



حذف واحد اختلاط در تأسیسات غنی‌سازی و تولید اورانیم غنی‌شده برای سال اول یک رآکتور هسته‌ای قدرت با استفاده از آبشارهای مربعی بهینه

سیده‌لیلا میرمحمدی^{*}، سیدجابر صفدری، محمدحسن ملاح، فرزانه اعزازی

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

*Email: lmirmohammadi@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۲/۱۸

چکیده

در سال اول بارگذاری سوخت رآکتورهای هسته‌ای قدرت از اورانیم غنی‌شده با سطوح مختلف استفاده می‌شود (در یک نوع رآکتور VVER-1000 سطوح غنا ۴٫۰، ۳٫۶، ۳٫۳، ۳٫۰، ۲٫۴، ۲٫۲ و ۱٫۳ درصد می‌باشند). در این کار برای تولید اورانیم غنی‌شده از دو روش موازی یکی با استفاده از آبشارهای مربعی و دیگری با استفاده از آبشارهای مخروطی متقارن استفاده شده است. جهت طراحی و بهینه‌سازی آبشارها کدهای محاسباتی توسعه داده شده است و از روش فرا ابتکاری PSO برای بهینه‌سازی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد: (۱) در صورت استفاده از آبشارهای مربعی امکان تولید مستقیم تمام اورانیم غنی‌شده با سطوح مختلف وجود دارد و نیازی به داشتن واحد اختلاط در تأسیسات غنی‌سازی نمی‌باشد، (۲) در صورت استفاده از آبشارهای مخروطی امکان تولید غیرمستقیم تمام اورانیم غنی‌شده با سطوح مختلف برای سال اول فقط با داشتن واحد اختلاط در تأسیسات غنی‌سازی مقدور است، (۳) تعداد کل سانتریفیوژها/آبشارها استفاده شده برای تولید اورانیم غنی‌شده در مقایسه با آبشارهای مربعی حدود ۲۲-۳۹ درصد کاهش را نشان می‌دهد، (۴) در صورت استفاده از سانتریفیوژهای گازی با ظرفیت جداسازی بالا در آبشارهای مربعی و مخروطی، تعداد کل ماشین‌های سانتریفیوژ مورد نیاز برای تولید اورانیم غنی‌شده سوخت به هم نزدیک می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آبشارهای مخروطی، آبشارهای مربعی، سوخت رآکتور قدرت در اولین سال، الگوریتم بهینه‌سازی PSO

The elimination of the mixing unit in the enrichment facility and the production of enriched uranium for the first cycle of a nuclear power reactor using optimal square cascades

S.L. Mirmohammadi*, J. Safdari, M.H. Mallah, F. Ezazi

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

Research Article

Received 4.3.2023, Accepted 8.5.2023

Abstract

In the first year of fuel loading of nuclear power reactors, uranium enriched at different levels is employed (in the VVER-1000 reactor, the enrichment levels are 4.0, 3.6, 3.3, 0.3, 2.4, 2.2, and 1.3%). In this work, for the production of enriched uranium in the first cycle, two parallel methods have been applied, one by square cascades and the other by symmetrical tapered cascades. Computational codes have been developed for the design and optimization of cascades. The meta-heuristic PSO method is employed for optimization. The results show that: 1. if square cascades are implemented, it is possible to directly produce all uranium with different levels at different levels; 2. if tapered cascades are applied, it is feasible to obtain all uranium indirectly, and uranium enrichment at different levels is only possible with a mixing unit in the enrichment facility; 3. The total number of centrifuges or cascades used to produce enriched uranium is reduced by 22–39% compared to square cascades. 4. If gas centrifuges with high separation capacities are used in square and tapered cascades, the total number of gas centrifuges required for enriched uranium production will be close.

Keywords: Tapered cascades, Square cascades, Power reactor fuel in the first cycle, PSO optimization algorithm



۱. مقدمه

تاکنون در حدود ۴۵۰ نیروگاه هسته‌ای قدرت در سرتاسر جهان در حال بهره‌برداری هستند که حدود ۱۱٪ برق جهان را تولید می‌کنند. این نیروگاه‌ها گرچه نسبت به هم دارای تفاوت‌های بسیاری هستند، ولی در عین حال مشترکاتی نیز دارند. اکثریت نیروگاه‌های قدرت هسته‌ای از سوخت اورانیم با غنای کم‌تر ۵٪ استفاده می‌کنند [۱]. رآکتور VVER یا رآکتور WWER مخفف عبارت Water-Water Energetic Reactor مجموعه‌ای از رآکتورهای هسته‌ای از نوع آب سبک تحت فشار که توسط شرکت روسی OKB Gidropress طراحی و ساخته می‌شوند. طراحی نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰ تقریباً از سال ۱۹۷۰ میلادی شروع شد و پس از ده سال اولین واحد آن در شهر نوووارونژ در کشور روسیه به بهره‌برداری رسید. نیروگاه‌های هسته‌ای VVER-۱۰۰۰ مدل‌های مختلفی از قبیل V-۳۰۲، V-۴۴۶، V-۳۲۰ و ... دارند و از اکسید اورانیم غنی‌شده با غناهای مختلف در مجتمع‌های سوخت استفاده می‌کنند [۱]. کشورهای مختلفی در سراسر جهان از این رآکتور استفاده می‌کنند که شامل ایران، ارمنستان، بلغارستان، چین، جمهوری چک، فنلاند، مجارستان، هند، اسلواکی، اوکراین و روسیه هستند.

در این تحقیق برای انجام محاسبات از مشخصات سوخت استفاده شده در سال اول بارگذاری در یک نوع رآکتور VVER-۱۰۰۰ کشور اوکراین بهره گرفته شده است [۲]. در جدول ۱ مشخصات و غنای سوخت TVSA (مخفف روسی مجتمع سوخت ساخت شرکت TVEL) نشان داده شده است. این رآکتور در سال ۲۰۰۴ عملیاتی شده است. سوخت TVSA دارای طرح شش ضلعی می‌باشد و از گادولینیم به‌عنوان ماده سوختنی جاذب استفاده شده است. وزن میله‌های سوخت UO_2 خالص و ترکیب UO_2 با Gd_2O_3 مورد استفاده در این مجتمع به ترتیب ۱۵۷۵ و ۱۵۷۰ گرم است. هشت نوع مجتمع سوخت TVSA با غنای متفاوت در چهار دوره این نیروگاه استفاده می‌شود.

پنج نوع اول مجتمع سوخت، در سال اول نیروگاه استفاده می‌گردد و سایر مجتمع‌های سوخت در دوره‌های بعدی استفاده می‌شوند. سطح غناء اورانیم و مقدار UF_6 غنی‌شده مورد نیاز جهت ساخت مجتمع‌های سوخت شش ضلعی TVSA برای اولین سال این رآکتور قدرت در جدول ۲ ارائه شده است [۲].

جدول ۱. مشخصات مجتمع‌های سوخت TVSA مورد استفاده در چهار

دوره یک رآکتور قدرت VVER-۱۰۰۰ اوکراینی

نوع مجتمع سوخت	تعداد میله‌های سوخت	تعداد میله‌های گادولینیم $(W\% Gd_2O_3-^{235}U)$	تعداد میله‌های سوخت	غنای سوخت (%)
۱۳AU	۴۸	۰	۳۱۲	۱٫۳
۲۲AU	۴۲	۰	۳۱۲	۲٫۲
۳۰AV۵	۳۷	۹ (۵٫۰-۲٫۴)	۳۰۳	۳٫۰
۳۹AWU	۲۴	۹ (۵٫۰-۳٫۳)	۲۴۳	۴٫۰
۳۹۰GO	۱۲	۶ (۵٫۰-۳٫۳)	۲۴۰	۴٫۰
۳۹۸GO	-	۶ (۵٫۰-۳٫۳)	۳۰۶	۴٫۴
۴۳۰GO	-	۶ (۵٫۰-۳٫۶)	۲۴۰	۴٫۴
۴۳۹GT	-	۶ (۵٫۰-۳٫۶)	۳۰۶	۴٫۴

جدول ۲. سطح غناء و مقدار UF_6 غنی‌شده مورد نیاز جهت ساخت مجتمع

سوخت TVSA در سال اول رآکتور قدرت VVER-۱۰۰۰

غنای سوخت (%)	UF_6 مورد نیاز (Kg)
۴٫۰	۱۷۸۸۹
۳٫۶	۶۲۰۹
۳٫۳	۵۶۰
۳٫۰	۲۳۰۲۰
۲٫۴	۶۴۸
۲٫۲	۲۶۹۰۷
۱٫۳	۳۰۷۵۱

ایزوتوپ‌های ^{235}U و ^{238}U از نظر فیزیکی، به ویژه در جرم، متفاوت هستند. در نتیجه اختلاف جرمی ۱٫۲۷٪ بین جرم ^{235}U و ^{238}U ، می‌توان ایزوتوپ‌ها را جدا کرد و غنای ^{235}U را افزایش داد. همه فرایندهای غنی‌سازی کنونی، به طور مستقیم یا غیرمستقیم، از این تفاوت کوچک جرمی استفاده می‌کنند. به منظور رساندن غنای اورانیم از غنای طبیعی به سطوح مورد نظر یکی از روش‌ها، غنی‌سازی به روش سانتریفیوژ است که یک روش متداول و با صرفه اقتصادی در جهان است. بدین منظور اکسید اورانیم تولیدی از معدن در یک فرایند به هگزافلورید اورانیم تبدیل می‌شود. از آنجایی که ماشین‌های سانتریفیوژ در یک مرحله به تنهایی نمی‌توانند غلظت ^{235}U را از غنای طبیعی به غنای مورد نیاز برای تأمین سوخت یک رآکتور هسته‌ای برسانند، به جای آن از مجموعه‌ای از ماشین‌های سانتریفیوژ متصل شده به صورت سری و موازی به نام آبشار استفاده می‌شود



طراحی آبشارهای مخروطی و مربعی استفاده شده است. شدت جریان‌های خوراک، محصول و پسماند و ظرفیت میانگین جداسازی هر سانتریفیوژگازی در آبشار به‌عنوان متغیرهای تابع هدف در نظر گرفته شده است و سطوح غنی‌سازی اورانیم در سوخت بارگذاری شده در سال اول به‌عنوان محدودیت لحاظ شده‌اند [۲].

۲. مدل‌سازی و شبیه‌سازی آبشارها

۲.۱ آبشارهای مخروطی

شکل ۱ شماتیک یک آبشار مخروطی متقارن که ساده‌ترین شکل عملی یک آبشار با جریان برگشتی می‌باشد را نشان می‌دهد. در این آبشار 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 [۳، ۴، ۱۰-۱۳].

معادلات حاکم برای یک آبشار مخروطی متقارن عبارتند از:

$$Z_n z_n - M_n y_n - N_n x_n = \delta F z_n \quad (1)$$

$$Z_n - M_n - N_n = \delta F \quad (2)$$

$$\begin{cases} Z_n - N_{n+1} = \delta F & n = 1 \\ Z_n - M_{n-1} - N_{n+1} = \delta F & n = 2, \dots, N-1 \\ Z_n - M_{n-1} = \delta F & n = N \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Z_n z_n - N_{n+1} x_{n+1} = \delta F z_F & n = 1 \\ Z_n z_n - M_{n-1} y_{n-1} - N_{n+1} x_{n+1} = \delta F z_F & n = 2, \dots, N-1 \\ Z_n z_n - M_{n-1} y_{n-1} = \delta F z_F & n = N \end{cases} \quad (4)$$

$$W - N_1 = 0 \quad (5)$$

$$P - M_N = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{i,n} = \sum_{i=1}^N y_{i,n} = \sum_{i=1}^N x_{i,n} = 1 \quad (7)$$

$$M_n - \theta_n Z_n = 0 \quad (8)$$

$$\frac{y_n}{x_n} \frac{1-y_n}{1-x_n} = \alpha_o^{M_{T78} - M_{T75}} \quad (9)$$

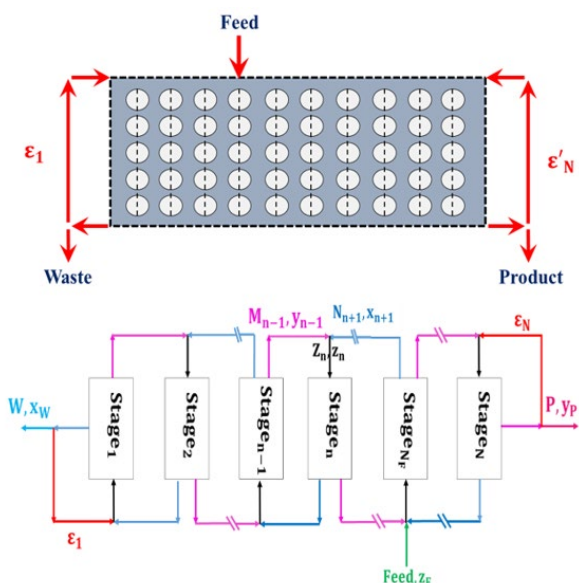
$$P - \theta_{\text{Cascade}} F = 0 \quad (10)$$

تعداد معادلات آبشار مخروطی به تعداد N معادله کم‌تر از مجهولات هستند. به‌منظور حل معادلات، به ازای N معادله، مقدار N برش مراحل حدس زده شده و در یک حلقه تکرار این مقادیر اصلاح شده تا به جواب موردنظر برسد.

[۳]. آرایش آبشارها معمولاً به‌صورت مخروطی یا مربعی هستند و جهت غنی‌سازی ایزوتوپ‌های پایدار عناصر نیز از آنها استفاده می‌شود [۳]. آبشار مخروطی، بیش‌تر به‌منظور غنی‌سازی ایزوتوپ‌های اورانیم مورد استفاده قرار می‌گیرد و از راندمان جداسازی نسبتاً بالایی برخوردار است. در آبشار مربعی، تعداد سانتریفیوژها در تمام مراحل یکسان می‌باشد. با توجه به جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر، آبشارهای مربعی قابلیت بهره‌برداری در نرخ‌های پایین جریان خوراک پایین و تنظیم برش آبشار در حالت‌های مختلف را دارا است که اصطلاحاً از انعطاف‌پذیری بالایی در بهره‌برداری برخوردار هستند. محققان زیادی بر روی انواع آبشارهای سانتریفیوژ جهت جداسازی ایزوتوپ‌های دو جزئی و چند جزئی کار کرده‌اند. به‌عنوان مثال، همه انواع آبشارها و معادلات مرتبط در کتاب‌های مربوطه در مورد سوخت هسته‌ای و مهندسی مورد بحث قرار گرفته‌اند [۳]. سولابریده و همکاران بر روی آبشارهای ایده‌آل و بهینه و طبقه‌بندی آبشارهای مدل برای جداسازی مخلوط‌های ایزوتوپی چند جزئی کار کردند [۴]. علاوه بر این، عزیزوف و همکارانش شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آبشارهای مربعی را برای جداسازی مخلوط‌های چند جزئی مورد مطالعه قرار دادند [۵]. برخی از محققین مانند میرمحمدی و همکاران، اعزازی و همکاران، و خوشه‌چین و همکاران، آبشار مربعی و مربعی‌شده را برای جداسازی ایزوتوپ‌های تلوریم و زنون شبیه‌سازی و طراحی کردند [۶-۹]. هم‌چنین مطالعات بر روی آبشارهای مخروطی جهت جداسازی اورانیم چند جزئی توسط صفدری و همکاران انجام گردید [۱۰].

هدف اصلی این مقاله پیشنهاد و جایگزینی یک آبشار مربعی بهینه به جای یک آبشار مخروطی (بدون تغییر تعداد سانتریفیوژهای گازی در هر آبشار) به منظور حذف واحد اختلاط در تأسیسات غنی‌سازی است. تا به حال عملکرد آبشارهای مربعی برای غنی‌سازی اورانیم با عملکرد آبشارهای مخروطی مورد بررسی و مقایسه قرار نگرفته‌اند. بنابراین، این اولین بار است که عملکرد آبشارهای مخروطی متقارن و مربعی با بهره‌گیری از دو نوع ماشین سانتریفیوژ گازی جهت تولید اورانیم غنی‌شده در سال اول یک رآکتور قدرت مقایسه می‌شوند. الگوی اتصال سانتریفیوژها و آرایش آبشار به مقدار و غلظت محصول نهایی، شدت جریان خوراک آبشار و مرحله ورود خوراک، برش آبشار و سایر پارامترهای مربوط به نوع آبشار بستگی دارد. بنابراین انتخاب یک الگوریتم خوب و کارآمد برای یافتن مقدار بهینه پارامترهای ذکر شده بسیار حائز اهمیت است. برای این منظور از الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی و





شکل ۲. شماتیکی از یک آبشار مربعی [۸، ۹].

لازم به ذکر است که روابط ۵ و ۶ آبشار مخروطی نیز که گره پسماند و محصول آبشار می‌باشد برای آبشار مربعی به ترتیب برابر معادلات ۱۷ و ۱۸ است.

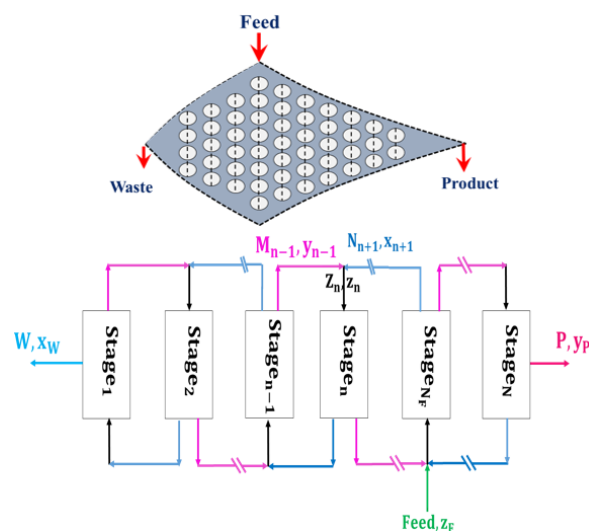
$$W + \varepsilon_1 - N_1 = 0 \quad (17)$$

$$P + \varepsilon_N - M_N = 0 \quad (18)$$

در معادلات مذکور تابع دلتای کرونکر به صورت رابطه ۱۹ است.

$$(\delta) = \begin{cases} 1 & n = N_F \\ 0 & n \neq N_F \end{cases} \quad (19)$$

در آبشار مربعی تعداد معادلات و مجهولات مربوط به غلظت با هم برابرند اما تعداد مجهولات مربوط به جریان به تعداد ۲ مجهول بیشتر از تعداد معادلات است. بنابراین به منظور مدل‌سازی آبشار مربعی لازم است دو پارامتر مجهول به صورت فرضی در نظر گرفته شود تا دستگاه معادلات قابل حل شود و سایر مجهولات تعیین گردد. بدیهی است مقدار فرض شده برای این دو پارامتر به صورت مستقیم بر سایر پارامترها تأثیرگذار است که لازم است در کنار سایر پارامترهای آبشار مربعی، بهینه شوند. معادلات مربوط به غلظت 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 [۱۴]. برای خطی نمودن معادلات مربوط به غلظت، ابتدا با جای‌گذاری معادلات بقای جزیبی مراحل (فرمول ۱) در معادلات گره جزیبی مراحل



شکل ۱. شماتیکی از یک آبشار مخروطی [۳، ۱۰، ۱۱].

۲.۲ آبشارهای مربعی

شکل ۲ شماتیک یک آبشار مربعی را نشان می‌دهد. در این آبشار نیز 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. N_n و M_n ، Z_n نیز به ترتیب نرخ جریان خوراک، جریان محصول و پسماند هر مرحله با غناهای x_n و y_n ، z_n می‌باشند. همچنین جریان‌های برگشتی ابتدایی و انتهایی آبشار مربعی به ترتیب با نمادهای ε_1 و ε'_N به منظور ثابت ماندن شدت جریان خوراک ورودی به مراحل تعبیه شده‌اند [۳، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۱]. برای نشان دادن ارتباط بین برش مراحل آبشار مربعی، با استفاده از روابط ۱۱، ۱۲، ۱۳ (برای مراحل غیر از مرحله ورود خوراک) و ۱۴ (برای مرحله ورود خوراک و بعد از آن) استفاده می‌شود:

$$M_n = Z_n \theta_n \quad (11)$$

$$N_n = Z_n (1 - \theta_n) \quad (12)$$

$$Z_n = Z_n \theta_n + Z_{n+1} (1 - \theta_{n+1}) \quad (13)$$

$$Z_n = Z_n \theta_{N_F-1} + Z_{n+1} (1 - \theta_{N_F-1}) + F \quad (14)$$

این روابط نشان می‌دهد که برش هر مرحله با برش دو مرحله پس از آن برابر خواهد بود. و برش مرحله قبل از خوراک به مقدار F/Z_n کوچک‌تر از برش مرحله بعد از مرحله خوراک است. معادلات آبشار مربعی نیز همانند آبشار مخروطی است با این تفاوت که معادلات بقای جزیبی جرم گره مرحله اول و آخر در روابط ۳ و ۴ به صورت روابط ۱۵ و ۱۶ است:

$$Z_1 z_1 - \varepsilon_1 x_W - N_1 x_P = \delta F z_n \quad (15)$$

$$Z_N z_N - \varepsilon_N y_P - M_{N-1} x_{N-1} = \delta F z_n \quad (16)$$



همچنین میرمحمدی و همکاران، حداکثر بازیابی، تابع D و ظرفیت محصول را به عنوان توابع هدف برای بهینه سازی پارامترهای آبشار مربعی شده برای جداسازی ایزوتوپ های زنون با استفاده از الگوریتم PSO استفاده کرده اند [۷]. اعزازی و همکارانش از الگوریتم ABC و PSO برای طراحی آبشارهای تطبیق X با بهترین تناسب استفاده کردند و آن ها غلظت پسماند و محصول جزء هدف و کل جریان بین مرحله ای آبشار را به عنوان آیت های اصلی تابع هدف انتخاب کردند [۱۶]. تابع هدف مورد استفاده در این پژوهش به فرم رابطه ۲۳ است:

$$f(P, W, F, SWU) = c_1 \frac{P}{F} + c_2 \frac{F}{W} + c_3 SWU \quad (23)$$

که در این رابطه c_1 ، c_2 و c_3 ضرایب وزنی مرتبط با آیت های تابع هدف هستند. غناهای ارائه شده در جدول ۲ برای جریان محصول و غنای کم تر از ۰.۳ درصد در جریان پسماند به عنوان قیود در الگوریتم استفاده شده اند. در این راستا، کدهای نرم افزاری برای بهینه سازی پارامترهای آبشار مربعی و مخروطی متقارن بر اساس تابع هدف فوق الذکر توسعه داده شده اند.

۴. روش کار

در این کار برای تولید اورانیم غنی شده مورد نیاز یک رآکتور قدرت در سال اول بارگذاری با استفاده از آبشارهای مخروطی و مربعی مراحل اصلی کار به صورت زیر بیان می شود:

۱. انتخاب نوع ماشین و تعداد ماشین ها در هر آبشار:

تعداد کل ماشین های سانتریفیوژ در هر آبشار ۱۸۰ دستگاه در نظر گرفته شده است. مشخصات سانتریفیوژهای نوع اول و دوم استفاده شده در این کار که توسط پالکین و همکاران پیشنهاد شده به صورت روابط ۲۴ و ۲۵ بیان می شود [۱۷، ۱۸].

$$\alpha(f, \theta) = e^{(-0.157)(f + 13790)} e^{(0.895 - 0.253\theta_1 - 0.246\theta_2^2)} \quad (24)$$

$$\alpha(f, \theta) = e^{(1 - \theta_1 - \theta_2^2)} f^{-0.2} \quad (25)$$

خوراک بهینه ورودی به سانتریفیوژهای نوع اول و دوم به ترتیب ۳۳ و ۷۱ میلی گرم بر ثانیه است. برش بهینه سانتریفیوژ نوع ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۰.۴۴ و ۰.۴۹ است و بیشینه خوراک سانتریفیوژ ۱/۴ برابر خوراک بهینه فرض شده است.

تهیه کد محاسباتی و طراحی آبشار مخروطی و مربعی. در شکل ۳ الگوریتم مورد استفاده در هر کد محاسباتی ارائه شده است:

(فرمول ۴) پارامتر Z_n حذف می گردد. سپس با تعریف رابطه q به صورت معادله ۲۰ و جای گذاری آن در روابط به جای پارامتر Y_n ، تمامی معادلات به صورت خطی و برحسب پارامتر X_n حاصل می شود. به منظور حل این دستگاه باید از یک مقدار اولیه (غیر صفر) برای پارامتر $q_{U_{238},n}$ استفاده نمود و برحسب نتایج حاصل شده برای غلظت ها، این پارامتر با استفاده از روابط ۲۱ و ۲۲ اصلاح می گردد [۱۴].

$$q_n = \frac{Y_n}{X_n} = q_{U_{238},n} \alpha_{o,n}^{M_{U_{238}} - M_{U_{235}}} \quad (20)$$

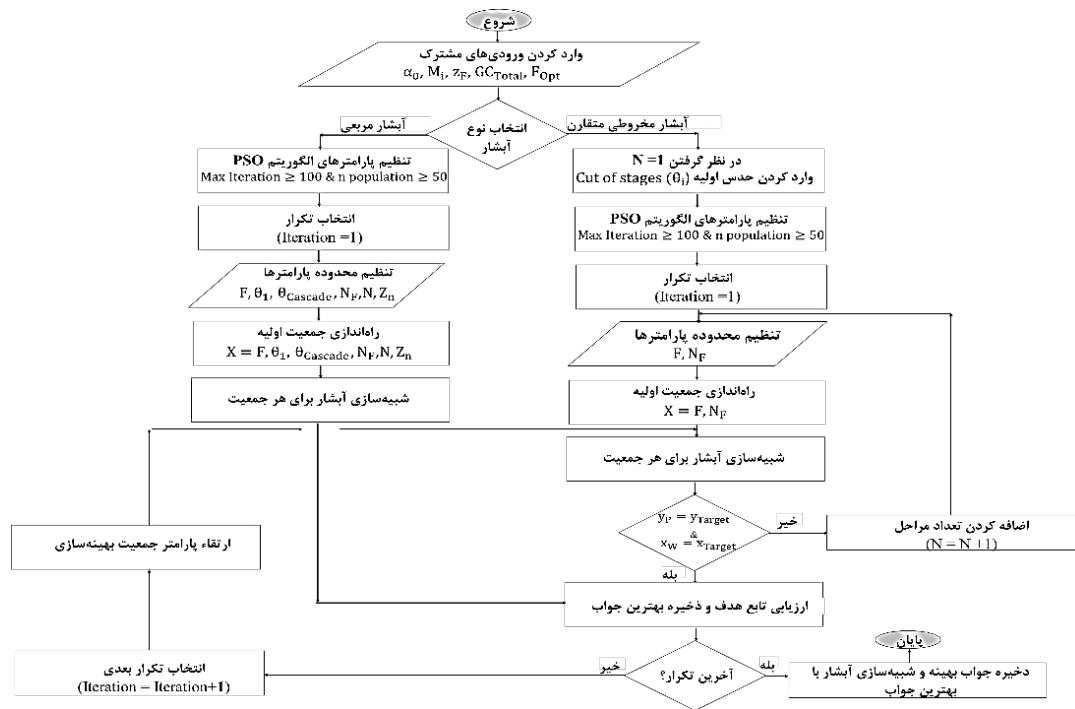
$$q_{U_{238},n}^{New} = \frac{Z_{U_{238},n} + Z_{U_{235},n}}{\alpha_{o,n}^{M_{U_{238}} - M_{U_{235}}} Z_n} \quad (21)$$

$$q_{U_{238},n} = \omega q_{U_{238},n}^{New} + (1 - \omega) q_{U_{238},n}^{Old} \quad (22)$$

۳. بهینه سازی آبشارها

برای بهینه سازی آبشارها از الگوریتم PSO استفاده شده است. این الگوریتم، توسط جیمز کندی و راسل سی ابرهارت در سال ۱۹۹۵ معرفی گردید، در این الگوریتم با الگوگیری و شبیه سازی رفتار پرواز دسته جمعی (گروهی) پرندگان یا حرکت دسته جمعی (گروهی) ماهی ها بنا نهاده شده است [۱۵]. با تغییر پارامترهای ورودی نتایج مختلفی برای یک آبشار حاصل می گردد که برای مقایسه و تعیین جواب بهینه انتخاب یک تابع هدف وابسته به طبیعت مسأله امری ضروری است. تابع هدف عملکرد متغیرهای ورودی را مورد سنجش قرار می دهد و سبب می شود الگوریتم بهینه سازی بهترین مقادیر را برای پارامترها انتخاب نماید. یک عامل ضروری که در طراحی و شبیه سازی آبشارهای غنی سازی باید در نظر گرفته شود، ویژگی های المان جداسازی در آبشار (سانتریفیوژ)، از جمله فاکتور جداسازی آن است. در نتیجه، با تغییر سانتریفیوژ، عملکرد و پارامترهای عملیاتی آبشار به طور کامل تغییر خواهد کرد. با تغییر شرایط، از جمله نوع سانتریفیوژ، سطح مورد نیاز غنی سازی، مقدار محصول مورد نیاز، مقدار خوراک در دسترس، یا زمان عملیات، تمام پارامترهای بهینه سازی تغییر خواهند کرد. محققان بیشماری برای بهینه سازی آبشارهای سانتریفیوژ جهت جداسازی سیستم های دو جزئی و چند جزئی از الگوریتم بهینه سازی PSO استفاده کرده اند و قابلیت این الگوریتم را نشان داده اند. به عنوان مثال صفدری و همکاران، الگوریتم PSO را برای طراحی یک آبشار بهینه با حداکثر کار جداسازی در مقابل حداقل تعداد سانتریفیوژها به عنوان تابع هدف استفاده کرده اند [۱۰].





شکل ۳. نمودار مراحل بهینه‌سازی آبشارهای مخروطی و مربعی.

ماشین‌های سانتریفیوژ تغییر کرد و برای سانتریفیوژ نوع اول چیدمان بهینه ۱۵ مرحله با ۱۲ سانتریفیوژ در هر مرحله است در حالی‌که برای سانتریفیوژ نوع دوم، چیدمانی با ۱۲ مرحله و ۱۵ سانتریفیوژ در هر مرحله انتخاب گردید. لازم به ذکر است که مراحل بالاتر از ۳۶ مرحله به دلیل داشتن تعداد کم سانتریفیوژ در هر مرحله، حذف می‌گردد. بنابراین چیدمان‌های با تعداد مراحل بالا از نظر عملیاتی رد گردیدند.

جدول ۳. نتایج اعتبار سنجی کدهای مخروطی و مربعی

نتایج	تعداد مراحل	غناي محصول (%)	غناي پسماند (%)	ظرفيت جداسازی آبشار (gs ⁻¹)	مجموع شدت جریان‌های ورودی به مراحل (gs ⁻¹)
سانتریفیوژ نوع اول					
آقای بریسویچ و همکاران	۱۹	۲۹۴۴	۰.۳۲۳	۳,۱۷۶۲	۵۱۲,۴۴۰
کد مخروطی	۱۹	۳,۰۳۵	۰.۳۲۲	۳,۲۷۳۶	۵۰۸,۸۹۰
کد مربعی	۲۰	۲۹۴۴	۰.۳۲۳	۳,۰۰۱۱	۵۲۲,۳۵۰
سانتریفیوژ نوع دوم					
آقای بریسویچ و همکاران	۱۱	۳,۳۷۳	۰.۳۲۳	۳,۹۲۷۵	۲۰۱,۲۹۰
کد مخروطی	۱۱	۳,۳۶۲	۰.۳۲۴	۳,۹۲۷۴	۲۰۱,۹۱۰
کد مربعی	۱۲	۳,۳۷۳	۰.۳۲۳	۳,۵۲۱۰	۲۰۴,۶۳۰

۲. اعتبارسنجی کدهای مورد استفاده. بدین منظور کدهای مورد استفاده مخروطی و مربعی با نتایج کار تحقیقی آقای بریسویچ و همکاران مقایسه شده است. همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، نتایج کد مخروطی بسیار نزدیک به نتایج کار آقای بریسویچ و همکاران است. نتایج آبشار مربعی به دلیل تفاوت ماهیت آبشارهای مخروطی و مربعی است، با اختلاف معقولی از نتایج کار آقای بریسویچ و همکاران به دست آمده است.

۳. بهینه‌سازی آبشار مخروطی برای تولید اورانیم غنی‌شده با غنای ۴٪ درصد و تولید اورانیم غنی‌شده با سطوح غنای پایین‌تر (۳/۶، ۳/۳، ۳/۰، ۲/۴، ۲/۲ و ۱/۳ درصد) با روش رقیق‌سازی محصول با UF_6 طبیعی یا تهی‌شده. مشخصات چیدمان بهینه آبشار مخروطی در جدول ۴ ارائه شده است.

۴. تعیین چیدمان‌های مختلف آبشار مربعی با ۱۸۰ سانتریفیوژ نوع اول و دوم و بهینه‌سازی آن برای تولید اورانیم غنی‌شده با غنای ۴٪ درصد و سطوح غنای پایین‌تر به صورت مستقیم با بهینه‌سازی مجدد پارامترهای عملیاتی آبشار. نتایج بهینه‌سازی آبشار مربعی متشکل از سانتریفیوژهای نوع اول و دوم به ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.

همان‌طور که از جداول ۵ و ۶ مشاهده می‌گردد چیدمان بهینه با تغییر سانتریفیوژ به دلیل تفاوت خوراک ورودی به



جدول ۴. چیدمان‌های بهینه آبشارهای مخروطی برای تولید اورانیم با غنای ۴٫۰ درصد با دو نوع ماشین سانتریفیوژ

شماره مرحله	نوع سانتریفیوژ	
	نوع ۱	نوع ۲
	تعداد سانتریفیوژ در هر مرحله	
۱	۴	۸
۲	۶	۱۶
۳	۸	۲۰
۴	۱۰	۲۴
۵	۱۲	۲۸
۶	۱۴	۲۲
۷	۱۶	۱۸
۸	۱۶	۱۴
۹	۱۴	۱۰
۱۰	۱۲	۸
۱۱	۱۲	۶
۱۲	۱۰	۴
۱۳	۸	۲
۱۴	۸	
۱۵	۶	
۱۶	۶	
۱۷	۴	
۱۸	۴	
۱۹	۴	
۲۰	۲	
۲۱	۲	
۲۲	۲	

جدول ۵. چیدمان‌های بهینه آبشارهای مربعی با ۱۸۰ سانتریفیوژ نوع اول

تعداد مراحل	تعداد سانتریفیوژ در هر مرحله	غنای محصول (%)	غنای پسماند (%)	میزان خوراک (mgs ⁻¹)	برش آبشار	وضعیت
۱۸۰	۱	-	-	-	-	غیر قابل قبول
۹۰	۲	-	-	-	-	غیر قابل قبول
۶۰	۳	-	-	-	-	غیر قابل قبول
۴۵	۴	-	-	-	-	غیر قابل قبول
۳۶	۵	۴٫۰	<۰٫۳	۱۸٫۳۵	۰٫۱۱۲	قابل قبول
۳۰	۶	۴٫۰	<۰٫۳	۲۰٫۴۵	۰٫۱۱۲	قابل قبول
۲۰	۹	۴٫۰	<۰٫۳	۳۱٫۷۵	۰٫۱۳۲	قابل قبول
۱۸	۱۰	۴٫۰	<۰٫۳	۳۱٫۳۵	۰٫۱۳۰	قابل قبول
۱۵	۱۲	۴٫۰	<۰٫۳	۴۰٫۷۵	۰٫۱۱۶	قابل قبول و منتخب
۱۲	۱۵	۴٫۰	<۰٫۳	۳۱٫۶۰	۰٫۱۱۴	قابل قبول
۱۰	۱۸	<۴٫۰	>۰٫۳	-	-	غیر قابل قبول
۹	۲۰	<۴٫۰	>۰٫۳	-	-	غیر قابل قبول
۶	۳۰	<۴٫۰	>۰٫۳	-	-	غیر قابل قبول
۵	۳۶	<۴٫۰	>۰٫۳	-	-	غیر قابل قبول
۴	۴۵	<۴٫۰	>۰٫۳	-	-	غیر قابل قبول
۳	۶۰	<۴٫۰	>۰٫۳	-	-	غیر قابل قبول
۲	۹۰	<۴٫۰	>۰٫۳	-	-	غیر قابل قبول
۱	۱۸۰	<۴٫۰	>۰٫۳	-	-	غیر قابل قبول



۵. نتایج و بحث

۱.۵ نتایج آبخارهای مخروطی و مربعی سانتریفیوژ نوع اول

نتایج به‌دست آمده از مقایسه آبخارهای مخروطی متقارن و مربعی با استفاده از ۱۸۰ دستگاه سانتریفیوژ نوع اول در جدول ۷ نشان می‌دهد که جهت تولید اورانیم غنی‌شده در سال اول، تنها آبخار مربعی می‌تواند به‌صورت مستقیم اورانیم موردنیاز با غناهای مختلف را با یک چیدمان واحد تولید نماید. برای تولید اورانیم غنی‌شده با چیدمان واحد توسط آبخارهای مخروطی، امکان تولید مستقیم محصول با غناهای مختلف وجود ندارد و استفاده از عملیات رقیق‌سازی محصول با غنای بالاتر با اورانیم طبیعی یا تهی‌شده امری ضروری است. این امر به‌دلیل انعطاف‌پذیر نبودن آبخار مخروطی است.

هم‌چنین تغییرات برش هر مرحله برای آبخارهای مخروطی متقارن و مربعی متشکل از سانتریفیوژهای نوع اول جهت تولید اورانیم غنی‌شده مورد نیاز سال اول در شکل ۴ نشان داده شده است. تغییرات برش آبخارهای مخروطی متقارن نسبت به آبخار مربعی ناچیز است. بنابراین در صورت استفاده از آبخارهای مخروطی نیاز به تنظیم برش مراحل نمی‌باشد.

۱.۱.۵ تعداد کل سانتریفیوژهای نوع اول مورد نیاز برای تولید اورانیم

غنی‌شده در سال اول رآکتور قدرت

در جدول ۸ تعداد آبخارها و سانتریفیوژهای نوع اول مورد نیاز برای تولید اورانیم غنی‌شده سال اول ارائه شده است. تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ نوع اول استفاده شده در آبخار مخروطی متقارن (۴۱۴۰۰ عدد) نسبت به آبخارهای مربعی (۶۷۵۰۰ عدد) در حدود ۳۸٫۶ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

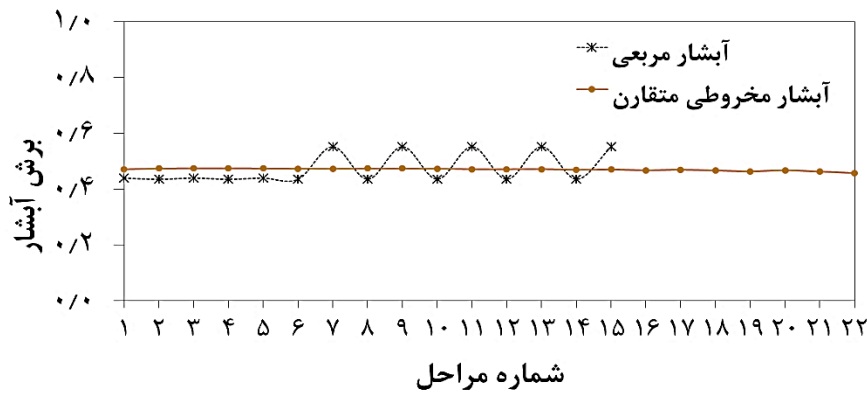
جدول ۶. چیدمان‌های بهینه آبخارهای مربعی با ۱۸۰ سانتریفیوژ نوع دوم

وضعیت	برش آبخار	میزان خوراک (mgs ⁻¹)	غنای پسماند (%)	غنای محصول (%)	تعداد سانتریفیوژ در هر مرحله	تعداد مراحل
غیرقابل قبول	-	-	-	-	۱	۱۸۰
غیرقابل قبول	-	-	-	-	۲	۹۰
غیرقابل قبول	-	-	-	-	۳	۶۰
غیرقابل قبول	-	-	-	-	۴	۴۵
قابل قبول	۰٫۱۱۲	۱۱۴٫۰۰	<۰٫۳	۴٫۰	۵	۳۶
قابل قبول	۰٫۱۱۲	۱۳۲٫۴۰	<۰٫۳	۴٫۰	۶	۳۰
قابل قبول	۰٫۱۱۲	۱۷۸٫۵۰	<۰٫۳	۴٫۰	۹	۲۰
قابل قبول	۰٫۱۱۲	۲۲۳٫۰۰	<۰٫۳	۴٫۰	۱۰	۱۸
قابل قبول	۰٫۱۱۵	۲۴۱٫۰۰	<۰٫۳	۴٫۰	۱۲	۱۵
قابل قبول و منتخب	۰٫۱۱۷	۲۶۹٫۲۰	<۰٫۳	۴٫۰	۱۵	۱۲
غیرقابل قبول	۰٫۱۱۶	۲۶۵٫۹۰	<۰٫۳	۴٫۰	۱۸	۱۰
غیرقابل قبول	۰٫۱۱۲	۲۶۳٫۹۰	<۰٫۳	۴٫۰	۲۰	۹
غیرقابل قبول	-	-	>۰٫۳	<۴٫۰	۳۰	۶
غیرقابل قبول	-	-	>۰٫۳	<۴٫۰	۳۶	۵
غیرقابل قبول	-	-	>۰٫۳	<۴٫۰	۴۵	۴
غیرقابل قبول	-	-	>۰٫۳	<۴٫۰	۶۰	۳
غیرقابل قبول	-	-	>۰٫۳	<۴٫۰	۹۰	۲
غیرقابل قبول	-	-	>۰٫۳	<۴٫۰	۱۸۰	۱

جدول ۷. مقایسه آبخارهای بهینه مخروطی و مربعی از سانتریفیوژ نوع اول

ظرفیت جداسازی سانتریفیوژ (kg Uyr ⁻¹)	غنای پسماند (%)	غنای محصول (%)	غنای سوخت (%)	برش آبخار	مرحله ورود خوراک	نرخ خوراک (mgs ⁻¹)	تعداد مراحل	نوع آبخار
			۴٫۰					
			۳٫۶					
			۳٫۳					
۷٫۶۲۰	۰٫۲۹۰	۴٫۰	۳٫۰	۰٫۱۱۳۹	۸	۷۰٫۷۰	۲۲	مخروطی متقارن
			۲٫۴					
			۲٫۲					
			۱٫۳					
۴٫۵۵۰	۰٫۲۷۹	۴٫۰	۴٫۰	۰٫۱۱۶۰	۶	۴۰٫۷۵		
۴٫۶۹۱	۰٫۲۶۸	۳٫۶	۳٫۶	۰٫۱۳۳۰	۷	۴۱٫۷۰		
۴٫۸۰۰	۰٫۲۶۵	۳٫۳	۳٫۳	۰٫۱۴۷۰	۷	۴۳٫۶۵		
۴٫۸۷۹	۰٫۲۵۸	۳٫۰	۳٫۰	۰٫۱۶۵۰	۷	۴۵٫۱۵	۱۵	مربعی
۴٫۹۱۶	۰٫۲۳۴	۲٫۴	۲٫۴	۰٫۲۲۰۰	۷	۴۶٫۲۵		
۴٫۸۸۹	۰٫۲۲۴	۲٫۲	۲٫۲	۰٫۲۴۵۰	۷	۴۷٫۲۲		
۴٫۰۲۰	۰٫۱۶۲	۱٫۳	۱٫۳	۰٫۴۸۰۰	۷	۴۹٫۰۰		





شکل ۴. توزیع برش مراحل آبشارهای مخروطی و مربعی سانتریفیوژ نوع اول.

جدول ۸. تعداد کل سانتریفیوژهای نوع اول مورد نیاز برای تأمین اورانیوم غنی شده در سال اول رآکتور قدرت

نوع آبشار	غناي سوخت (%)	مقدار اورانیوم همگرا قابل برد مورد نیاز رآکتور (kg)	غناي محصول تولیدی (%)	مقدار اورانیوم همگرا قابل برد طبیعی (kg)	محصول تولیدی هر آبشار (kg)	تعداد آبشارهای مورد نیاز	تعداد سانتریفیوژ مورد نیاز	ظرفیت جداسازی هر آبشار (kg Uyr ⁻¹)	ظرفیت جداسازی کل آبشارها (kg Uyr ⁻¹)
مخروطی متقارن	۴۰	۱۷۸۸۹	۰	۰	۲۵۴	۷۱	۱۲۷۸۰	۹۷۳۸۴	۳۱۵۴۶۸
	۳۶	۶۲۰۹	۳۵	۳۵	۲۵۴	۲۲	۳۹۶۰	۳۰۱۷۵	
	۳۳	۵۶۰	۶۹	۶۹	۲۵۴	۲	۳۶۰	۲۷۴۲	
	۳۰	۲۳۰۲۰	۴۰	۱۱۱	۲۵۴	۶۳	۱۱۳۴۰	۸۶۴۱۱	
	۲۴	۶۴۸	۲۴۱	۲۴۱	۲۵۴	۲	۳۶۰	۲۷۴۲	
	۲۲	۲۶۹۰۷	۳۰۷	۳۰۷	۲۵۴	۴۸	۸۶۴۰	۶۵۸۳۷	
	۱۳	۳۰۷۵۱	۱۱۶۴	۱۱۶۴	۲۵۴	۲۲	۳۹۶۰	۳۰۱۷۵	
مربعی	۴۰	۱۷۸۸۹	۴۰	۰	۱۴۹	۱۲۰	۲۱۶۰۰	۹۸۲۸۰	۳۱۴۶۱۸
	۳۶	۶۲۰۹	۳۶	۳۶	۱۷۵	۳۶	۶۴۸۰	۳۰۳۹۸	
	۳۳	۵۶۰	۲۳	۲۳	۲۰۲	۳	۵۴۰	۲۵۹۲	
	۳۰	۲۳۰۲۰	۳۰	۰	۲۳۵	۹۸	۱۷۶۴۰	۸۶۰۶۶	
	۲۴	۶۴۸	۲۴	۲۴	۳۲۱	۲	۳۶۰	۱۷۷۰	
	۲۲	۲۶۹۰۷	۲۲	۲۲	۳۶۵	۷۴	۱۳۳۲۰	۶۵۱۲۱	
	۱۳	۳۰۷۵۱	۱۳	۱۳	۷۴۲	۴۲	۷۵۶۰	۳۰۳۹۱	

ضروری است. این امر به دلیل انعطاف پذیر نبودن آبشار مخروطی است.

همچنین منحنی تغییرات برش هر مرحله برای آبشارهای مخروطی متقارن و مربعی متشکل از سانتریفیوژهای نوع دوم جهت تولید اورانیوم غنی شده مورد نیاز سال اول در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که از شکل مذکور مشاهده می شود تغییرات برش آبشارهای مخروطی متقارن نسبت به آبشار مربعی ناچیز است. بنابراین در صورت استفاده از آبشارهای مخروطی نیاز به تنظیم برش مراحل نمی باشد. اما برای آبشارهای مربعی تنظیم برش مراحل در طول آبشار الزامی است.

۲.۵ نتایج آبشارهای مخروطی و مربعی سانتریفیوژ نوع دوم نتایج به دست آمده از مقایسه آبشارهای مخروطی متقارن و مربعی با استفاده از ۱۸۰ دستگاه سانتریفیوژ نوع دوم در جدول ۹ نشان می دهد که برای تولید اورانیوم غنی شده در سال اول، تنها آبشار مربعی می تواند به صورت مستقیم اورانیوم مورد نیاز با غناهای مختلف را با یک چیدمان واحد تولید نماید. برای تولید اورانیوم غنی شده با چیدمان واحد توسط آبشارهای مخروطی برای این رآکتور، امکان تولید مستقیم محصول با غناهای مختلف وجود ندارد و استفاده از عملیات رقیق سازی محصول با غنای بالاتر با اورانیوم طبیعی یا تهی شده امری

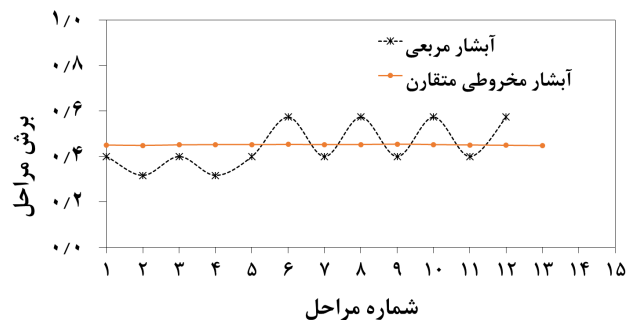


جدول ۹. مقایسه آبشارهای بهینه مخروطی و مربعی سانتریفیوژ نوع دوم

نوع آبشار	تعداد مراحل	نرخ خوراک (mgs ⁻¹)	مرحله ورود خوراک	برش آبشار	غناي سوخت (%)	غناي محصول (%)	غناي پسماند (%)	ظرفیت جداسازی سانتریفیوژ (kg U ₃ O ₈ / yr)
مخروطی متقارن	۱۳	۳۵۶/۰۰	۵	۰/۱۱۸۴	۴/۰	۴/۰	۰/۲۷۰	۴۱/۴۷۰
				۳/۶	۳/۶	۰/۲۶۸	۳۰/۵۶۶	
				۳/۳	۳/۳	۰/۲۶۱	۳۰/۴۸۹	
				۲/۴	۲/۴	۰/۲۵۴	۳۰/۲۷۹	
				۲/۲	۲/۲	۰/۲۳۲	۲۹/۴۰۳	
مربعی	۱۲	۲۶۹/۲۰	۵	۰/۱۱۷۰	۴/۰	۴/۰	۰/۲۷۵	۳۰/۵۷۲
				۰/۱۳۳۰	۳/۶	۳/۶	۰/۲۶۸	۳۰/۵۶۶
				۰/۱۴۸۰	۳/۳	۳/۳	۰/۲۶۱	۳۰/۴۸۹
				۰/۱۶۶۰	۳/۰	۳/۰	۰/۲۵۴	۳۰/۲۷۹
				۰/۲۲۰۰	۲/۴	۲/۴	۰/۲۳۲	۲۹/۴۰۳
مربعی	۱۲	۲۷۵/۲۰	۵	۰/۲۴۵۰	۲/۲	۲/۲	۰/۲۲۷	۲۸/۸۷۴
				۰/۲۴۵۰	۲/۲	۲/۲	۰/۲۲۷	۲۸/۸۷۴
				۰/۴۸۰۰	۱/۳	۱/۳	۰/۱۶۶	۲۳/۱۷۲

۳.۵ آبشار پیشنهادی برای تولید اورانیم غنی‌شده سال اول

نتایج به دست آمده از مقایسه آبشارهای مخروطی متقارن و مربعی از جداول ۸ و ۱۰ نشان می‌دهد که برای تأمین اورانیم غنی‌شده سال اول رآکتور قدرت، آبشار مربعی می‌تواند با یک چیدمان واحد تمام غناهای مورد نیاز را تولید نمایند اما برای تولید اورانیم غنی‌شده به کمک آبشارهای مخروطی با یک چیدمان واحد، عملیات رقیق‌سازی با اورانیم طبیعی یا تهی‌شده امری اجتناب‌ناپذیر است. بیش‌تر بودن ظرفیت جداسازی تک‌ماشین و راندمان جداسازی آبشارهای مخروطی متقارن نسبت به آبشارهای مربعی و هم‌چنین تغییرات جزئی برش مراحل در طول آبشار مخروطی متقارن باعث شده برای تولید اورانیم با غناهای مختلف در سال اول یک رآکتور قدرت، آبشار مخروطی متقارن همراه با عملیات رقیق‌سازی گزینه بهتری باشد. هم‌چنین با توجه به کاهش تعداد آبشارهای مخروطی و سانتریفیوژهای مورد استفاده در آن نسبت به آبشار مربعی برای تولید اورانیم غنی‌شده، خود یک دلیل دیگر بر ارجحیت آبشار مخروطی متقارن نسبت به آبشار مربعی می‌تواند باشد. البته قطعیت این نتیجه‌گیری منوط به محاسبه هزینه‌های ثابت و عملیاتی "واحد اختلاط" و بیش‌تر بودن آن نسبت به هزینه‌های مرتبط با "آبشارهای مربعی مازاد" استفاده شده نسبت به مخروطی است.



شکل ۵. توزیع برش مراحل آبشارهای مخروطی و مربعی سانتریفیوژ نوع دوم.

۱.۲.۵ تعداد کل سانتریفیوژهای نوع دوم مورد نیاز برای تولید اورانیم غنی‌شده در سال اول رآکتور قدرت

در جدول ۱۰ تعداد آبشارها و سانتریفیوژهای نوع دوم مورد نیاز برای تأمین اورانیم غنی‌شده سال اول رآکتور قدرت با استفاده از ماشین سانتریفیوژ نوع دوم ارائه شده است. تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ نوع دوم استفاده شده در آبشار مخروطی متقارن (۸۸۲۰ عدد) نسبت به آبشارهای مربعی (۱۱۳۴۰ عدد) حدوداً ۲۲/۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد. از مقایسه این مقدار کاهش با عدد محاسبه شده برای ماشین نوع اول (۳۸/۷ درصد کاهش) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ظرفیت جداسازی تک ماشین اختلاف تعداد کل آبشارهای مربعی با مخروطی کم می‌شود.



جدول ۱۰. تعداد کل سانتریفیوژهای نوع دوم مورد نیاز برای تأمین اورانیم غنی‌شده در سال اول رآکتور قدرت

نوع آبشار	غنی سوخت (%)	مقدار اورانیم هگزافلوراید مورد نیاز رآکتور (kg)	غنی محصول تولیدی (%)	مقدار اورانیم هگزافلوراید طبیعی (kg)	محصول تولیدی هر آبشار (kg)	تعداد آبشارهای مورد نیاز	تعداد سانتریفیوژ مورد نیاز	ظرفیت جداسازی هر آبشار (kg Uyr ⁻¹)	ظرفیت جداسازی کل آبشارها (kg Uyr ⁻¹)
مخروطی متقارن	۴٫۰	۱۷۸۸۹	۰	۱۳۲۹	۱۴	۲۵۲۰	۱۰۴۵۰۴		
	۳٫۶	۶۲۰۹	۱۸۴	۱۳۲۹	۵	۹۰۰	۳۷۳۲۳		
	۳٫۳	۵۶۰	۳۵۹	۱۳۲۹	۱	۱۸۰	۷۴۶۵		
	۳٫۰	۲۳۰۲۰	۴٫۰	۵۸۱	۱۳	۲۳۴۰	۹۷۰۴۰	۳۶۵۷۶۵	
	۲٫۴	۶۴۸	۱۲۵۹	۱۳۲۹	۱	۱۸۰	۷۴۶۵		
	۲٫۲	۲۶۹۰۷	۱۶۰۷	۱۳۲۹	۱۰	۱۸۰۰	۷۴۶۴۶		
	۱٫۳	۳۰۷۵۱	۶۰۹۳	۱۳۲۹	۵	۹۰۰	۳۷۳۲۳		
مربعی	۴٫۰	۱۷۸۸۹	۴٫۰	۹۹۳	۱۸	۳۲۴۰	۹۹۰۵۳		
	۳٫۶	۶۲۰۹	۳٫۶	۱۱۴۰	۶	۱۰۸۰	۳۳۰۱۱		
	۳٫۳	۵۶۰	۳٫۳	۱۲۷۵	۱	۱۸۰	۵۴۸۸		
	۳٫۰	۲۳۰۲۰	۳٫۰	۰	۱۴۴۱	۱۶	۲۸۸۰	۸۷۲۰۴	۳۳۰۹۸۱
	۲٫۴	۶۴۸	۲٫۴	۱۹۲۰	۱	۱۸۰	۵۲۹۳		
	۲٫۲	۲۶۹۰۷	۲٫۲	۲۱۵۳	۱۳	۲۳۴۰	۶۷۵۶۵		
	۱٫۳	۳۰۷۵۱	۱٫۳	۴۱۳۶	۸	۱۴۴۰	۳۳۳۶۸		

۶. نتیجه‌گیری

در مقایسه با این روش حدود ۲۲ تا ۳۹ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

۳. مقایسه نتایج به‌دست آمده از دو ماشین سانتریفیوژ در آبشارهای مخروطی و مربعی نشان می‌دهد که هر چه میزان فاکتور جداسازی و خوراک بهینه ماشین سانتریفیوژ ظرفیت جداسازی تک‌ماشین بالاتر باشد میزان مصرف اورانیم طبیعی به‌منظور رقیق‌سازی اورانیم غنی‌شده تولیدی از آبشار مخروطی افزایش می‌یابد. هم‌چنین اختلاف تعداد کل ماشین‌های مورد نیاز مربعی و مخروطی کاهش می‌یابد.

توزیع برش مراحل در طول آبشارهای مخروطی متقارن ناچیز است و نیازی به تنظیم در حین کار ندارد، اما تغییرات برش مراحل برای برخی از مراحل در آبشارهای مربعی زیاد است و نیاز به تنظیم در حین کار دارد.

الگوریتم PSO از قابلیت خوبی برای طراحی و بهینه‌سازی آبشارهای متقارن و مربعی برای غنی‌سازی برخوردار است.

در این تحقیق برای تولید اورانیم غنی‌شده برای سال اول بارگذاری سوخت یک رآکتور قدرت VVER-۱۰۰۰ از دو نوع آبشار بهینه مخروطی متقارن و مربعی متشکل از دو نوع سانتریفیوژ گازی با فاکتورهای جداسازی متفاوت استفاده شده است. براساس نتایج به دست آمده از این کار موارد زیر قابل استنتاج می‌باشد:

۱. روش ارجح برای تولید اورانیم غنی‌شده با سطوح مختلف غنی‌سازی برای یک رآکتور قدرت در سال اول بارگذاری سوخت، استفاده از آبشارهای مخروطی متقارن همراه با عملیات رقیق‌سازی محصولات تولید شده با اورانیم طبیعی یا تهی‌شده است. در این روش از تعداد ماشین سانتریفیوژ گازی کم‌تری استفاده می‌شود.

۲. در روش استفاده از آبشارهای مربعی نیازی به رقیق‌سازی محصول با اورانیم طبیعی یا تهی‌شده نیست. تمام محصولات غنی‌شده مستقیماً توسط آبشار تولید می‌شوند، اما تعداد کل آبشارها و سانتریفیوژهای گازی استفاده شده در آبشار مخروطی

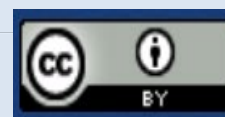


مراجع

- Mokhov V.A. Advanced designs of VVER reactor plant. International topical meeting on VVER-2010 - experience and perspectives. *Czech Republic*. 2010.
- Bilodid Y, Fridman E, Lötsch T. X2 VVER-1000 benchmark revision: Fresh HZP core state and the reference Monte Carlo solution. *Annals of Nuclear Energy*. 2020;144:107558.
- Benedict M, Pigford T.H, Levi H.W. Nuclear chemical engineering, 2nd edition. ed. McGraw-Hill Education. *New York*. 1981.
- Sulaberidze G.A, Borisevich V.D, Wood H.G. Ideal and Optimum Cascades. *Sep. Sci. Technol*. 2008;43(13):3377-3392.
- Azizov T.E, Smirnov A.Y, Sulaberidze G.A. Optimization of a Square Cascade of Centrifuges for Separation of Multicomponent Mixtures of Stable Isotopes. *At Energy*. 2020;128(5):291-296.
- Khooshechin S, Mansourzadeh F, Imani M, Safdari J, Mallah M.H. Optimization of flexible square cascade for high separation of stable isotopes using enhanced PSO algorithm. *Prog. Nucl. Energy*. 2021;140:103922.
- Mirmohammadi S.L, Ezazi F, Mallah M.H, Safdari J. Selection of the best 3-section squared-off cascade to enrichment of the ^{126}Xe and ^{131}Xe using particle swarm optimization algorithm. *Prog. Nucl. Energy*. 2022;146:104153.
- 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.
- Ezazi F, Mallah M.h, Safdari J, Mirmohammadi S.L. Performance comparison of the optimized k-section squared-off cascades for enrichment of ^{124}Te using two meta-heuristic paradigms. *Prog. Nucl. Energy*. 2022;145:104105.
- 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.
- Olander D.R. The theory of uranium enrichment by the gas centrifuge. *Prog. Nucl. Energy*. 1981;8(1):1-33.
- Borisevich V, Sulaberidze G, Zeng S. New approach to optimize Q-cascades. *Chem. Eng. Sci*. 2011;66(3): 393-396.
- Mansourzadeh F, Safdari J, Khamseh A.G.H, Norouzi A, Khajenouri M. Comparison of optimum tapered cascade and optimal square cascade for separation of xenon isotopes using enhanced TLBO algorithm. *Sep. Sci. Technol*. 2018;53(13):2074-2087.
- 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.
- 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.
- Ezazi F, Mallah M.H, Sabet J.K, Norouzi A. A new method for multicomponent mixture separation cascade optimization using artificial bee colony algorithm. *Prog. Nucl. Energy*. 2020;124:103371.
- 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.
- Palkin V. Optimization of a centrifuge cascade for separating a multicomponent mixture of isotopes. *Atomic Energy*. 2013;115(2):109-115.

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، اعزازی، فرزانه. (۱۴۰۳)، حذف واحد اختلاط در تأسیسات غنی‌سازی و تولید اورانیم غنی‌شده برای سال اول یک رآکتور هسته‌ای قدرت با استفاده از آبشارهای مربعی بهینه. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۱۰۸(۲)، ۹-۲۰. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1566>

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1566.html

