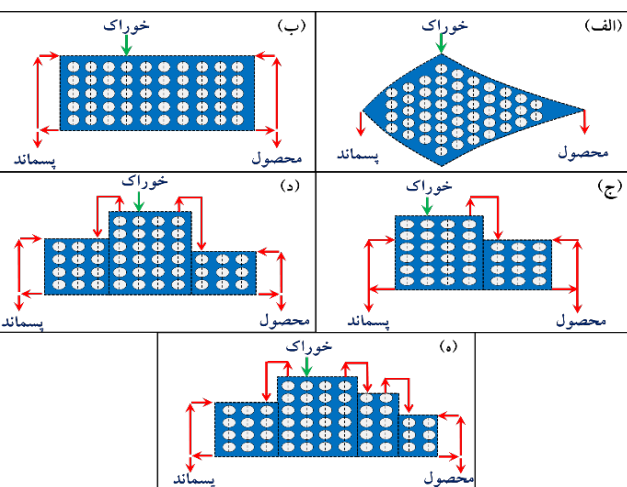
**Keywords:** Optimized tapered cascades, Optimized square cascades, Optimized squared-off cascades, Fuel of research reactors, Particle swarm optimization algorithm (PSO)



## ۱. مقدمه

تاکنون رآکتورهای تحقیقاتی به عنوان یکی از اصلی‌ترین چشمه‌های تولید نوترون و ذرات پرانرژی در جهان شناخته می‌شوند که دارای کاربردهای متنوع و فراوانی می‌باشند. غنای اورانیم مورد استفاده در سوخت رآکتورهای تحقیقاتی نسبت به رآکتورهای قدرت بالاست و در سال‌های اخیر معمولاً از اورانیم با غنای حدود ۲۰٪ برای آنها استفاده می‌شود. اورانیم با غنای ۲۰٪ نسبت به اورانیم با غناهای پایین (کمتر از ۵ درصد) باعث می‌شود بتوان هسته‌های فشرده، با شار نوترون بالا ساخت و همچنین زمان بین سوخت‌گیری را افزایش داد [۱].

روش‌های مختلفی برای غنی‌سازی اورانیم وجود دارد یکی از این روش‌ها که در حاضر به صورت صنعتی استفاده می‌شود، روش سانتریفیوژ گازی است. در غنی‌سازی به روش سانتریفیوژ از مجموعه‌ای از ماشین‌های سانتریفیوژ بنام آبشار استفاده می‌شود. هر آبشار از چند مرحله تشکیل شده است. در هر مرحله اتصال ماشین‌ها به صورت موازی است و اتصال مراحل به صورت سری است. آبشارهای مورد استفاده برای جداسازی ایزوتوپی برحسب نوع چیدمان ماشین‌ها به سه دسته مخروطی، مربعی و مربعی‌شده مطابق شکل ۱ تقسیم‌بندی می‌شوند. آبشارهای مخروطی به دلیل راندمان بالای جداسازی و آبشارهای مربعی به دلیل انعطاف‌پذیر بودن در بهره‌برداری مورد توجه می‌باشند. اما هریک از این نوع آبشارها دارای نقاط ضعفی هستند به صورتی که آبشارهای مخروطی از انعطاف بالای بهره‌برداری برخوردار نبوده و راندمان آبشارهای مربعی نیز پایین است [۲-۶]. از این رو آبشارهای مربعی‌شده با راندمانی مابین آبشارهای مخروطی و مربعی دارند توسعه یافته‌اند [۷-۱۰]. به عبارت دیگر آبشار مربعی‌شده، یک نوع آبشار است که هم مزایای آبشار مخروطی را دارد و هم مزایای آبشار مربعی. اگر یک آبشار مخروطی به چند آبشار مربعی (بخش) با اندازه‌های مختلف با اتصال سری تبدیل شود (در هر بخش نرخ خوراک ورودی به همه مراحل آن ثابت و یکسان است)، یک آبشار مربعی‌شده حاصل می‌شود و این نوع آبشارها در عمل به صورت آبشارهای مربعی‌شده، ۲-بخشی، ۳-بخشی، ۴-بخشی و ... استفاده می‌شوند [۷-۱۰]. در طراحی و بهره‌برداری از یک آبشار سانتریفیوژ برای کاهش هزینه‌ها، بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی آبشار از اهمیت بالایی برخوردار است [۷-۱۱]. علی‌رغم وجود روش‌های بهینه‌سازی سنتی، روش‌هایی بنام فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت وجود دارد که فضای جستجوی آن جامع است. الگوریتم‌های فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت در دهه‌های گذشته ارائه شده‌اند که برای بهینه‌سازی بسیاری از مسائل استفاده شده است. برای نمونه می‌توان به شبیه‌سازی متقاطع و جهش ژن‌های کروموزوم در تکامل بیولوژیکی با

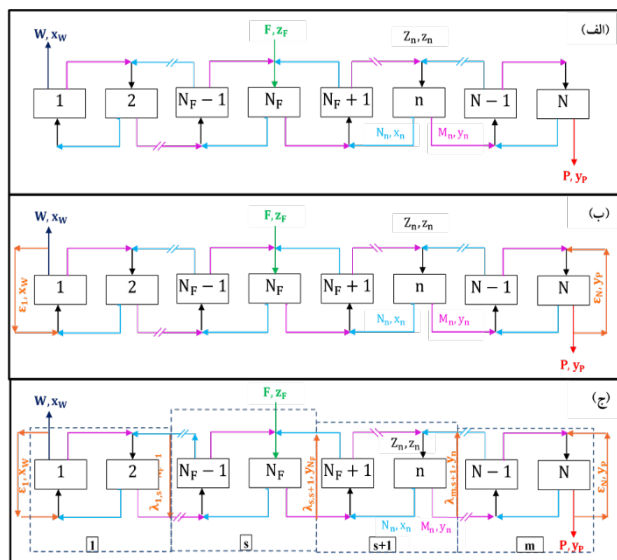


شکل ۱. نمایی از چیدمان سانتریفیوژها در آبشارهای مخروطی (الف)، مربعی (ب)، مربعی‌شده ۲-بخشی (ج)، مربعی‌شده ۳-بخشی (د) و مربعی‌شده ۴-بخشی (ه).

الگوریتم ژنتیک (GA) (گلدبرگ و هالند)، تکامل دیفرانسیل (DE) (استورن و پرایس)، بهینه‌سازی رفتار ازدحام ذرات مانند ماهی یا پرندگان در طبیعت (PSO) (ابرهات و کندی)، مستعمره زنبورهای مصنوعی (ABC) که مبتنی بر رفتار جستجوی هوشمندانه ازدحام زنبور عسل است (بوسترک و کارابوگا)، الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) مبتنی بر رفتار چشم‌ک‌زن کرم شب‌تاب (یانگ)، بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) که فرایند آموزش و یادگیری تعاملی گروه‌ها را شبیه‌سازی می‌کند (رائو و همکاران)، بهینه‌سازی پروانه موناک (MBO) براساس مهاجرت پروانه‌های موناک (وانگ و همکاران)، الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) بر پایه تعامل اجتماعی نهنگ‌های گوژپشت (میرجلیلی و لوئیس)، بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) با الهام از رفتار رهبری و مکانیسم منحصر به فرد شکار گرگ‌های خاکستری (کوهلی و آرورا) و بهینه‌سازی رفتار گروهی ملخ‌ها (GOA) (صارمی) و ... اشاره کرد [۱۲-۱۹].

در بهینه‌سازی آبشارها، بسیاری از محققان از این الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده کرده‌اند. برای نمونه نوروزی و همکاران پارامترهای بهینه یک آبشار جریان برگشتی از قبیل  $\alpha$ ،  $\theta$  و  $f$  را با الگوریتم GA به دست آوردند [۲۰]. صفدری و همکاران، یک الگوریتم PSO کدگذاری شده با نام (RCPSO) را برای طراحی یک آبشار بهینه، با نسبت حداکثر کار جداسازی به تعداد سانتریفیوژها و سایر محدودیت‌های اضافی به عنوان تابع هدف، توسعه دادند [۱۱]. میرمحمدی و همکاران نیز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO پارامترهای آبشار مربعی‌شده را جهت جداسازی ایزوتوپ‌های زنون و آبشارهای مخروطی و مربعی و مربعی‌شده را برای غنی‌سازی اورانیم استفاده کردند [۶-۸].





شکل ۲. نمایی از مراحل و جریانهای آبشارهای مخروطی (الف)، مربعی (ب) مربعی شده  $m$  بخشی (ج).

برای آبشارهای مخروطی متقارن، مربعی و مربعی شده معادلات حاکم شامل معادلات موازنه کلی و جزئی جرم برای مراحل و نقاط گره، معادله برش مراحل، معادله برش آبشار، معادله فاکتور جداسازی مراحل و معادلات حاصل از محدودیت‌های تعیین شده برای غلظت اجزاء در جریانهای خروجی از آبشار هستند. مجهولات شامل نرخ جریانهای ورودی و خروجی مراحل و نقاط گره، غلظت اجزاء تشکیل دهنده در جریانهای ورودی و خروجی مراحل و نقاط گره، برش مراحل، برش آبشار، نرخ جریانهای محصول و پسماند آبشار و غلظت اجزاء تشکیل دهنده آنها و نسبت جریانهای برگشتی در آبشارهای مربعی و مربعی شده هستند. تعداد معادلات حاکم و مجهولات برای این سه نوع آبشار به صورت زیر بیان می‌شوند:

(۱) برای یک آبشار مخروطی، تعداد معادلات و مجهولات به ترتیب معادل " $9N+3$ " معادله و " $10N+3$ " مجهول است (تعداد مجهولات  $N$  عدد بیشتر از معادلات است) و برای حل دستگاه معادلات،  $N$  مجهول باید حدس زده شود و معمولاً برای حل دستگاه معادلات مقادیر برش مراحل فرض می‌شوند. با حدس اولیه مقدار برش مراحل و حل دستگاه معادلات در یک حلقه تکرار، مقادیر حدس زده شده اصلاح خواهند شد؛ (۲) برای یک آبشار مربعی، تعداد معادلات و مجهولات به ترتیب معادل " $9N+3$ " معادله و " $9N+5$ " مجهول است (تعداد مجهولات، ۲ عدد بیشتر از معادلات است) و برای حل دستگاه معادلات، ۲ مجهول باید حدس زده شود؛ (۳) برای یک آبشار مربعی شده  $m$ -بخشی، تعداد معادلات معادل " $9N+3$ " معادله و تعداد مجهولات آن معادل " $9N+4+m$ " مجهول است و از این تعداد

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology  
Vol. 46 (1), Serial Number 111, 2025, P 96-105

هدف اصلی این مقاله، استفاده از چند راهبرد جهت تولید مستقیم محصول غنی شده با غنای ۲۰٪ و محصول تهی شده با غنای کمتر از ۰٫۳٪ ( $X_W < 0.003$ ) از اورانیم طبیعی و مقایسه عملکرد آنها با هم است. در این تحقیق با استفاده از ۲۰۰ سانتیفریوژ از یک نوع و با فاکتور جداسازی متغیر (تابعی از خوراک و برش سانتیفریوژ) از ۵ راهبرد استفاده شده است و در هر راهبرد از یک نوع آبشار از بین آبشارهای نوع مخروطی، مربعی، مربعی شده‌های ۲-بخشی، ۳-بخشی و ۴-بخشی استفاده شده است. برای طراحی و بهینه‌سازی آبشارهای استفاده شده در هر راهبرد با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی PSO، پنج کد محاسباتی به ترتیب با نام "STC-PSOA" و "SQC-PSOA"، "۲SQC-PSOA"، "۳SQC-PSOA" و "۴SQC-PSOA" توسعه داده شده است. پارامترهای بهینه‌شده توسط این کدهای نرم‌افزاری برای آبشار مخروطی نرخ خوراک ورودی به آبشار و برش مراحل است؛ برای آبشارهای مربعی و مربعی شده، نرخ خوراک ورودی به آبشار و مرحله و ورود آن، نرخ خوراک ورودی به هر مرحله، برش مرحله اول، برش آبشار و کسرهای جریان برگشتی هستند [۶-۸]. بعد از انتخاب یک تابع هدف مناسب برای بهینه‌سازی، سطح غنی‌سازی اورانیم در سوخت رآکتورهای تحقیقاتی (اورانیم با غنای  $Y_P = 0.20$ ) و غنای جریان پسماند ( $X_W < 0.003$ ) به عنوان قیود تابع هدف در نظر گرفته می‌شوند [۱].

## ۲. مدل‌سازی و شبیه‌سازی آبشارها

شکل ۲ نمایی از جریانهای ورودی و خروجی از مراحل و نقاط گره آبشارهای مخروطی متقارن با جریان برگشتی، مربعی و مربعی شده را نشان می‌دهد. در این آبشارها  $F$  نرخ خوراک ورودی به آبشار با غنای  $Z_F$  بوده و نرخ جریان محصول و پسماند به ترتیب با نمادهای  $P$  و  $W$  و غنای  $Y_P$  و  $X_W$  نشان داده می‌شود.  $Z_n$ ،  $M_n$  و  $N_n$  نیز به ترتیب نرخ جریان خوراک، جریان محصول و پسماند هر مرحله با غناهای  $Z_n$ ،  $Y_n$  و  $X_n$  می‌باشند. همچنین کسر جریانهای برگشتی به مرحله ۱ و  $n$  آبشار مربعی و مربعی شده به ترتیب با نمادهای  $\varepsilon_1$  و  $\varepsilon_N$  نشان داده می‌شوند [۶-۱۰].



#### ۴. روش کار

در این کار برای غنی‌سازی اورانیم تا غنای ۲۰٪ از پنج راهبرد با استفاده از آبشارهای مخروطی، مربعی، مربعی‌شده ۲-بخشی، ۳-بخشی و ۴-بخشی استفاده می‌شود و در شرایطی یکسان عملکرد آبشارها مقایسه می‌شوند. روش کار از مراحل زیر تشکیل شده است:

##### • مرحله اول: انتخاب نوع و تعداد ماشین‌های

سانتریفیوژ در آبشار: در این مرحله برای تحلیل عملکرد آبشارهای مخروطی، مربعی، مربعی‌شده ۲-بخشی، ۳-بخشی و ۴-بخشی از یک نوع ماشین سانتریفیوژ گازی با مشخصات رابطه ۲ به تعداد ۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ استفاده می‌شود. مشخصات فرضی این سانتریفیوژ توسط بوریسویچ و همکاران ارائه شده است که دارای برش مراحل و توان جداسازی بهینه به ترتیب در حدود ۰/۴۴ و ۶/۶۸ کیلوگرم سو بر سال است [۲۲]. همچنین خوراک بهینه این ماشین سانتریفیوژ در حدود ۱۱۸/۸ گرم بر ساعت است [۲۲].

$$\alpha(f, \theta) = e^{(-0.157)(f + 13.790)} e^{(0.895 - 0.253\theta_1 - 0.246\theta_2)} \quad (2)$$

##### • مرحله دوم: مشخص نمودن متغیرهای ورودی و ثابت

جهت طراحی آبشارهای هر راهبرد: در این مرحله متغیرهای ثابت و مشترک برای طراحی و بهینه‌سازی آبشارهای مخروطی، مربعی، مربعی‌شده ۲-بخشی، ۳-بخشی و ۴-بخشی باید تعیین شوند. این ورودی‌ها شامل غنای خوراک آبشار، جرم مولی ایزوتوپ‌ها و محدوده خوراک ورودی به ماشین‌های سانتریفیوژ که به صورت  $0.5 F_{\text{Single}}(\text{Opt}) < F_{\text{Single}} < 1.5 F_{\text{Single}}(\text{Opt})$  در نظر گرفته شده است.

##### • مرحله سوم: طراحی و بهینه‌سازی آبشار مخروطی: در

این مرحله آبشارهای مخروطی، با در نظر گرفتن قیود مسئله (غنای محصول و پسماند) طراحی و بهینه‌سازی می‌شوند. پارامترهایی که در این گام لازم است مقدار آنها بهینه شود شامل نرخ جریان خوراک و برش مراحل است.

##### • مرحله چهارم: طراحی و بهینه‌سازی آبشارهای مربعی

و مربعی‌شده: بعد از طراحی و بهینه‌سازی آبشار مخروطی چیدمان آبشارهای مربعی و مربعی‌شده از روی چیدمان و مجموع نرخ جریان بین مراحل آبشار مخروطی تعیین می‌شود و سپس بهینه می‌شوند. چیدمان بهینه برای آبشار مربعی و مربعی‌شده، آبشاری است که تعداد مراحل و مساحت زیر منحنی آن (مجموع جریان‌های بین مراحل

مجهول تعداد "m-۱" مجهول آن ناشی از کسر جریان‌های برگشتی بین بخش‌ها است (تعداد مجهولات m+۱ عدد بیشتر از معادلات است) و برای حل دستگاه معادلات حاکم، m+۱ مجهول باید حدس زده شود.

از آنجایی که مقادیر فرض شده برای متغیرهای اضافی دستگاه معادلات حاکم، به صورت مستقیم بر سایر متغیرهای آبشار تأثیرگذار است لازم است در کنار سایر متغیرهای آبشار مخروطی، مربعی و مربعی‌شده، بهینه شوند. معادلات مربوط به نرخ جریان‌ها در یک آبشار از نوع خطی است که به راحتی قابل حل است. اما معادلات مربوط به غلظت آبشارها از نوع غیرخطی است که به منظور حل آن می‌توان از تکنیک تکرار q که اولین بار توسط زنگ و همکاران ارائه گردید استفاده نمود [۲۱].

#### ۳. بهینه‌سازی آبشارها

برای بهینه‌سازی آبشارها از الگوریتم PSO استفاده شده است. این الگوریتم، توسط جیمز کندی و راسل سی ابرهات در سال ۱۹۹۵ معرفی گردید. در این الگوریتم با الگوگیری و شبیه‌سازی رفتار پرواز دسته‌جمعی (گروهی) پرندگان یا حرکت دسته‌جمعی (گروهی) ماهی‌ها بنا نهاده شده است [۲۱]. با تغییر پارامترهای ورودی نتایج مختلفی برای یک آبشار حاصل می‌گردد که برای مقایسه و تعیین جواب بهینه انتخاب یک تابع هدف وابسته به طبیعت مسئله امری ضروری است. تابع هدف عملکرد متغیرهای ورودی را مورد سنجش قرار می‌دهد و سبب می‌شود الگوریتم بهینه‌سازی بهترین مقادیر را برای پارامترها انتخاب نماید تابع هدف مورد استفاده در این پژوهش به فرم رابطه ۱ است:

$$f(P, W, F, SWU) = c_1 \frac{P}{F} + c_2 \frac{F}{W} + c_3 SWU \quad (1)$$

که در این رابطه  $c_1$ ،  $c_2$  و  $c_3$  ضرایب وزنی مرتبط با آیت‌های تابع هدف هستند. همچنین غنای ۲۰٪ در جریان محصول و غنای از ۰/۳٪ در جریان پسماند به‌عنوان قیود در الگوریتم استفاده شده‌اند. در این راستا، کدهای نرم‌افزاری "STC-PSOA"، "SQC-PSOA"، "۲SQC-PSOA"، "۳SQC-PSOA" و "۴SQC-PSOA" به ترتیب برای بهینه‌سازی پارامترهای آبشارهای مخروطی، مربعی، مربعی‌شده ۲-بخشی، ۳-بخشی و ۴-بخشی براساس تابع هدف فوق‌الذکر توسعه داده شده‌اند.



**جدول ۱.** نتایج غنی‌سازی اورانیم با آبشار مخروطی بهینه متشکل از ۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ.

|                                                     |        |
|-----------------------------------------------------|--------|
| شماره گام                                           | ۱      |
| تعداد مراحل                                         | ۲۲     |
| نرخ خوراک ( $\text{ghr}^{-1}$ )                     | ۲۵۵٫۶  |
| مرحله ورود خوراک                                    | ۸      |
| برش آبشار                                           | ۰٫۱۲۲۴ |
| برش مرحله اول                                       | ۰٫۴۰   |
| غنای محصول (%)                                      | ۳٫۷۳   |
| غنای پسماند (%)                                     | ۰٫۲۹   |
| متوسط خوراک ورودی سانتریفیوژ ( $\text{g hr}^{-1}$ ) | ۱۱۹٫۹  |
| ظرفیت جداسازی سانتریفیوژ ( $\text{kg Uyr}^{-1}$ )   | ۶٫۶۶   |

از آنجایی که در گام دوم مقدار نرخ خوراک ورودی به سانتریفیوژهای مراحل ابتدایی بسیار پایین است و در محدوده نرخ خوراک مجاز نمی‌باشد، ادامه غنی‌سازی با غنای بالای ۳٫۷۳٪ با آبشار مذکور غیرممکن است و در نتیجه تولید اورانیم با غنای ۲۰٪ با استفاده از آبشارهای مخروطی با یک چیدمان واحد و چند گام امکان‌پذیر نیست.

**۲.۵.** راهبرد استفاده از آبشارهای مربعی با چند گام جهت تولید اورانیم با غنای ۲۰٪

یکی از مزایای آبشار مربعی نسبت به آبشارهای مخروطی قابلیت انعطاف‌پذیری آنها است که باعث می‌گردد آبشار مربعی بتواند عملکرد مناسبی در محدوده وسیعی از خوراک‌های ورودی به سانتریفیوژ داشته باشد. بنابراین در راهبرد دوم از آبشارهای مربعی برای غنی‌سازی اورانیم استفاده شده است. لازم است مجموع جریان‌های میان‌مرحله‌ای آبشار مربعی برابر مجموع جریان‌های میان‌مرحله‌ای آبشار مخروطی در نظر گرفته شود تا راندمان آبشار مربعی با کمترین انحراف از آبشار مخروطی حاصل گردد. در شکل ۴ و جدول ۲ بهترین آبشار مربعی با ۲۲ مرحله و ۱۹۸ ماشین سانتریفیوژ نشان داده شده است. مطابق نتایج نشان داده شده در جدول ۲، آبشار مربعی طی دو گام قادر به تولید اورانیم با غنای ۲۰٪ می‌باشد.

آن) با آبشار مخروطی یکسان گردد. پارامترهایی که برای آبشارهای مربعی در این گام لازم است مقدار آنها بهینه شود شامل نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار و مراحل، مرحله ورود خوراک و برش مرحله اول است و علاوه بر این پارامترها، کسر جریان‌های میان بخشی برای آبشارهای مربعی شده نیز لازم است بهینه گردد.

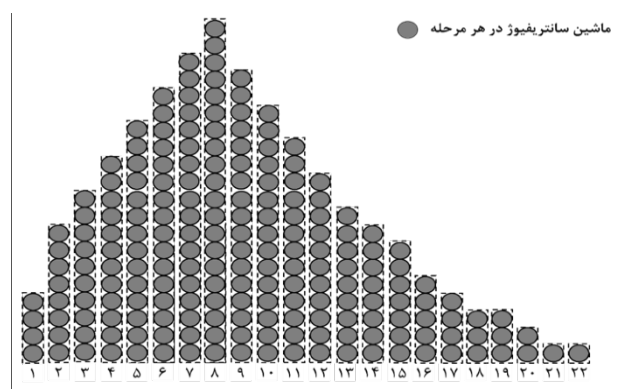
• **مرحله پنجم: استفاده از آبشارهای گام اول برای گام‌های بعدی:** در این مرحله از آبشارهای گام اول بدون تغییر چیدمان ماشین‌ها در گام‌های بعدی جهت غنی‌سازی مجدد اورانیم تا رسیدن به غلظت ۲۰٪ استفاده می‌شود. تعداد گام‌ها در هر راهبرد از این طریق به دست می‌آید و مقدار غنای خوراک هر گام محصول گام قبلی است.

## ۵. نتایج و بحث

در این پژوهش قرار است، از طریق پنج راهبرد پیشنهادی با استفاده از آبشارهای مخروطی، مربعی، مربعی شده ۲-بخشی، ۳-بخشی و ۴-بخشی در چند گام با به کارگیری یک نوع ماشین سانتریفیوژ با فاکتور جداسازی متغیر، اورانیم مورد استفاده رآکتورهای تحقیقاتی با غنای ۲۰٪ تولید شود.

**۱.۵.** راهبرد استفاده از آبشارهای مخروطی جهت تولید اورانیم با غنای ۲۰٪

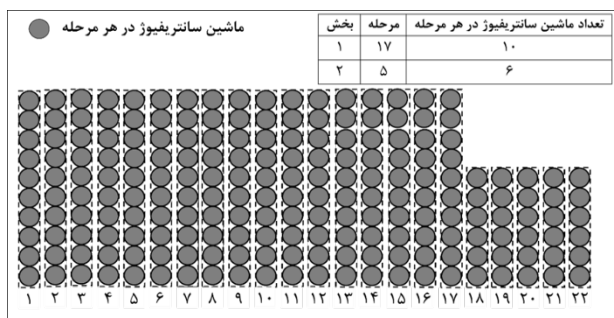
با توجه به بالا بودن راندمان آبشارهای مخروطی اولین راهبرد برای غنی‌سازی اورانیم برای تولید محصول با غنای ۲۰ درصد استفاده از آبشار مخروطی است. در این راهبرد مشخصات آبشار طراحی شده و بهینه‌سازی شده در گام اول به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۱ ارائه داده شده است.



شکل ۳. آبشار مخروطی بهینه متشکل از ۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ.







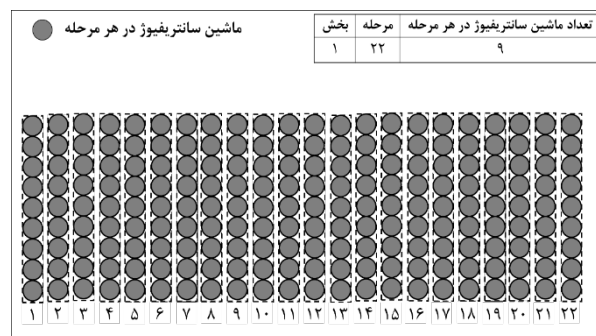
شکل ۵. چیدمان آبشار مربعی شده ۲-بخشی بهینه متشکل از ۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ.

جدول ۳. نتایج غنی‌سازی اورانیم تا غنای ۲۰٪ با آبشار مربعی‌شده ۲-بخشی بهینه متشکل از ۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ

| شماره گام                                           | ۱      | ۲     |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|
| تعداد مراحل                                         | ۲۲     | ۲۲    |
| نرخ خوراک ( $\text{ghr}^{-1}$ )                     | ۲۱۱٫۷  | ۵۱٫۸  |
| مرحله ورود خوراک                                    | ۱۰     | ۱۴    |
| برش آبشار                                           | ۰٫۱۲۰  | ۰٫۱۷۵ |
| برش مرحله اول                                       | ۰٫۴۲   | ۰٫۴۵  |
| نرخ خوراک ورودی به بخش اول ( $\text{ghr}^{-1}$ )    | ۱۲۲۰٫۴ | ۶۰۸٫۴ |
| نرخ خوراک ورودی به بخش دوم ( $\text{ghr}^{-1}$ )    | ۶۴۸٫۰  | ۵۶۳٫۴ |
| کسر جریان برگشتی بین بخش اول و دوم                  | ۰٫۵۰   | ۰٫۳۰  |
| جریان برگشتی مرحله اول ( $\text{ghr}^{-1}$ )        | ۵۲۱٫۶  | ۲۹۱٫۹ |
| جریان برگشتی مرحله آخر ( $\text{ghr}^{-1}$ )        | ۲۸۵٫۹  | ۱۶۸٫۱ |
| غنای محصول (%)                                      | ۳٫۷۳   | ۲۰٫۰۰ |
| غنای پسماند (%)                                     | ۰٫۳۰   | ۰٫۲۷  |
| متوسط خوراک ورودی سانتریفیوژ ( $\text{g hr}^{-1}$ ) | ۱۱۹٫۹  | ۶۱٫۶  |
| ظرفیت جداسازی سانتریفیوژ ( $\text{kg Uyr}^{-1}$ )   | ۵٫۳۰   | ۴٫۴۹  |

۴.۵ راهبرد استفاده از آبشارهای مربعی‌شده ۳-بخشی با چند گام جهت تولید اورانیم با غنای ۲۰٪

آبشار مربعی‌شده ۳-بخشی دارای انعطاف‌پذیری لازم و راندمان بالاتر نسبت به آبشارهای مربعی و مربعی‌شده ۲-بخشی هستند، بنابراین دلایل، راهبرد سوم برای غنی‌سازی اورانیم، استفاده از آبشارهای مربعی‌شده ۳-بخشی است. از آنجایی که هرچه مجموع جریان‌های میان مرحله‌ای آبشارها با تعداد مرحله یکسان کمتر باشند؛ عملکرد آنها به آبشار مخروطی نزدیک‌تر می‌گردد، لازم است مجموع جریان‌های میان مرحله‌ای آبشار مربعی‌شده ۳-بخشی برابر مجموع جریان‌های میان مرحله‌ای آبشار مخروطی در نظر گرفته شود تا آبشار مربعی‌شده ۳-بخشی با کمترین انحراف از آبشار مخروطی حاصل گردد. در شکل ۶ و جدول ۴ نزدیک‌ترین آبشار مربعی‌شده ۳-بخشی به آبشار مخروطی نشان داده شده است.



شکل ۴. چیدمان آبشار مربعی بهینه متشکل از ۱۹۸ ماشین سانتریفیوژ.

جدول ۲. نتایج غنی‌سازی اورانیم با آبشار مربعی بهینه متشکل از ۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ

| شماره گام                                           | ۱      | ۲     |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|
| تعداد مراحل                                         | ۲۲     | ۲۲    |
| نرخ خوراک ( $\text{ghr}^{-1}$ )                     | ۱۹۳٫۷  | ۴۹٫۷  |
| مرحله ورود خوراک                                    | ۱۰     | ۱۴    |
| برش آبشار                                           | ۰٫۱۲۰  | ۰٫۱۷۵ |
| برش مرحله اول                                       | ۰٫۴۰   | ۰٫۴۶  |
| نرخ خوراک ورودی به مراحل ( $\text{ghr}^{-1}$ )      | ۱۰۷۹٫۳ | ۵۶۳٫۴ |
| جریان برگشتی مرحله اول ( $\text{ghr}^{-1}$ )        | ۴۸۳٫۵  | ۲۵۹٫۹ |
| جریان برگشتی مرحله آخر ( $\text{ghr}^{-1}$ )        | ۴۶۰٫۳  | ۲۵۱٫۲ |
| غنای محصول (%)                                      | ۳٫۷۳   | ۲۰٫۰۰ |
| غنای پسماند (%)                                     | ۰٫۳۰   | ۰٫۲۸  |
| متوسط خوراک ورودی سانتریفیوژ ( $\text{g hr}^{-1}$ ) | ۱۲۱٫۱  | ۶۲٫۶  |
| ظرفیت جداسازی سانتریفیوژ ( $\text{kg Uyr}^{-1}$ )   | ۴٫۹۰   | ۴٫۲۹  |

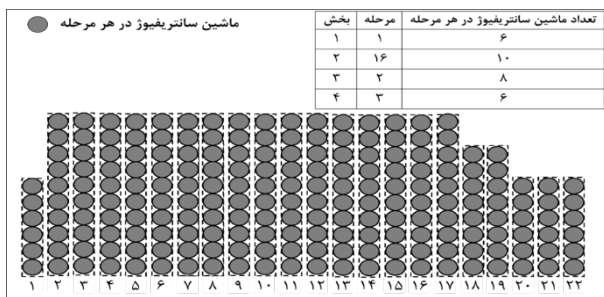
۳.۵ راهبرد استفاده از آبشارهای مربعی‌شده ۲-بخشی با چند گام جهت تولید اورانیم با غنای ۲۰٪

آبشار مربعی‌شده ۲-بخشی هم دارای انعطاف‌پذیری لازم و هم راندمان بالاتری نسبت به آبشارهای مربعی دارند، بنابراین دلایل سومین راهبرد انتخابی برای غنی‌سازی اورانیم استفاده از آبشارهای مربعی‌شده ۲-بخشی است. لازم است مجموع جریان‌های میان مرحله‌ای آبشار مربعی‌شده ۲-بخشی برابر مجموع جریان‌های میان مرحله‌ای آبشار مخروطی در نظر گرفته شود تا آبشار مربعی‌شده ۲-بخشی با کمترین انحراف از آبشار مخروطی حاصل گردد. در شکل ۵ و جدول ۳ نزدیک‌ترین آبشار مربعی‌شده ۲-بخشی به آبشار مخروطی نشان داده شده است.

مطابق جدول ۳، آبشار مربعی‌شده ۲-بخشی قادر به غنی‌سازی اورانیم در یک گام تا غنای ۲۰٪ در محصول سبک نیست. بنابراین گام‌های جداسازی از سمت محصول سبک تا جایی ادامه داده می‌شود تا غنای اورانیم در محصول سبک به ۲۰٪ برسد.



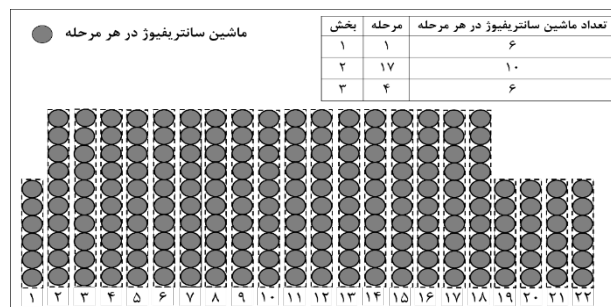
مربعی شده ۲-بخشی و ۳-بخشی، برای نزدیک کردن راندمان آبشارهای مربعی شده ۴-بخشی به آبشار مخروطی، لازم است مجموع جریانهای میان مرحلهای آبشار مربعی شده ۴-بخشی برابر مجموع جریانهای میان مرحلهای آبشار مخروطی در نظر گرفته شود تا آبشار مربعی شده ۴-بخشی با کمترین انحراف از آبشار مخروطی حاصل گردد. در شکل ۷ و جدول ۵ نزدیکترین آبشار مربعی شده ۴-بخشی به آبشار مخروطی نشان داده شده است.



شکل ۷. چیدمان آبشار مربعی شده ۴-بخشی بهینه متشکل از ۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ.

جدول ۵. نتایج غنی‌سازی اورانیم تا غنای ۲۰٪ با آبشار مربعی شده ۴-بخشی بهینه متشکل از ۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ

| شماره گام                                           | ۱      | ۲     |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|
| تعداد مراحل                                         | ۲۲     | ۲۲    |
| نرخ خوراک ( $\text{ghr}^{-1}$ )                     | ۲۱۶،۰  | ۵۴،۵  |
| مرحله ورود خوراک                                    | ۹      | ۱۴    |
| برش آبشار                                           | ۰،۱۲۰  | ۰،۱۷۵ |
| برش مرحله اول                                       | ۰،۴۰   | ۰،۵۰  |
| نرخ خوراک ورودی به بخش اول ( $\text{ghr}^{-1}$ )    | ۶۴۸،۰  | ۳۹۶،۰ |
| نرخ خوراک ورودی به بخش دوم ( $\text{ghr}^{-1}$ )    | ۱۳۶۸،۰ | ۶۳۷،۲ |
| نرخ خوراک ورودی به بخش سوم ( $\text{ghr}^{-1}$ )    | ۶۴۸،۰  | ۴۳۲،۰ |
| نرخ خوراک ورودی به بخش چهارم ( $\text{ghr}^{-1}$ )  | ۲۹۱،۶  | ۲۸۸،۰ |
| کسر جریان برگشتی بین بخش اول و دوم                  | ۰،۵۰   | ۰،۲۵  |
| کسر جریان برگشتی بین بخش دوم و سوم                  | ۰،۵۰   | ۰،۲۵  |
| کسر جریان برگشتی بین بخش دوم و سوم                  | ۰،۴۵   | ۰،۴۰  |
| جریان برگشتی مرحله اول ( $\text{ghr}^{-1}$ )        | ۱۳۳،۹  | ۱۵۳،۱ |
| جریان برگشتی مرحله آخر ( $\text{ghr}^{-1}$ )        | ۱۲۰،۵  | ۱۳۸،۰ |
| غنای محصول (%)                                      | ۳،۷۳   | ۲۰،۰۰ |
| غنای پسماند (%)                                     | ۰،۳۰   | ۰،۲۸  |
| متوسط خوراک ورودی سانتریفیوژ ( $\text{g hr}^{-1}$ ) | ۱۱۹،۹  | ۶۱،۶  |
| ظرفیت جداسازی سانتریفیوژ ( $\text{kg Uyr}^{-1}$ )   | ۵،۴۳   | ۴،۶۵  |



شکل ۶. چیدمان آبشار مربعی شده ۳-بخشی بهینه متشکل از ۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ.

جدول ۴. نتایج غنی‌سازی اورانیم تا غنای ۲۰٪ با آبشار مربعی شده ۳-بخشی بهینه متشکل از ۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ

| شماره گام                                           | ۱      | ۲     |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|
| تعداد مراحل                                         | ۲۲     | ۲۲    |
| نرخ خوراک ( $\text{ghr}^{-1}$ )                     | ۲۱۴،۶  | ۵۳،۶  |
| مرحله ورود خوراک                                    | ۱۰     | ۱۴    |
| برش آبشار                                           | ۰،۱۲۰  | ۰،۱۷۵ |
| برش مرحله اول                                       | ۰،۳۵   | ۰،۴۴  |
| نرخ خوراک ورودی به بخش اول ( $\text{ghr}^{-1}$ )    | ۶۴۸،۰  | ۳۶۰،۰ |
| نرخ خوراک ورودی به بخش دوم ( $\text{ghr}^{-1}$ )    | ۱۲۶۰،۰ | ۶۱۹،۲ |
| نرخ خوراک ورودی به بخش سوم ( $\text{ghr}^{-1}$ )    | ۴۷۷،۰  | ۳۶۰،۰ |
| کسر جریان برگشتی بین بخش اول و دوم                  | ۰،۴۰   | ۰،۳۸  |
| کسر جریان برگشتی بین بخش دوم و سوم                  | ۰،۵۲   | ۰،۳۰  |
| جریان برگشتی مرحله اول ( $\text{ghr}^{-1}$ )        | ۲۹۱،۰  | ۱۵۷،۴ |
| جریان برگشتی مرحله آخر ( $\text{ghr}^{-1}$ )        | ۴۹۵،۴  | ۱۹۵،۳ |
| غنای محصول (%)                                      | ۳،۷۳   | ۲۰،۰۰ |
| غنای پسماند (%)                                     | ۰،۳۰   | ۰،۲۸  |
| متوسط خوراک ورودی سانتریفیوژ ( $\text{g hr}^{-1}$ ) | ۱۱۹،۹  | ۶۱،۶  |
| ظرفیت جداسازی سانتریفیوژ ( $\text{kg Uyr}^{-1}$ )   | ۵،۳۹   | ۴،۵۹  |

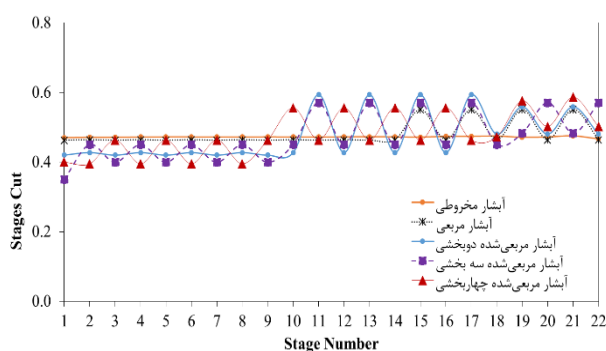
مطابق جدول ۴، آبشار مربعی شده ۳-بخشی قادر به غنی‌سازی اورانیم در یک گام تا غنای ۲۰٪ در محصول سبک نیست. بنابراین گام‌های جداسازی از سمت محصول سبک تا جایی ادامه داده می‌شود تا غنای اورانیم در محصول سبک به ۲۰٪ برسد.

۵.۵. راهبرد استفاده از آبشارهای مربعی شده ۴-بخشی با چند گام جهت تولید اورانیم با غنای ۲۰٪

پنجمین راهبرد انتخابی برای غنی‌سازی اورانیم استفاده از آبشار مربعی شده ۴-بخشی است زیرا دارای انعطاف‌پذیری بالا و همچنین راندمان بالاتر این آبشار نسبت به آبشار مربعی و مربعی شده ۲-بخشی و ۳-بخشی می‌باشد. مشابه آبشار مربعی و



تولید محصول کمتری نسبت به آبشارهای دیگر دارد و قادر به غنی سازی اورانیم با غنای ۲۰٪ در دو گام جداسازی با یک چیدمان واحد است. ۳) آبشار مربعی شده ۴-بخشی ظرفیت تولید محصول بیشتری نسبت به آبشارهای مربعی و مربعی شده ۲-بخشی و ۳-بخشی به ترتیب در حدود ۱۱/۱٪، ۳/۱٪ و ۱/۱۰٪ دارد و قادر به غنی سازی اورانیم با غنای ۲۰٪ در دو گام جداسازی با یک چیدمان واحد است. ۴) توان جداسازی آبشارهای مربعی شده ۴-بخشی، نسبت به آبشارهای مربعی و مربعی شده ۲-بخشی و ۳-بخشی در حدود ۱۱/۱٪، ۲/۶٪ و ۱/۱۰٪ بیشتر است. این می تواند نشان از این باشد که هرچه آبشارها به سمت آبشارهای مخروطی نزدیک تر شوند قابلیت جداسازی آنها افزایش می یابد اما هرچه بخش ها افزایش یابد شیب افزایش راندمان بازیابی و توان جداسازی کم می شود تا جایی که که دیگر افزایش تعداد بخش ها در آبشارهای مربعی شده تأثیری در توان جداسازی نخواهد داشت. با توجه به کم بودن مقدار تغییرات ظرفیت جداسازی آبشارها از ۳-بخشی به بعد، این آبشار برای غنی سازی اورانیم تا سطح ۲۰٪ پیشنهاد می شود.



شکل ۸. توزیع برش مراحل آبشارهای مخروطی، مربعی و مربعی شده.

مطابق جدول ۵، آبشار مربعی شده ۴-بخشی قادر به غنی سازی اورانیم در یک گام تا غنای ۲۰٪ در محصول سبک نیست. بنابراین گام های جداسازی از سمت محصول سبک تا جایی ادامه داده می شود تا غنای اورانیم در محصول سبک به ۲۰٪ برسد.

#### ۶.۵ تغییرات برش مراحل در طول آبشارهای بهینه مخروطی، مربعی و مربعی شده m بخشی

منحنی تغییرات برش هر مرحله برای آبشارهای بهینه مخروطی، مربعی، مربعی شده ۲-بخشی، ۳-بخشی و ۴-بخشی جهت تولید اورانیم غنی شده مورد نیاز یک راکتور تحقیقاتی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که از شکل مذکور مشاهده می شود، تغییرات برش آبشارهای مخروطی متقارن نسبت به آبشارهای مربعی و مربعی شده ناچیز است. همچنین تغییرات برش آبشارهای مربعی شده نسبت به آبشار مربعی بیشتر است چون عملکرد آنها به مخروطی نزدیک تر است. بنابراین در صورت استفاده از هر چهار نوع آبشار مربعی و مربعی شده، تنظیم برش مراحل در طول آبشار الزامی است.

#### ۷.۵ مقایسه عملکرد راهبردها

نتایج به دست آمده از مقایسه راهبردهای استفاده از آبشارهای بهینه مخروطی و مربعی با قید استفاده از ۲۰۰ دستگاه ماشین سانتریفیوژ در طول یکسال در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۶ نشان می دهد: ۱) به رغم این که آبشار مخروطی هم توان جداسازی و هم ظرفیت تولید بالاتری نسبت به آبشارهای مربعی و مربعی شده دارد، با یک گام، قادر به غنی سازی اورانیم تا غنای ۲۰٪ نیست؛ ۲) آبشار مربعی ظرفیت

جدول ۶. نتایج غنی سازی سالیانه تا غنای ۲۰٪ با آبشارهای مربعی، مربعی شده ۲-بخشی، ۳-بخشی و ۴-بخشی

| ظرفیت جداسازی کل<br>(kg Uyr <sup>-1</sup> ) | غنای پسماند<br>(%) | غنای محصول<br>(%) | پسماند<br>(kg yr <sup>-1</sup> ) | محصول<br>(kg yr <sup>-1</sup> ) | خوراک<br>(kg yr <sup>-1</sup> ) | نوع آبشار        |
|---------------------------------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|
| ۱۳۳۲/۱                                      | ۰/۲۹۰              | ۳/۷۳              | ۱۹۶۵/۰                           | ۲۷۴/۱                           | ۲۲۳۹/۱                          | مخروطی           |
| ۹۳۰/۰                                       | ۰/۲۹۸              | ۲۰/۰۰             | ۱۱۳۰/۴                           | ۲۴/۳                            | ۱۱۵۴/۷                          | مربعی            |
| ۱۰۰۶/۵                                      | ۰/۲۹۷              | ۲۰/۰۰             | ۱۲۱۸/۲                           | ۲۶/۱                            | ۱۲۴۴/۳                          | مربعی شده ۲-بخشی |
| ۱۰۲۲/۸                                      | ۰/۲۹۸              | ۲۰/۰۰             | ۱۲۴۳/۲                           | ۲۶/۷                            | ۱۲۶۹/۸                          | مربعی شده ۳-بخشی |
| ۱۰۳۲/۹                                      | ۰/۲۹۸              | ۲۰/۰۰             | ۱۲۵۵/۴                           | ۲۶/۹                            | ۱۲۸۲/۳                          | مربعی شده ۴-بخشی |





## ۶. نتیجه گیری

## مراجع

1. Glaser A. About the enrichment limit for research reactor conversion: Why 20%?. [International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors \(hereinafter referred to as RERTR conference\), Boston](#). 2005.
2. Azizov T.E, Smirnov A.Y, Sulaberidze G.A, Mustafin A.R. Optimization of a system of square cascades for efficient concentration of intermediate isotopes. [J. Phys.: Conf. Ser.](#) 2020;1696(1):012010.
3. Benedict M, Pigford T.H, Levi H.W. Nuclear chemical engineering, 2nd edition. ed., McGraw-Hill Education, New York, 1981.
4. Borisevich V.D, Yan J, Smirnov A.Y, Bonarev A.K, Zeng S, Sulaberidze G.A, Jiang D. Cascade design for isotopically modified molybdenum as an alternative to zirconium alloys. [Chemical Engineering Research and Design](#). 2017;128:257-264.
5. Cohen K. The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-scale Production of U235. [McGraw-Hill](#). 1951.
6. Mirmohammadi S.L, Ezazi F, Safdari J, Mallah M.H. Comparison of the performance of optimal square, symmetric and asymmetric tapered cascades for production of enriched uranium for power reactors. [Annals of Nuclear Energy](#). 2023;186:109761.
7. Mirmohammadi S, Safdari J, Mallah M, Ezazi F. The design and optimization of square cascades by PSO and GOA to provide fresh fuel for a nuclear power reactor. [Separation Science and Technology](#). 2023;1-19.
8. Mirmohammadi S.L, Safdari J, Mallah M.H. Using optimal squared-off cascades instead of optimal square cascades to produce enriched uranium required for fresh fuel in the equilibrium cycle in power reactors. [Annals of Nuclear Energy](#). 2023;192:109987.
9. Ezazi F, Imani M, Safdari J, Mallah M.H, Mirmohammadi S.L. An application of nature-inspired paradigms in the overall optimization of square and squared-off cascades to separate a middle isotope of tellurium. [Ann. Nucl. Energy](#). 2022;171:109033.
10. Ezazi F, Mallah M.H, Safdari J, Mirmohammadi S.L. Performance comparison of the optimized k-section squared-off cascades for enrichment of  $^{124}\text{Te}$  using two meta-heuristic paradigms. [Prog. Nucl. Energy](#). 2022;145:104105.
11. Safdari J, Norouzi A, Tumari R. Using a real coded PSO algorithm in the design of a multi-component countercurrent cascade. [Sep. Sci. Technol.](#) 2017;52(18):2855-2862.
12. Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. MHS'95. [Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science](#). 1995;39-43.

با توجه به نتایج به دست آمده از پنج راهبرد استفاده از آبشارهای مخروطی، مربعی، مربعی شده ۲-بخشی، ۳-بخشی و ۴-بخشی، براساس مشخصات ماشین وجود محدودیت در تعداد ماشین‌های قابل استفاده (۲۰۰ ماشین سانتریفیوژ در یک آبشار) و همچنین محدودیت در داشتن فقط یک محصول جانبی (اورانیم تهی شده با غنای  $x_w < 0.3\%$ ) نتایج زیر از مقایسه پنج راهبرد مذکور قابل استنتاج می‌باشد:

۱- آبشارهای مخروطی قابلیت تولید محصول با غنای  $20\%$  را ندارد و حداکثر غنای قابل حصول توسط  $3.73\%$  خواهد بود. این امر به دلیل عدم انعطاف پذیری آبشارهای مخروطی (عدم استفاده از یک چیدمان واحد و چندگام)، محدودیت در تعداد ماشین‌های قابل استفاده و پایین بودن فاکتور جداسازی ماشین برمی‌گردد. در صورت نداشتن محدودیت در تعداد ماشین‌ها با راهکارهایی از قبیل کوپل کردن دو یا چند آبشار مخروطی یا طراحی یک آبشار مخروطی طویل، امکان تولید محصول تا غنای  $20\%$  وجود دارد ولی محصول جانبی، دیگر اورانیم تهی شده با غنای  $x_w < 0.3\%$  نخواهد بود.

۲- در راهبردهای استفاده از آبشار مربعی و مربعی شده ۲-بخشی، ۳-بخشی و ۴-بخشی امکان تولید محصول با غنای  $20\%$  طی دو گام وجود دارد. دلیل آن به ماهیت انعطاف پذیری آبشارهای مربعی و مربعی شده علی‌رغم وجود محدودیت‌هایی از قبیل تعداد ماشین‌های قابل استفاده، پایین بودن فاکتور جداسازی ماشین بر می‌گردد.

۳- آبشارهای مربعی شده ۴-بخشی دارای بیشترین توان جداسازی نسبت به آبشارهای مربعی و مربعی شده‌های ۲-بخشی و ۳-بخشی اما چون اختلاف آن با مربعی ۳-بخشی کم است برای تولید اورانیم با غنای  $20\%$  است آبشار مربعی ۳-بخشی پیشنهاد می‌شود.

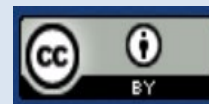
در صورت جدی بودن تهدیدات خارجی مراکز هدف یکی از راه‌های پیشنهادی برای به حداقل رساندن خسارات احتمالی تمرکززدایی تأسیسات هدف است. با توجه به انعطاف پذیری آبشارهای مربعی/مربعی شده و همچنین بالا بودن درصد بازیابی محصول غنی شده از خوراک اولیه با تعداد محدودی ماشین سانتریفیوژ نسبت به آبشار مخروطی، یکی از راهکارهای پیشنهادی استفاده از آبشارهای مربعی/مربعی به جای مخروطی است.



13. Mirjalili S, Gandomi A.H, Mirjalili S.Z, Saremi S, Faris H, Mirjalili S.M. Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems. *Advances in Engineering Software*. 2017;114:163-191.
14. Feng Y, Deb S, Wang G.-G, Alavi A.H. Monarch butterfly optimization: a comprehensive review. *Expert Systems with Applications*. 2021;168:114418.
15. Rao R.V, Savsani V.J, Vakharia D. Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*. 2011;43(3):303-315.
16. Yang X.-S. Firefly algorithm, Levy flights and global optimization. *Research and development in intelligent systems XXVI: Incorporating applications and innovations in intelligent systems XVII*. Springer. 2010;209-218.
17. Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*. 2007;39:459-471.
18. Kohli M, Arora S. Chaotic grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problems. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2018;5(4):458-472.
19. Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*. 2016;95:51-67.
20. Norouzi A, Minuchehr A, Zolfaghari A, Hagighattalab A. Parameters optimization of a counter-current cascade based on using a real coded genetic algorithm. *Separation Science and Technology*. 2011;46(14):2223-2230.
21. Zeng S.H.I, Ying C. A Robust and Efficient Calculation Procedure for Determining Concentration Distribution of Multicomponent Mixtures. *Sep. Sci. Technol*. 2000;35(4):613-622.
22. Borisevich V, Borshchevskiy M, Zeng S, Jiang D. On ideal and optimum cascades of gas centrifuges with variable overall separation factors. *Chemical Engineering Science*. 2014;116:465-472.

**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**

میرمحمدی، سیده‌لیلا، صفدری، سیدجابر، ملاح، محمدحسن. (۱۴۰۴). استفاده از راهبردهای جدید جهت تولید اورانیوم غنی شده از اورانیوم طبیعی برای سوخت یک رآکتور تحقیقاتی. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*. ۱۱۱(۱)، ۹۶-۱۰۵. **DOI:** <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1535.2002>. **Url:** [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1653.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1653.html)

