مقایسه تعداد آبشار مخروطی نامتقارن بهینه ۲-up, 1-down با آبشار مخروطی متقارن بهینه برای تولید سوخت یک نیروگاه قدرت در سال اول بار گذاری

INC29-1049

سیده لیلا میرمحمدی*[۱]، سید جابر صفدری[۱]، محمدحسن ملاح[۱]، فرزانه اعزازی[۱]

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران، ایران

چکیده:

در این تحقیق، عملکرد آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن جهت تأمین اورانیوم غنی‌شده برای تولید سوخت هسته‌ای برای اولین سیکل یک راکتور قدرت نوعی با غناهای متفاوت موردبررسی قرار گرفته است. کدهای نرم‌افزاری "STC-PSOA" و "ASTC-PSOA" به ترتیب برای بهینه‌سازی پارامترهای آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن متناسب با تابع هدف حداکثر کردن نرخ جریان محصول آبشارها و ظرفیت غنی‌سازی سانتریفیوژ توسعه داده شده است. قیود در نظر گرفته شده برای این الگوریتم غناهای اورانیوم مورد استفاده در سوخت راکتور قدرت در اولین سیکل (۳/۷٪و ۳/۳٪) و پسماند با غنای کمتر از ۰/۳۰٪ است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن امکان تولید محصولات غنی‌شده نیز با چیدمان واحد وجود دارد، اما انجام عملیات رقیق‌سازی و اختلاط حسب مورد با اورانیوم طبیعی یا تهی شده امری اجتناب‌ناپذیر است. همچنین نتایج به دست آمده ۵۸٪ کاهش تعداد آبشارهای مخروطی متقارن نسبت به آبشارهای مخروطی نامتقارن برای تولید سالانه اورانیوم غنی شده راکتور قدرت را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: آبشار مخروطی متقارن، آبشار مخروطی نامتقارن، سوخت راکتور قدرت در اولین سیکل، الگوریتم بهینه‌سازی PSO

A comparison of optimal asymmetrical tapered cascades, 2-up, 1-down, with optimal symmetrical conical cascades for a power plant's first year of operation

Seyedeh Leila Mirmohammadi[1]*, Seyed Jaber Safdari[1], Mohammad Hasan Mallah[1]

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

Abstract:

In this research, the performance of symmetric and asymmetric tapered cascades with different enrichment levels was examined for the purpose of producing nuclear fuel for a typical power reactor's first cycle. "STC-PSOA" and "ASTC-PSOA" software codes have been developed to optimize the parameters of the symmetric and asymmetric tapered cascades, respectively, according to the objective function of maximizing the product flow rate of the cascades and the enrichment capacity of the centrifuge. The limits considered for this algorithm are uranium enrichments used in power reactor fuel in the first cycle (3.7% and 3.3%) and waste with an enrichment of less than 0.30%. It is possible to produce enriched products in a single arrangement using symmetric and asymmetric tapered cascades. However, dilution and mixing with natural or depleted uranium are inevitable. Also, the obtained results show a 58% reduction in the number of symmetric tapered cascades compared to asymmetric tapered cascades for the annual production of enriched uranium in the power reactor.

Keywords: Symmetric tapered cascades, Asymmetric tapered cascades, Power reactor fuel, Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO)

۱. مقدمه

از آنجا که توسعه راکتورهای قدرت در جهان رو به افزایش است، تقاضای زیادی برای اورانیوم غنی‌شده در جهان وجود دارد. اورانیوم طبیعی حاوی حدود ۹۹/۲۸٪ اورانیوم-۲۳۸ و ۰/۷۲٪ اورانیوم-۲۳۵ شکافت‌پذیر است. غنای طبیعی اورانیوم-۲۳۵ برای نیروگاه‌های هسته‌ای قدرت کم است و باید بین ۳-۵٪ باشد[۳-۱]. در حال حاضر آبشارهای سانتریفیوژ گازی، ارزان‌ترین و پیشروترین فرایند صنعتی غنی‌سازی اورانیوم می‌باشند که در این فرایند ساختار آبشار نقش مهمی در برآورده کردن اهداف غنی‌سازی دارد[۶]. طراحی نیروگاه‌های VVER-1000 تقریباً از سال ۱۹۷۰ میلادی شروع شد و پس از ده سال اولین واحد آن در شهر نوواوارونژ در کشور روسیه به بهره‌برداری رسید. این راکتور از نوع آب سبک تحت فشار بوده و دارای توان حرارتی ۳۰۰۰MWth می‌باشد. نیروگاه‌های هسته‌ای VVER-1000 مدل‌های مختلفی از قبیل V-302 ، V-320، V-446 و... دارد، که از اکسید اورانیوم غنی‌شده با غناهای مختلف در مجتمع‌های سوخت خود استفاده می‌کنند[۵-۴]. به‌منظور رساندن غنای اورانیوم از غنای طبیعی به سطوح موردنظر، نیاز به غنی‌سازی می‌باشد. آبشارهای غنی‌سازی سانتریفیوژ گازی، گزینه غالب برای این منظور بوده و کشورهای مختلفی از این روش استفاده می‌نمایند[۶-۷]. انواع مختلف آبشارها اعم از مخروطی متقارن و نامتقارن، مربعی و مربعی شده جهت غنی‌سازی ایزوتوپ‌های پایدار عناصر مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱۴-۶]. در آبشار مخروطی، نرخ جریان ورودی به مراحل متغیر بوده و از مرحله ورود خوراک در میانه آبشار، به سمت دو انتهای محصول و پسماند آبشار روند کاهشی است و به تناسب، تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ مراحل نیز کاهش می‌یابد. این نوع آبشار بیشتر به‌منظور غنی‌سازی ایزوتوپ‌های اورانیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد و از راندمان جداسازی نسبتاً بالایی برخوردار است. در آبشار مربعی، نرخ جریان ورودی به مراحل با یکدیگر برابر بوده و بنابراین تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ در هر مرحله یکسان می‌باشد. با توجه به جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر، آبشارهای مربعی قابلیت بهره‌برداری در نرخ‌های پایین جریان خوراک پایین و تنظیم ضریب برش آبشار در حالت‌های مختلف را دارا است که اصطلاحاً از انعطاف‌پذیری بالایی در بهره‌برداری برخوردار هستند. معمولاً آبشارهای نوع مربعی مناسب‌ترین آبشار برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار می‌باشند چون ایزوتوپ‌های پایدار بسیار متنوع بوده و نحوه جداسازی هرکدام متفاوت از دیگری می‌باشد.

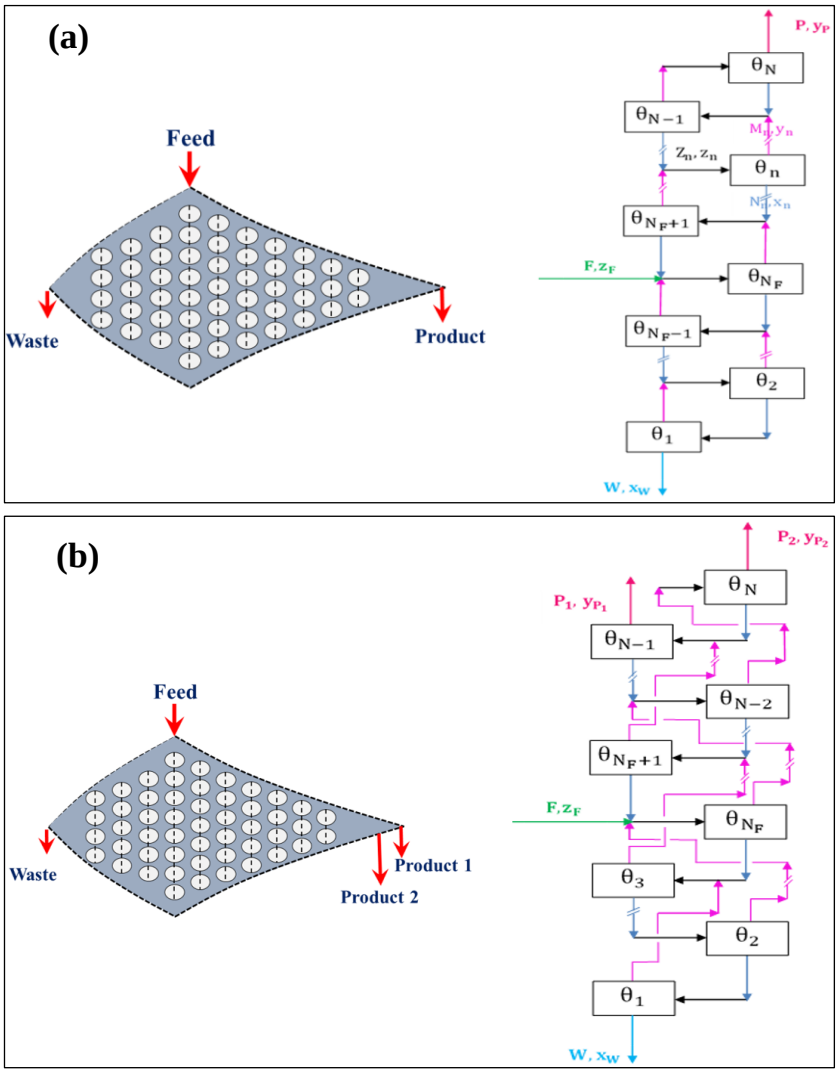
به‌منظور تولید حداقل دو محصول اورانیوم با غناهای متفاوت جهت استفاده به‌عنوان سوخت نیروگاه‌های قدرت، راهکارهای مختلفی وجود دارد. یکی از این راهکارها به‌کارگیری آبشار مخروطی می‌باشد[۸-۶]. از آنجایی که آبشار مخروطی برخلاف آبشار مربعی انعطاف‌پذیری لازم را ندارد، جهت اورانیوم با غناهای مختلف، طراحی‌های مختلفی موردنیاز بوده و بنابراین از یک زیرساخت واحد نمی‌توان بهره برد. بنابراین اگر لازم باشد که با یک زیرساخت ثابت کلیه غناهای مختلف را به دست آورد، می‌بایست ابتدا محصولی که بالاترین غنا را دارد، تولید کرد و محصول با غنای پایین‌تر را با عملیات رقیق‌سازی به دست آورد. بالا رفتن هزینه‌های جاری و ثابت و احتمال ورود ناخالصی به محصول از معایب واحد رقیق‌سازی خواهد بود. از طرفی با استفاده از یک زیرساخت ثابت و ایجاد کمترین تغییرات مانند تغییر مرحله ورود جریان خوراک به آبشار، همواره نمی‌توان به غنای محصول پایین‌تر دست یافت و در بسیاری موارد به‌منظور رسیدن به غنای موردنظر محصول، غلظت پسماند تهی شده آبشار بهینه نخواهد بود. همچنین در صورت ایجاد تغییرات در زیرساخت‌های ثابت مانند تغییر مرحله ورود جریان خوراک به آبشار، میزان انحراف در توان جداسازی آبشار نباید بیشتر از ۲ الی ۳ درصد باشد که این امر همواره محقق نخواهد شد. برای هر دو گروه آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن موارد فوق‌الذکر می‌بایست مدنظر قرار گیرد. در مورد آبشارهای مخروطی نامتقارن یک مزیت نسبی وجود دارد و آن، امکان تولید بیش از یک محصول با غناهای مختلف از یک آبشار می‌باشد. در مورد این نوع آبشارها نیز شایان ذکر است که همواره نمی‌توان به‌صورت مستقیم به غناهای مدنظر در یک آبشار دست یافت و در بعضی موارد لازم است جهت تولید محصول با غنای پایین‌تر حتماً رقیق‌سازی صورت گیرد. در این تحقیق برای اولین بار، با هدف به‌کارگیری یک زیرساخت واحد برای تولید اورانیوم با غناهای موردنیاز در اولین سیکل یک راکتور قدرت، عملکرد دو نوع آبشار مخروطی متقارن و نامتقارن بهینه با ۱۷۴ سانتریفیوژ معمولی با فاکتور جداسازی ۱/۴ مقایسه شده است[۱۵]. برای بهینه‌سازی آبشارها از الگوریتم PSO استفاده شده است.

۲. مدل‌سازی آبشارها

همان‌طور که بیان گردید، دو مورد از آبشارهای غنی‌سازی اورانیوم آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن می‌باشند، در ادامه مدل‌سازی این دو نوع آبشار ارائه می‌گردد.

۲,۱. مدل‌سازی آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن

شکل ۱ شماتیک یک آبشار مخروطی متقارن (a) که ساده‌ترین شکل عملی یک آبشار با جریان برگشتی می‌باشد و آبشار مخروطی نامتقارن 2-up، 1-down (b) 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. M_n،Z_n و N_n نیز به‌ترتیب نرخ جریان خوراک، جریان محصول و پسماند هر مرحله با غناهای z_n، y_n، x_n می‌باشند. یک آبشار مخروطی نامتقارن آبشارهای مخروطی با بیش از یک جریان محصول یا پسماند را آبشار نامتقارن p-up, q-down می‌نامند. در این حالت آبشار به تعداد p جریان محصول و به تعداد q جریان پسماند خواهد داشت. لازم به ذکر است که مقادیر p و q در آبشار مخروطی نامتقارن نمی‌تواند برابر و یا هر دو زوج باشد. آبشار مخروطی نامتقارن (b)، جریان محصول هر مرحله به دو مرحله بعد و جریان پسماند هر مرحله نیز بلافاصله به مرحله قبلی برگردانده می‌شود، بنابراین در این حالت دو محصول نهایی و یک پسماند نهایی حاصل می‌گردد. در این آبشار نیز، F، نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار با غنای z_F، نرخ جریان‌های محصولات و پسماند به ترتیب با نمادهای P_1، P_2 و W و غناهای y_{p_1}، y_{p_2} و x_W نشان داده می‌شود. M_n،Z_n و N_n نیز به‌ترتیب نرخ جریان خوراک، جریان محصول و پسماند هر مرحله با غناهای z_n، y_n، x_n می‌باشند[۸-۶].



شکل ۱: شماتیکی از یک آبشار مخروطی متقارن (a) و مخروطی نامتقارن (b)

معادلات آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که معادلات و مجهولات مربوط به غلظت هر دو آبشار یکسان است و تعداد آن برابر با $3NN_c$ است. این معادلات عبارتند از[۸-۶]:

جدول ۱: معادلات و مجهولات آبشار متقارن و نامتقارن

	Constant equations and unknowns for two type of cascades				
Relevant to the concentration	**Item**	**Equations**	**Number of equations**	**Unknowns**	**Number of unknowns**
	1	$Z_n z_n - M_n y_n - N_n x_n = {}^*\delta F z_F$	NN_c	z_n	NN_c
	2	$\frac{y_n}{x_n} / \frac{1-y_n}{1-x_n} = \alpha_0^{M_{238}-M_{235}}$	$N(N_c-1)$		
	3	$\sum_{i=1}^{N_c} z_{i,n} = \sum_{i=1}^{N_c} y_{i,n} = \sum_{i=1}^{N_c} x_{i,n} = 1 \quad N_c=1,2$	N	y_n	NN_c
	4	$Z_1 z_1 - N_2 x_2 = {}^*\delta F z_F$	NN_c	x_n	NN_c
	5	$Z_n z_n - M_{n-2} y_{n-2} - N_{n+1} x_{n+1} = {}^*\delta F z_F$			
	6	$Z_N z_N - M_{N-2} y_{N-2} = {}^*\delta F z_F$			
	Total		$3NN_c$	**Total**	$3NN_c$
	Asymmetric cascade				
elevan to the	**Item**	**Equations**	**Number of equations**	**Unknowns**	**Number of unknowns**

	1	$Z_n - M_n - N_n = {}^*\delta F$	N	Z_n	N
	2	$M_n - \theta_n Z_n = 0$	N	M_n	N
	3	$P_1 - \theta_{1Cascade1} F = 0$	1	N_n	N
	4	$P_2 - \theta_{2Cascade2} F = 0$	1	θ_n	N
	5	$W - N_1 = 0$	1	$\theta_{1Cascade}$	1
	6	$P_1 - M_{N-1} = 0$	1	$\theta_{2Cascade}$	1
	7	$P_2 - M_N = 0$	1	P_1	1
	8	$Z_1 - N_2 = {}^*\delta F$	N	P_2	1
	9	$Z_n - M_{n-2} - N_{n+1} = {}^*\delta F$		W	1
	10	$Z_N - M_{N-2} = {}^*\delta F$			
	Total		**3N + 5**	**Total**	**4N + 5**

Symmetric cascade

	Item	Equations	Number of equations	Unknowns	Number of unknowns
Relevant to the flow	1	$Z_n - M_n - N_n = {}^*\delta F$	N	Z_n	N
	2	$M_n - \theta_n Z_n = 0$	N	M_n	N
	3	$P - \theta_{Cascade} F = 0$	1	N_n	N
	4	$W - N_1 = 0$	1	θ_n	N
	5	$P - M_N = 0$	1	$\theta_{Cascade}$	1
	6	$Z_1 - N_2 = {}^*\delta F$	N	P	1
	7	$Z_n - M_{n-1} - N_{n+1} = {}^*\delta F$		W	1
	8	$Z_n - M_{N-1} = {}^*\delta F$			
	Total		**3N + 3**		**4N + 3**

$* \text{ the Kronecker function } (\delta) = \begin{cases} 1 & n = N_F \\ 0 & n \neq N_F \end{cases}$

مطابق جدول ۱، تعداد مجهولات آبشار مخروطی متقارن و نامتقارن به ترتیب برابر است با $3NN_c + 4N + 3$ و $3NN_c + 4N + 5$. تعداد معادلات هر دو آبشار نیز به ترتیب برابر است با $3NN_c + 3N + 3$ و $3NN_c + 3N + 5$. در هر دو آبشار مخروطی متقارن و نامتقارن تعداد معادلات به تعداد N معادله کمتر از مجهولات هستند. به‌منظور حل معادلات و دستیابی به مقادیر مجهولات، 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.[۸-۶]

۳. بهینه‌سازی آبشارها

برای بهینه‌سازی 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 شبیه‌سازی رفتار پرواز دسته‌جمعی (گروهی) پرندگان یا حرکت دسته‌جمعی (گروهی) ماهی‌ها بنا نهاده شده است. 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 موردسنجش قرار می‌دهد و سبب می‌شود الگوریتم بهینه‌سازی بهترین مقادیر را برای پارامترها انتخاب نماید[۱۶]. تابع هدف مورد استفاده در این پژوهش به فرم زیر است :

$$f(P, W, F, SWU) = c_1 \frac{P}{F} + c_2 \frac{F}{W} + c_3 SWU \qquad (۲)$$

که در این معادلات c_1، c_2 و c_3ضرایب وزنی مرتبط با آیتم‌های تابع هدف هستند. غناهای ۳/۷۰٪ و ۳/۳۰٪ برای جریان محصول و غنای ۰/۳۰٪> در جریان پسماند به‌عنوان قیود در الگوریتم استفاده شده‌اند. در این راستا، کدهای

نرم‌افزاری "STC-PSOA" و"ASTC-PSOA" به ترتیب برای بهینه‌سازی پارامترهای آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن بر اساس تابع هدف فوق‌الذکر استفاده شده‌اند.

۴. روش کار

از آنجا که قرار است عملکرد آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن در شرایطی یکسان برای تولید اورانیوم با غناهای مشخص مقایسه گردند، مراحل کار به دو مرحله اصلی تقسیم می‌گردد. مرحله اول مشخص کردن انتخاب متغیرهای ورودی ثابت برای بررسی عملکرد آبشارها است که در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که اطلاعات ماشین سانتریفیوژ فرضی می‌باشد.

جدول ۲: متغیرهای ورودی ثابت آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن

Item	Parameters	Sign	Value
1	Feed Concentration (%)	$z_{^{235}UF_6}$	0.711
		$z_{^{238}UF_6}$	99.289
2	Molecular Weight ($gmol^{-1}$)	$M_{^{235}UF_6}$	349
		$M_{^{238}UF_6}$	352
3	Separation factor (α)	(α)	1.4
4	Minimum Feed Rate of Gas Centrifuges	$F_{Single\ (Min)}$ (ghr^{-1})	5.50
5	Optimum Feed Rate of Gas Centrifuges	$F_{Single\ (Opt)}$ (ghr^{-1})	20.60
6	Maximum Feed Rate of Gas Centrifuges	$F_{Single\ (Max)}$ (ghr^{-1})	25.62
7	Number of Gas Centrifuges	(GC)	174

لازم به ذکر است که غناهای اورانیوم مورد استفاده در سوخت راکتور قدرت در اولین سیکل ۳/۷۰% و ۳/۳۰% و پسماند با غنای کمتر از 0.30% برای طراحی و بهینه‌سازی آبشارها به‌عنوان قید در نظر گرفته شده است. مرحله دوم مشخص کردن انتخاب پارامترهای هدف برای بهینه‌سازی آبشارها است که در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: متغیرهای ورودی برای بهینه‌سازی آبشارها

Asymmetric Tapered Cascade			Symmetric Tapered Cascade		
Item	Parameter	Sign	Item	Parameter	Sign
1	Feed (ghr^{-1})	F	1	Feed(ghr^{-1})	F
2	Cascade Cut1	$\theta_{Cas1.}$	2	Cascade Cut	$\theta_{Cas.}$
3	Cascade Cut2	$\theta_{Cas2.}$	3	Number of stages	N
4	Number of stages	N	4	Number of Centrifuges in each Stage	GC_{Stage}
5	Number of Centrifuges in each Stage	GC_{Stage}	5	Feed of Centrifuge (ghr^{-1})	F_{Single}
6	Feed of Centrifuge (ghr^{-1})	F_{Single}			

۵. نتایج و بحث

در این پژوهش قرار است از یک آبشار برای تولید اورانیوم موردنیاز اولین سیکل یک راکتور قدرت، با غناهای ۳/۷۰% و ۳/۳۰% استفاده شود. برای این کار ابتدا ساختار یک آبشار بهینه برای تولید اورانیوم ۳/۷۰% موردنیاز راکتور مذکور تعیین می‌گردد و برای تولید غنای اورانیوم ۳/۳۰% موردنیاز نیز از آن استفاده خواهد شد. چیدمان بهینه این دو آبشار در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: چیدمان بهینه آبشارهای مخروطی متقارن و نامتقارن برای تولید اورانیوم با غنای 3.70%

Item	Cascade	N	Arrangement																				
1	Symmetric Tapered	15	Stages																				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15						
			Gas Centrifuges																				
			6	10	14	18	22	24	20	16	12	10	8	6	4	2	2						
2	Asymmetric Tapered	21	Stages																				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
			Gas Centrifuges																				
			4	6	10	12	12	14	16	18	14	12	10	10	8	6	6	4	4	2	2	2	2

همچنین نتایج حاصل برای غنی‌سازی آبشارها برای تمام غناهای مورد نیاز راکتور در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد میزان توان جداسازی آبشارهای مخروطی متقارن نسبت به آبشار مخروطی نامتقارن حدود ۳۲٪ بیشتر است:

جدول ۵: نتایج آبشارهای بهینه مخروطی و مربعی برای تولید اورانیوم با غناهای راکتور قدرت X_2 VVER-1000

Item	Cascade	N	F (ghr^{-1})	N_F	$\theta_{Cas.}$	Fuel Enrichment Level (%)	y_P (%)	x_W (%)	SWU/GC (kg U/yr)
1	Symmetric Tapered	15	72.60	6	0.131	3.70	3.708	0.260	2.45
			72.60	6	0.131	3.30	3.708	0.260	2.45
Item	**Cascade**	**N**	**F (ghr^{-1})**	**N_F**	**$\theta_{Cas1.}$ $\theta_{Cas1.}$**	**Fuel Enrichment Level (%)**	**y_{P1} (%) y_{P2} (%)**	**x_W (%)**	**SWU/GC (kg U/yr)**
2	Asymmetric Tapered	21	72.9	8	0.042 0.089	3.70 / 3.30	3.708 3.333	0.290	1.860

مطابق با جدول ۵، در صورت استفاده از هر دو آبشار مخروطی متقارن و نامتقارن نیاز به عملیات رقیق‌سازی با اورانیوم طبیعی یا تهی شده می‌باشد. همچنین با تغییر مرحله ورود خوراک غنای ۳/۱۵% تولید می‌گردد که کمتر از غنای ۳%/۳۰ موردنیاز است، بنابراین از همان آبشار مخروطی متقارن باید استفاده کرد. در جدول ۶ تعداد آبشارها و سانتریفیوژهای موردنیاز برای تأمین اورانیوم غنی‌شده سالانه یک راکتور قدرت با استفاده از سانتریفیوژ استفاده شده ($\alpha = 1.4$) نشان داده شده است. تعداد کل سانتریفیوژهای استفاده شده در آبشارهای مخروطی متقارن نسبت به آبشارهای مخروطی نامتقارن حدود ۵۸٪ کاهش را نشان می‌دهد که خود دلیل بر ارجحیت آبشار مخروطی متقارن نسبت به آبشار مخروطی نامتقارن می‌باشد.

جدول ۶: تعداد آبشارها و سانتریفیوژهای موردنیاز برای تأمین اورانیوم غنی‌شده سالانه یک راکتور قدرت

Cascade Type	Enrichment Level Required (%)	Reactor Annual UF_6 Requirement (kg)	Enrichment Level Obtained by Cascade (%)	Annual Natural UF_6 Requirement (kg)	UF_6 Produced Annually by One Cascade (kg)	Number of Cascades Required (-)	Number of GCs Required (-)	Total Number of GCs Used (-)	Separation Capacity of All Cascades (kg SWU/year)	Natural UF_6 Used Annually to dilute the product (kg)
Symmetric Tapered	3.70	21129	3.708	0.02	83.31	254	44196	55854	108280.2	1.40
	3.30	5692	3.708	1.38	83.31	67	11658			
Asymmetric Tapered	3.70	21129	3.708	-	26.82	771	134154	134154	243526.4	0.72
	3.30	5692	3.333	0.72	56.83					

مطابق نتایج جدول۶، به دلیل اینکه آبشار مخروطی نامتقارن دو محصول تولید می‌کند و معیار چیدمان بهینه غنای بالاتر است، بنابراین با ۷۷۱ عدد آبشار مخروطی نامتقارن حدود ۴۳۹۲۲/۴ kg اورانیوم با غنای ۳/۳۰% تولید می‌گردد که تنها ۵۶۹۲kg آن سالیانه برای سوخت راکتور موردنظر مصرف می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد هم مصرف SWU بسیار بالاتری دارد و هم به دلیل تولید اضافی اورانیوم با غنای ۳/۳۰% صرفه اقتصادی ندارد. همین دلایل خود دلیل بر ارجحیت آبشار مخروطی متقارن نسبت به آبشار مخروطی نامتقارن می‌باشد.

۳. نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای تولید اورانیوم (با غناهای مختلف) سالانه موردنیاز یک راکتور قدرت در سیکل اول، از دو نوع آبشار بهینه مخروطی متقارن و مخروطی نامتقارن با فاکتورهای جداسازی ثابت استفاده شده است. تعداد ماشین‌های به‌کار

رفته در هر نوع آبشار برابر بوده و عملیات غنی‌سازی برای تولید هر محصول با غنای بالاتر با استفاده از آن در شرایط بهینه بدون تغییر چیدمان انجام می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده از این کار موارد ذیل قابل نتیجه‌گیری می‌باشند :

۱ -روش اول و ارجح برای تولید سالانه اورانیوم غنی شده با غناهای مختلف برای یک راکتور قدرت استفاده از آبشارهای مخروطی متقارن است و حسب مورد باید از عملیات رقیق‌سازی محصول تولیدی با اورانیوم طبیعی یا تهی شده استفاده نمود. همچنین در این روش از کمترین تعداد آبشار و سانتریفیوژ استفاده می‌شود و ظرفیت جداسازی به ازای یک سانتریفیوژ در آبشار مخروطی متقارن نسبت به آبشارهای مخروطی نامتقارن حدود ۳۲٪ بیشتر است.

۲- روش دوم برای تولید اورانیوم غنی شده سالانه با غناهای مختلف برای یک راکتور قدرت استفاده از آبشارهای مخروطی نامتقارن است. در این روش باید از اختلاط دو محصول تولیدی و عملیات رقیق‌سازی با اورانیوم طبیعی یا تهی شده حسب مورد استفاده شود و تعداد کل آبشارها و سانتریفیوژهای مورد استفاده در روش اول نسبت به این روش حدود ۵۸٪ کاهش را نشان می‌دهد.

۴. مراجع

[1] World Nuclear Association. (2010). World nuclear power reactors & uranium requirements. Facts & Figures.

[2] https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/the-nuclear-fuel-cycle.php

[3] Khttab, K. "Nuclear Power Reactors in the World." Atom and Development 33, no. 2 (2021): 43-55. (International Atomic Energy Agency)

[4] Mokhov, V.A., 2004. Advanced designs of VVER reactor plant.

[5] Khan, S.A., Jagannathan, V., Pal, U., Karthikeyan, R. and Srivastava, A., 2011. Need for high temperature nuclear data library for LWR design computations. Journal of the Korean Physical Society, 59(2), pp.1073-1075.

[6] Benedict, M., Pigford, T.H. and Levi, H.W., 1981. Nuclear chemical engineering. McGraw-Hill Education.

[7] Olander, D.R., 1981. The theory of uranium enrichment by the gas centrifuge. Progress in Nuclear Energy, 8(1), pp.1-33.

[8] G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich, and , H.G. Wood, Ideal and optimum cascades. Sep. Sci. Tech., 43(13), 3377-3392. (2008); https://doi.org/10.1080/01496390802282354.

[9] Azizov, T.E., Smirnov, A.Y. and Sulaberidze, G.A., 2020. Optimization of a square cascade of centrifuges for separation of multicomponent mixtures of stable isotopes. Atomic Energy, 128(5), pp.291-296.

[10] Ezazi, F., Imani, M., Safdari, J., Mallah, M.H. and Mirmohammadi, S.L., 2022. An application of nature-inspired paradigms in the overall optimization of square and squared-off cascades to separate a middle isotope of tellurium. Annals of Nuclear Energy, 171, p.109033.

[11] F. Ezazi, M.H. Mallah, J.K. Sabet, and A. Norouzi, A new method for multicomponent mixture separation cascade optimization using an artificial bee colony algorithm. Prog. Nucl. Energy. 124, 103371. (2020); https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103371.

[12] S. Khooshechin, F. Mansourzadeh, M. Imani, J. Safdari, and M.H. Mallah, Optimization of flexible square cascade for high separation of stable isotopes using enhanced PSO algorithm. Prog. Nucl. Energy. 140, p.103922. (2021); https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103922.

[13] J. Safdari, A. Norouzi, and R. Tumari, Using a real coded PSO algorithm in the design of a multi-component countercurrent cascade. Sep. Sci. Technol. 52(18), 2855-2862. (2017); https://doi.org/10.1080/01496395.2017.1375524.

[14] Mirmohammadi, S.L., Ezazi, F., Mallah, M.H. and Safdari, J., 2022. Selection of the best 3-section squared-off cascade to enrichment of the 126Xe and 131Xe using particle swarm optimization algorithm. Progress in Nuclear Energy, 146, p.104153.

[15] Mercurio, G., P. Peerani, P. Richir, W. Janssens, and G. Eklund. "Modeling of UF6 enrichment with gas centrifuges for nuclear safeguards activities." In AIP Conference Proceedings, vol. 1479, no. 1, pp. 201-204. American Institute of Physics, 2012.

[16] Elbert.R, Kennedy.J, anew optimizer using particle swarm theory, in: proceeding of sixth international symposim on micro macine and human science,pp 39-43