بررسی عملکرد آبشارهای مخروطی نامتقارن به‌منظور تولید اورانیوم غنی‌شده برای سوخت راکتور قدرت VVER-1000

INC29-1045

سیده‌لیلا میرمحمدی*[۱]، سیدجابرصفدری[۱]، محمدحسن ملاح[۱] ، فرزانه اعزازی

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

چکیده:

در این تحقیق، آبشارهای مخروطی نامتقارن جهت تأمین اورانیوم غنی‌شده برای تولید سوخت هسته‌ای برای اولین سیکل راکتور قدرت VVER-1000 X_2 با غناهای متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. کد نرم‌افزاری "ASTC-PSO" برای بهینه‌سازی پارامترهای آبشار مخروطی 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 الگورتیم غناهای اورانیوم مورد استفاده در سوخت راکتور قدرت در اولین سیکل (۴۰٪، ۳/۶٪، ۳/۳٪، ۳/۰٪، ۲/۴٪، ۲,۲٪ و ۱/۳٪) و پسماند با غنای کمتر از ۰/۳۰٪ است. نتایج نشان می‌دهد درصورت استفاده از آبشارهای مخروطی نامتقارن امکان تولید محصولات غنی‌شده با چیدمان واحد وجود دارد اما انجام عملیات رقیق‌سازی و اختلاط حسب مورد با اورانیوم طبیعی، تهی‌شده و یا محصولات تولیدی آبشار باهم امری اجتناب ناپذیر است. همچنین مطابق نتایج حاصل آبشار مخروطی نامتقارن قابلیت خوبی برای غناهای میانی دارد، اما برای بزرگترین و کوچک‌ترین غنا نیاز به رقیق‌سازی زیاد یا کار جداسازی بسیار بالا دارد.

کلیدواژه‌ها: آبشارهای مخروطی نامتقارن، سوخت راکتور قدرت VVER-1000 X_2 در اولین سیکل، الگوریتم بهینه‌سازی PSO

Performance Review of Optimal Asymmetric Tapered Cascades for Production of Enriched Uranium for VVER-1000 X_2 Power Reactor Fuel

S. L. Mirmohammadi[1]*, S. J. Safdari[1], M. H. Mallah[1], F. Ezazi[1]

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

Abstract:

This study examines the performance of the optimal asymmetric tapered cascades for providing different enrichment levels of uranium for the X2 VVER1000 power reactor fuel. It was developed in this study software "ASTC-PSOA" for optimizing the parameters of the asymmetric tapered cascade according to the objective function of maximizing the product rate of the cascades and the enrichment capacity of the gas centrifuges. The restrictions considered for this algorithm are the enrichment levels of uranium used in the fuel of the power reactors in the first cycle (4.0%, 3.6%, 3.3%, 3.0% 2.4%, 2.2%, 1.3%), and the concentration of the waste flow is lower than 0.3%. By using asymmetric tapered cascades, it is possible to produce enriched products in a single arrangement. However, it is inevitable that dilution operations and mixing have to be done with natural, depleted uranium, or cascade production products. In addition, the asymmetric tapered cascade has reasonable capability for medium enrichment levels. However, for the largest and smallest quantities, it requires a lot of dilution or a very high separation work unit.

Keywords: Asymmetric tapered cascades, VVER-1000 X_2 Power reactor fuel, Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO)

۱. مقدمه

به‌دلیل محدود بودن منابع طبیعی انرژی در جهان، گزینه‌های جدیدتر منابع انرژی از قبیل انرژی خورشیدی، بادی، آبی، هسته‌ای و ... مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. در این بین، تولید انرژی از مواد هسته‌ای یکی از گزینه‌های مهم برای جایگزینی منابع انرژی بوده و هم اکنون 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 اورانیوم با غنای ۳-۵% استفاده می‌کنند[۱]. 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-۳۰۲، V-۳۲۰، V-۴۴۶ و ... دارد که از اکسید اورانیوم غنی‌شده با غناهای مختلف در مجتمع‌های سوخت خود استفاده می‌کنند[۲]. در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰، یک نمونه آزمایشی از VVER-1000 به نام راکتور قدرت X_2 VVER-1000 در توسط لوچ و همکاران پیشنهاد شد[۳]. این نمونه بر اساس داده‌های عملیاتی VVER-1000 واحد دوم نیروگاه هسته‌ای Khmelnitsky واقع در اوکراین بود. این واحد در سال ۲۰۰۴ عملیاتی شد و یکی از اولین واحدهای VVER-1000 بود که به طور کامل با نوع سوخت TVSA (مخفف روسی مجتمع سوخت ساخت شرکت TVEL) تازه پر شده بود. نام "X_2" برگرفته از حرف"X" که رونویسی اوکراینی حرف "Kh" و "2" شماره واحد نیروگاه است. غنای اورانیوم در سوخت TVSA مورد استفاده در اولین سیکل این راکتور قدرت در جدول ۱ ارائه شده است[۳].

جدول ۱: مشخصات سوخت TVSA مورد استفاده در اولین سیکل راکتور قدرت X_2 VVER-1000

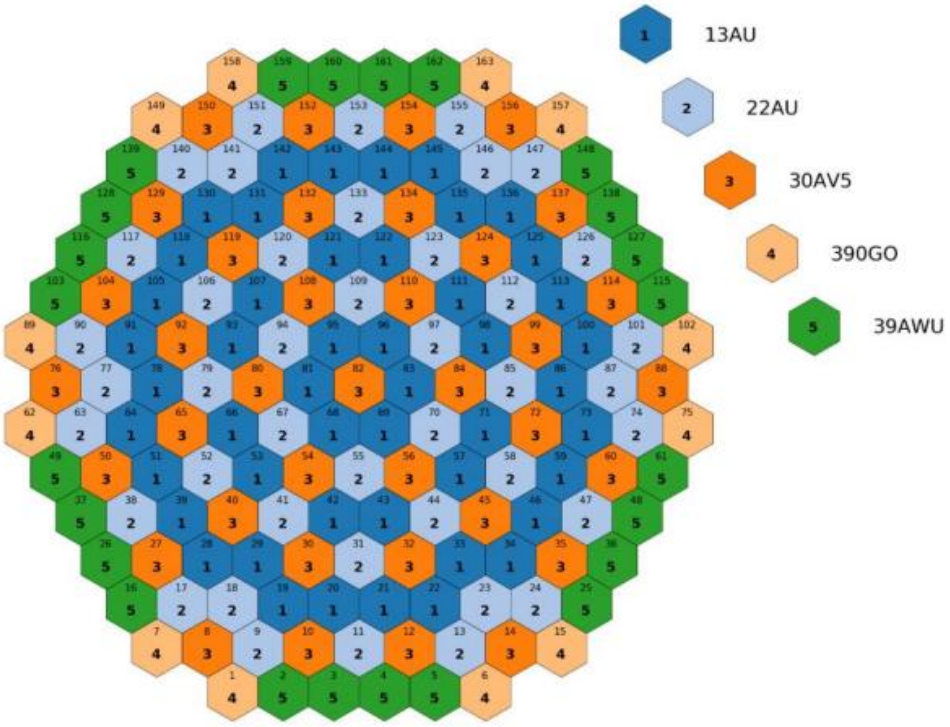
Item	Enrichment level required (%)	Annual UF_6 Requirement (Kg)
1	4.0	17888
2	3.6	4583
3	3.3	566
4	3.0	23019
5	2.4	647
6	2.2	26905
7	1.3	30749

همچنین مجتمع سوخت مورد استفاده در اولین سوخت این نیروگاه، در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در مجتمع سوخت میله‌های معرفی شده 13AU، 22AU و ... مشخصات متفاوتی دارند که در متن مرجع ارائه شده است[۳].

به منظور رساندن غنای اورانیوم از غنای طبیعی به سطوح موردنظر، نیاز به غنی‌سازی می‌باشد که روش سانتریفیوژ، روش متداول و با صرفه اقتصادی در جهان است. سانتریفیوژها به تنهایی نمی‌توانند ^{۲۳۵}U را از غلظت طبیعی خود که حدود ۰/۷۲٪ است به غنای موردنیاز برای تأمین سوخت یک راکتور هسته‌ای برسانند[۵-۴]. علاوه بر این، میزان تولید محصول یک سانتریفیوژ در مقایسه با مصرف یک راکتور بسیار کوچک است. بدین منظور لازم است سانتریفیوژها به صورت موازی جهت تولید میزان محصول مطلوب به یکدیگر وصل شوند (مرحله) و به منظور افزایش غنا لازم است مراحل، به صورت سری پشت سر هم قرار داده شوند که اصطلاحاً این ساختار، به آبشار موسوم است. انواع مختلف آبشارها اعم از مخروطی متقارن و نامتقارن، مربعی و مربعی شده جهت غنی‌سازی ایزوتوپ‌های پایدار عناصر مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱۲-۴]. 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 سانتریفیوژهای مراحل نیز کاهش می‌یابد. به منظور تولید حداقل دو محصول اورانیوم با غناهای متفاوت جهت استفاده به عنوان سوخت نیروگاه‌های قدرت، راهکارهای مختلفی وجود دارد. یکی از این راهکارها بکارگیری آبشار مخروطی می‌باشد[۶-۴]. از آنجایی که آبشار مخروطی انعطاف‌پذیری لازم را ندارد، جهت اورانیوم با غناهای مختلف، طراحی‌های مختلفی مورد نیاز بوده و بنابراین از

یک زیرساخت واحد نمی‌توان بهره برد. بنابراین اگر لازم باشد که با یک زیر ساخت ثابت کلیه غناهای مختلف را بدست آورد، می‌بایست ابتدا محصولی که بالاترین غنا را دارد، تولید کرد و محصول با غنای پایین‌تر را با عملیات رقیق‌سازی به‌دست 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 زیرا در بسیاری موارد به منظور رسیدن به غنای مورد نظر محصول، غلظت پسماند تهی‌شده آبشار بهینه نخواهد بود و یا میزان نرخ خوراک سانتریفیوژها بسیار پایین است. 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. 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 حتما رقیق‌سازی صورت گیرد.

شکل ۱: شماتیکی از مجتمع سوخت راکتور قدرت X_2 VVER-1000

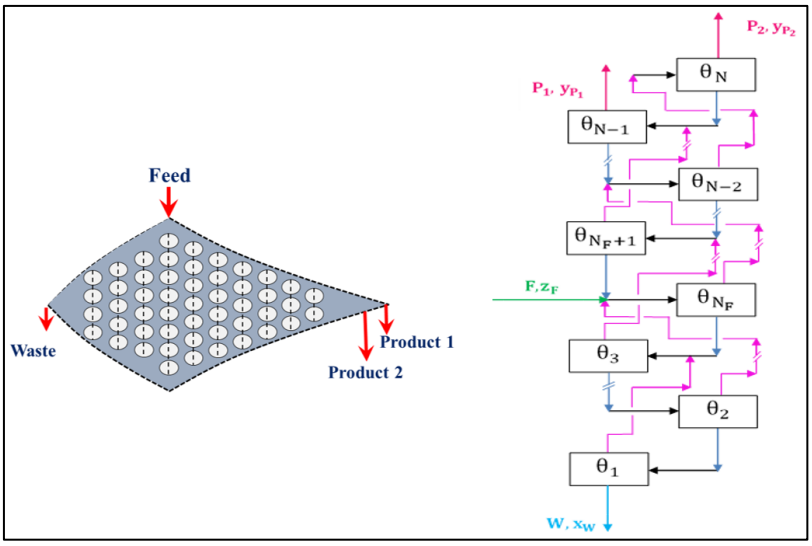


در این‌تحقیق برای اولین بار، با هدف به‌کارگیری یک زیر ساخت واحد برای تولید اورانیوم با غناهای مورد نیاز در اولین سیکل راکتور قدرت X_2 VVER-1000، عملکرد آبشار مخروطی نامتقارن بهینه با 180 سانتریفیوژ معمولی با فاکتور جداسازی 1.4 مقایسه شده است[۱۳]. برای بهینه‌سازی آبشار از الگوریتم PSO استفاده شده است.

۲. مدلسازی آبشارهای مخروطی نامتقارن

شکل ۲ شماتیک یک آبشار مخروطی نامتقارن (a)را نشان می‌دهد. 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. شکل ۱ شماتیک یک آبشار مخروطی نامتقارن 2-up، 1-down را نشان می‌دهد. در این آبشار، 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. [۴-۵].



شکل ۲: شماتیکی از یک آبشار مخروطی نامتقارن

در جدول ۲ معادلات و مجهولات یک آبشار مخروطی متقارن نشان داده شده است و تعداد معادلات به تعداد N معادله کمتر از مجهولات هستند. به منظور 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.

جدول ۲: معادلات و مجهولات آبشار مخروطی نامتقارن

	Item	Equations	Number	Unknowns	Number
Respect to the Concentration	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**	$3NN_c$
Respect to the Flow	**Item**	**Equations**	**Number**	**Unknowns**	**Number**
	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	$\theta_{Cas.1}$	1
	6	$P_1 - M_{N-1} = 0$	1	$\theta_{Cas.2}$	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**	$4N+5$

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

۳. بهینه‌سازی آبشارهای مخروطی نامتقارن

برای بهینه سازی آبشارها از الگوریتم PSO استفاده شده است. این الگوریتم، توسط جیمز کندی و راسل سی ابرهارت در سال 1995 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 مورد سنجش قرار می‌دهد و سبب می‌شود الگوریتم بهینه سازی بهترین مقادیر را برای پارامترها انتخاب نماید [۱۵]. تابع هدف مورد استفاده در این پژوهش به فرم رابطه ۲ 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_3 ضرایب وزنی مرتبط با آیتم‌های تابع هدف هستند. غناهای ارائه شده در جدول ۱ برای جریان محصول و غنای <0.30% در جریان پسماند به‌عنوان قیود در الگوریتم استفاده شده اند. در این راستا، کد نرم‌افزاری "ASTC-PSOA" برای بهینه سازی پارامترهای آبشارهای مخروطی نامتقارن بر اساس تابع هدف فوق‌الذکراستفاده شده‌اند.

۴. روش کار

مراحل کار به دو مرحله اصلی تقسیم می‌گردد. مرحله اول مشخص کردن انتخاب متغیرهای ورودی ثابت برای بررسی عملکرد آبشارهای مخروطی نامتقارن است که در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: متغیرهای ورودی ثابت آبشار مخروطی 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
		$M_{^{235}UF_6}$	352
3	Separation factor (α)	(α)	1.4
4	Minimum Feed Rate of Gas Centrifuges	$F_{Single\ (Min)}$ (ghr^{-1})	5.00
5	Optimum Feed Rate of Gas Centrifuges	$F_{Single\ (Opt)}$ (ghr^{-1})	20.50
6	Maximum Feed Rate of Gas Centrifuges	$F_{Single\ (Max)}$ (ghr^{-1})	25.62
7	Number of Gas Centrifuges	(GC)	180

لازم به ذکر است که غناهای اورانیوم مورد استفاده در سوخت راکتور قدرت در اولین سیکل (۰/۴٪، ۳/۶٪، ۳/۰٪، ۲/۴٪، ۲/۲٪، ۱/۳ ٪) و پسماند با غنای کمتر از ۰/۳۰٪ برای طراحی و بهینه سازی آبشارها به عنوان قید در نظر گرفته شده است. مرحله دوم مشخص کردن انتخاب پارامترهای هدف برای بهینه‌سازی آبشار مخروطی نامتقارن است که در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: متغیرهای ورودی برای بهینه‌سازی آبشار مخروطی نامتقارن

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

۵. نتایج و بحث

در این پژوهش قرار است از یک آبشار برای تولید اورانیوم مورد نیاز اولین سیکل راکتور قدرت X_2 VVER-1000، غناهای مختلف استفاده شود. برای این کار ابتدا ساختار یک آبشار بهینه برای تولید اورانیوم مورد نیاز راکتور مذکور با بالاترین غنا تعیین می‌گردد و برای تولید سایر غناهای اورانیوم مورد نیاز نیز از آن استفاده خواهد شد. بالاترین غنای اورانیوم مورد نیاز راکتور در اولین سیکل ۴/۰٪ است. چیدمان بهینه این آبشار در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: چیدمان بهینه آبشار مخروطی نامتقارن برای تولید اورانیوم با غنای 4.0%

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

همچنین نتایج حاصل برای غنی‌سازی آبشارمخروطی نامتقارن برای تمام غناهای مورد نیار راکتور در جدول ۶ ارائه شده است:

جدول ۶: نتایج آبشارهای بهینه مخروطی نامتقارن برای تولید اورانیوم با غناهای راکتور قدرت X_2 VVER-1000

N	F (ghr^{-1})	N_F	$\theta_{Cas1.}$	$\theta_{Cas2.}$	Fuel Enrichment Level (%)	y_{P1} (%)	y_{P2} (%)	x_W (%)	SWU/GC (kg U/yr)
22	72.00	8	0.038	0.080	4.000	4.130	3.708	0.291	2.10
	68.20	9	0.045	0.096	3.600	3.708	3.333	0.260	2.16
	57.50	10	0.054	0.113	3.300	3.333	2.990	0.230	1.95
	57.50	10	0.054	0.113	3.000	3.333	2.990	0.230	1.95
	36.50	13	0.085	0.179	2.400	2.400	2.150	0.170	1.38
	36.50	13	0.085	0.179	2.200	2.400	2.150	0.170	1.38
	36.50	13	0.085	0.179	1.300	2.400	2.150	0.170	1.38

نتایج به‌دست آمده از عملکرد آبشارهای مخروطی نامتقارن با استفاده از ۱۸۰ دستگاه سانتریفیوژ در جدول ۶ نشان می‌دهد که برای تأمین اورانیوم غنی‌شده راکتور مذکور، با چیدمان واحد توسط آبشارهای مخروطی نامتقارن برای این راکتور، امکان تولید مستقیم محصول با غناهای مختلف وجود ندارد و استفاده از عملیات رقیق‌سازی محصولات با غنای بالاتر با اورانیوم طبیعی یا تهی‌شده و یا مخلوط کردن محصولات، امری ضروری است. در جدول ۷ میزان کار جداسازی و مقدار اورانیوم طبیعی برای تأمین اورانیوم غنی‌شده سالانه راکتور قدرت X_2 VVER-1000 با استفاده از آبشار مخروطی نامتقارن نشان داده شده است.

جدول ۷: میزان کار جداسازی و اورانیوم طبیعی جهت رقیق‌سازی اورانیوم غنی‌شده سالانه راکتور قدرت X_2 VVER-1000

Enrichment Level Required (%)	Reactor Annual UF_6 Requirement (kg)	Enrichment Level Obtained by Cascade (%)		Annual Natural UF_6 Requirement by One Cascade (kg)	UF_6 Produced Annually by One Cascade (kg)	Separation Capacity of One Cascade (kg SWU/year)	Separation Capacity of All Cascades (kg SWU/year)	Natural UF_6 Used Annually to dilute the product of One Cascade (kg)
4.00	17888	4.130	3.708	-	34.64	195426.0	340977.6	96.68
3.60	4583	3.708	3.333	-	53.85	33436.8		
3.30	565.73	3.333	2.990	1.04	55.43	12987.0		
3.00	23019	3.333	2.990	-	117.25	1755.0		
2.40	647	2.400	2.150	-	25.73	6210.0		
2.20	26905	2.400	2.150	13.04	183.31	36514.8		
1.30	30749	2.400	2.150	82.59	139.83	54648.0		

همانطور که از جدول ۷ مشاهده می‌گردد، به دلیل اینکه هر آبشار قابلیت تولید دو محصول را دارا می‌باشد، برای تولید سوخت با غناهای ۴/۰٪، ۳/۶٪، ۳/۰٪، ۲/۴٪ نیاز به رقیق‌سازی با UF_6 طبیعی نیست و می‌توان با مخلوط کردن دو محصول تولیدی آبشار، غنای مورد نیاز راکتور را تامین کرد. از طرفی برای تولید غنای ۱/۳٪ با یک آبشار میزان UF_6 طبیعی برای رقیق سازی حدود kg ۸۲/۵۹ است که رقم بسیار بالایی است. بنابراین این نتایج نشان می‌دهد که آبشار مخروطی نامتقارن قابلیت خوبی برای غناهای میانی دارد، اما برای بزرگترین و کوچک‌ترین غنا نیاز به رقیق‌سازی زیاد یا کار جداسازی بسیار بالا است.

۳. نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای تولید اورانیوم (با غناهای مختلف) سالانه موردنیاز سالانه راکتور قدرت X_2 VVER-1000 در اولین سیکل، از آبشار بهینه مخروطی نامتقارن استفاده شده است. عملیات غنی‌سازی برای تولید محصولات مورد نظر با چیدمان بهینه بالاترین غنای راکتور انجام شد. به دلیل اینکه اختلاف بالای غناهای مورد نیاز راکتور و انعطاف‌پذیری پایین آبشار مخروطی نامتقارن امکان مستقیم همه غناهای مورد نیاز راکتور به‌طور مستقیم نبود و نیاز به رقیق سازی با اورانیوم طبیعی یا مخلوط کردن محصولات تولیدی بود. همچنین میزان سالیانه UF_6 طبیعی برای رقیق‌سازی محصولات با غنای پایین بسیار بالا است.

۴. مراجع

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

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

[3] 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 Sep 1; 144:107558.

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

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

[6] G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich, and , H.G. Wood, Ideal and optimum cascades. Sep. Sci. Tech., 43(13), 3377-3392. (2008);

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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);

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] S. Zeng, and C. Ying, A robust and efficient calculation procedure for determining the concentration distribution of multicomponent mixtures. Sep. Sci. Technol. 35(4), 613-622. (2000); https://doi.org/10.1081/SS-100100179.

[15] 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