



بررسی و مقایسه کار جداسازی در آبشارهای مخروطی و مربعی

رویا طاهری^۱، حسین فقیهیان^۲، محمد مهدی شادمان^۱، سیده لیلا میرمحمدی*^۱، سیدجابر صفدری^۳،

محمد حسن ملاح^۳

۱. شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۹۹-۱۴۱۵۵، تهران-ایران

۲. دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا، صندوق پستی: ۳۱۱-۸۶۱۴۵، اصفهان (شهرضا)- ایران

۳. پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، ایران

چکیده:

در این تحقیق دو آبشار با چیدمان مربعی و مخروطی با تابع هدف توان جداسازی و مجموع جریان میان مرحله-ای کلباهم مقایسه شده‌اند. این دو آبشار در شرایط تقریباً مشابه از قبیل تعداد مراحل (N)، نرخ خوراک ورودی به آبشار (F) و فاکتور جداسازی (α) با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از این توابع هدف مجموع جریان میان مرحله‌ای بدست آمده از آبشار مخروطی در مقایسه با مربعی بهتر و به تعداد ماشین کمتری نیاز دارد. همچنین توان جداسازی در یک آبشار مخروطی بیشتر از یک آبشار مربعی به دست آمد. کلمات کلیدی: توان جداسازی، آبشار مخروطی، آبشار مربعی، جریان میان مرحله‌ای

Investigation and Comparison of the Ideal Symmetric Tapered and Squared Cascades Separation Work Unit

R.Taheri^{1,2}, H. Faghian¹, M. M. Shadman², S.L. Mirmohammadi^{2*}, J. Safdari³, M.H.

Mallah³

¹ Islamic Azad University, Reza Branch, Isfahan, Iran

² Iran Advanced Technology Company, Iran Atomic Energy Organization, Tehran-Iran

³ Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

ABSTRACT



In this study, two the tapered and squared cascades in term of the separation work unit (SWU) and the total feed flow rates have been compared. The operation of these cascades comprised in the same condition including the number of stages (N), the feed flow rate (F) and the separation factor (α). According to the results, the tapered cascade total feed flow rates and it's the number of machines is lower than the squared cascade. The tapered cascade also has the greater SWU

Keywords: Separation work unit (SWU), the tapered cascades, the squared cascades, the total feed flow rates

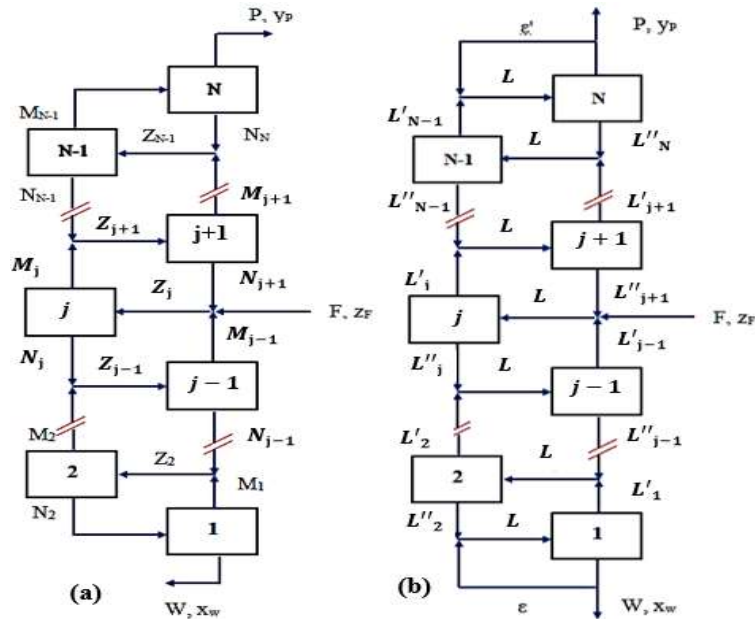
۱- مقدمه

در فناوری هسته‌ای، جداسازی ایزوتوپ به فرآیندی گفته می‌شود که طی آن یکی از ایزوتوپ‌های خاص یک عنصر از دیگر ایزوتوپ‌های آن جدا خواهد شد. یکی از مثال‌های مهم و کاربردی جداسازی ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵ از ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۸ جهت تولید سوخت هسته‌ای است. کوچک‌ترین جزء یک واحد صنعتی جداسازی ایزوتوپ‌ها که منجر به مقداری از جداسازی ماده فرآیندی می‌گردد، واحد جداسازی نامیده می‌شود. به گروهی از واحدهای جداسازی با اتصال موازی که ترکیب شیمیایی ماده خوراک همه آن‌ها یکسان بوده و جریان‌های محصول تا اندازه‌های جداسازی شده با ترکیب شیمیایی یکسانی در آن‌ها تولید می‌شوند را مرحله گویند. هیچ‌المان جداسازی به تنهایی نمی‌تواند اورانیوم-۲۳۵ را از غلظت طبیعی خود که حدود ۰/۷۲ درصد است را به ۳ تا ۵ درصد مورد نیاز برای تامین سوخت یک راکتور هسته‌ای برساند. بدین منظور لازم است ماشین‌های سانتریفیوژ به عنوان المان جداساز به صورت موازی جهت تولید میزان محصول مطلوب به یکدیگر متصل شوند (مرحله) و به منظور افزایش غناء لازم است مراحل به صورت سری به یکدیگر متصل شوند که به این دسته از مراحل با اتصال سری، زنجیره یا آبشار غنی‌سازی گفته می‌شود. غنی‌سازی با واحد کار جداسازی (SWU) اندازه‌گیری می‌شود که جهت سنجش مقدار کار لازم برای جداسازی ایزوتوپ سبک‌تر اورانیوم-۲۳۵ از ایزوتوپ سنگین‌تر آن در اورانیوم طبیعی جهت ایجاد محصول نهایی به کار می‌رود. مقدار SWU مورد نیاز برای تولید اورانیوم غنی‌شده به فاکتورهای مختلفی، از جمله نوع فرایند غنی‌سازی به کار رفته، غلظت مورد نظر اورانیوم-۲۳۵ در محصول نهایی و غلظت



باقی مانده اورانیوم-۲۳۵ در پسماند غنی‌سازی بستگی دارد. در یک آبشار غنی‌سازی می‌توان از انواع المان‌های جداسازی استفاده نمود. با پیشرفت تکنولوژی در دنیا برای ساخت روتورهایی با سرعت دورانی بسیار بالا و دستیابی به فاکتور جداسازی بالا، ماشین سانتریفیوژ، به عنوان یکی از مهمترین المان‌های جداسازی مورد توجه می‌باشد [۱-۲].

آبشارها به دو دسته کلی آبشار ساده و آبشار با جریان برگشتی تقسیم بندی می‌شوند. ساده‌ترین شکل عملی یک آبشار با جریان برگشتی، آبشار متقارن می‌باشد. خوراک با شدت جریان مولی F و کسر مولی Z_f وارد و جریان محصول با شدت جریان مولی P و کسر y_p و پسماند با شدت جریان مولی W و کسر مولی x_w خارج می‌گردند. در بسیاری از فرآیندها مطابق شکل ۱ (a)، جریان محصول به مرحله بعد و جریان پسماند برای بازیافت بلافاصله به مرحله قبلی برگردانده می‌شود، آبشارهایی که بدین شکل عمل می‌نمایند، به آبشارهای متقارن شناخته می‌شوند. آبشار ایده‌آل آبشاری است که فاکتور جداسازی جریان غنی‌شده از جزء مطلوب (β) یا ضریب غنی‌سازی، در تمامی مراحل ثابت و برابر است و جریان‌های ورودی و خروجی از یک گره که جریان ورودی به مرحله بعد از گره را تشکیل می‌دهند، دارای غلظت یکسان می‌باشند. آبشار غیرایده‌آل آبشاری است که یکی از شروط آبشار ایده‌آل در آن وجود نداشته باشد. به این صورت که در محل اختلاط جریان‌ها در نقاط گره، غلظت‌ها متفاوت باشد و یا ضریب غنی‌سازی مراحل با یکدیگر متفاوت باشند. در آبشارهای مخروطی که انواع مختلفی دارند نوع آبشار متقارن غیرایده‌آل به علت نزدیک بودن به شرایط واقعی و عملی در سایت‌های کشور برای ما حائز اهمیت است. آبشارهای مربعی به آبشارهایی گفته می‌شود که در آن‌ها نرخ جریان ورودی به مراحل ثابت و یکسان است [۳-۵]. به عبارت دیگر همان‌طور که در **Error! Reference source not found.** ۱ (b) مشاهده می‌گردد پهنای آبشار در تمام مراحل آبشار ثابت و برابر با L است. یکی از راه‌های ثابت نگه‌داشتن نرخ جریان ورودی به مراحل، استفاده از جریان‌های برگشتی ε و ε' در مراحل ابتدایی و انتهایی آبشار است. همچنین نرخ جریان محصول و پسماند خروجی از هر مرحله به ترتیب L'_n و L''_n است.



شکل ۱: (a) آبخار مربعی (b) آبخار مخروطی

هدف از شناخت آبخارها، شبیه‌سازی عملکرد یک آبخار موجود به منظور بهینه‌سازی و رفع عیوب و یا طراحی یک آبخار جدید برای اهداف خاص می‌باشد. روش‌های حل معادلات حاکم بر آبخار غنی‌سازی، به یکی از دو صورت تحلیلی و یا عددی به کمک زبان برنامه‌نویسی مناسب انجام می‌گیرد. در روش تحلیلی که در کتب مختلف مربوط به حوزه غنی‌سازی نیز بدان پرداخته شده است، با در نظر گرفتن یک سری فرضیات ساده‌کننده و حل تحلیلی معادلات بر مبنای آن فرضیات، اقدام به طراحی آبخار و استخراج مشخصات آن می‌گردد [۱-۲]. در روش عددی در حالت کلی و زمانی که فرضیات ساده‌کننده در حل معادلات به کار نرود استفاده می‌گردد. در روش عددی به دنبال الگوریتمی بوده که بر اساس آن بتوان یک کد کامپیوتری را به کمک یک زبان برنامه‌نویسی مناسب که در این تحقیق زبان متلب^۲ است، نوشته و با دادن اطلاعات ورودی به آن و سپس اجرای کد، مشخصات آبخار از جمله کار جداسازی را به عنوان خروجی دریافت نمود. در نهایت می‌توان مقدار توان جداسازی را برای یک آبخار مربعی و مخروطی مورد ارزیابی قرار داد.

تاکنون تحقیقی مبنی بر مقایسه توان جداسازی در یک آبخار مخروطی با یک آبخار مربعی با روش حل عددی و با توجه به مشخصات ماشین سانتریفیوژ گزارش نشده است. در این تحقیق بعد از شبیه‌سازی این دو آبخار توان جداسازی هر یک

^۲MATLAB



مقایسه می‌شود. از طرفی ذینفعان اصلی این تحقیق سایت‌های غنی‌سازی موجود در کشور می‌باشند، همچنین طراحان آبشارهای غنی‌سازی می‌توانند از نتایج این تحقیق استفاده نمایند.

۲- روش کار

در این تحقیق معادلات مربوط به توان جداسازی دو جزئی برای یک المان جداساز در کد متلب حل شده و سپس برای یک آبشار مخروطی و مربعی تعمیم داده می‌شود. برای این منظور معادلات مربوط به آبشارها استخراج می‌گردد. همچنین معادلات مربوط به بقای جرم ماده در حالت کلی و جزء مطلوب با در نظر گرفتن اثر اختلاط در نقاط گره حل می‌گردد. در نهایت کار جداسازی در هر دو آبشار به دست می‌آید و این دو آبشار با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

۲-۱- آبشار مخروطی

تمام مجهولات یک آبشار ایده‌ال از قبیل دبی جریان‌ها و غلظت اجزا را با داشتن γ یا β و همچنین غلظت، محل ورود خوراک، دبی جریان خوراک و تعداد مراحل آبشار می‌توان محاسبه کرد. ابتدا با یک حدس اولیه برای برش مراحل و با نوشتن معادلات بقای جرم برای آبشار N مرحله‌ای شکل ۱ (a) به معادلات (۱) الی (۸) تبدیل شده و با استفاده از این معادلات و با داشتن برش‌ها جریان‌های میان مرحله‌ای با استفاده از دستگاه معادلات به دست آمده محاسبه انجام می‌شود.

$$N_2\theta_1 - M_1 = 0 \quad (1)$$

$$Z_2\theta_2 - M_2 = 0 \quad (2)$$

:

$$Z_{NF}\theta_{NF} - M_{NF} = 0 \quad (3)$$

:

$$M_{N-1}\theta_N - P = 0 \quad (4)$$

$$N_2(1 - \theta_1) - W = 0 \quad (5)$$

$$Z_2(1 - \theta_2) - N_2 = 0 \quad (6)$$

:

$$Z_{NF}(1 - \theta_{NF}) - N_{NF} = 0 \quad (7)$$

:

$$Z_{NF} - N_{NF+1} - M_{NF-1} = Feed \quad (8)$$

با نوشتن قوانین بقای جرم جزء مطلوب برای این آبشار N مرحله‌ای، معادلات (۹) الی (۱۲) موجود خواهند بود:



$$x_2 N_2 - M_1 y_1 - x_w W = 0 \quad (9)$$

$$z_2 Z_2 - M_2 y_2 - x_2 N_2 = 0 \quad (10)$$

:

$$z_{N_F} Z_{N_F} - y_{N_F-1} M_{N_F-1} - x_{N_F+1} N_{N_F+1} = Feedz_F \quad (11)$$

:

$$y_{N-1} M_{N-1} - P y_P - x_N N_N = 0 \quad (12)$$

در این معادلات، نرخ جریان‌ها از مرحله قبل به دست آمدند و معلوم هستند و هدف یافتن غناها می‌باشد. با استفاده از این دستگاه معادلات و رابطه غیرخطی که بین غلظت‌ها وجود دارد می‌توان غلظت اجزاء جریان‌ها را به دست آورد:

$$\frac{y_n}{1 - y_n} = \beta \frac{z_n}{1 - z_n} \quad (13)$$

$$\frac{z_n}{1 - z_n} = \gamma \frac{x_n}{1 - x_n} \quad (14)$$

بعد از یافتن غلظت جریان‌ها با استفاده از رابطه (۱۵) برش مراحل محاسبه می‌شوند.

$$\theta_i = \frac{1 + z_i(\beta - 1)}{\beta + 1} \quad (15)$$

سپس مقادیر برش جدید با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه خواهند شد، که در این رابطه ω ضریب مادون رهایی می‌باشد که برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم بکار می‌رود و $\theta_{i old}$ برش مراحل در تکرار قبلی می‌باشد.

$$\theta_{i New} = (1 - \omega)\theta_i + \omega\theta_{i old} \quad (16)$$

اگر مقادیر Error حساب شده از رابطه (۱۷) از eps کمتر بود مقادیر برش به دست آمده از رابطه (۱۶) مقادیر صحیح برش آبشار خواهند بود، در غیر این صورت این مقادیر برش بعنوان حدس اولیه برای تکرار بعدی وارد الگوریتم شبیه‌سازی شده و حلقه محاسبه دبی‌ها و غلظت‌ها تکرار می‌گردد تا شبیه‌سازی همگرا گردد.

$$Error = \frac{\theta_{i New} - \theta_{i old}}{\theta_{i old}} \quad (17)$$

بنابراین این نتیجه بدست می‌آید که با داشتن یکی از ضرایب غنی‌سازی و یا تهی‌سازی و نیز حدس اولیه مقدار برش در هر مرحله، آبشار حل شده و شبیه‌سازی ممکن می‌باشد [۱-۲].



۲-۲- آبشار مربعی

در یک آبشار مربعی ε و ε' از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon = L\theta_2 \quad (18)$$

$$\varepsilon' = L(1 - \theta_{N-1}) \quad (219)$$

از طرفی با نوشتن قوانین بقای جرم در تمامی مراحل آبشار مربعی و نقاط گره می‌توان نرخ جریان در مراحل را به دست آورد.

$$L''_2\theta_1 - L'_1 = 0 \quad (20)$$

$$L_2\theta_2 - L'_2 = 0 \quad (221)$$

:

$$L_{N-1}\theta_{N-1} - L'_{N-1} = 0 \quad (22)$$

$$L'_{N-1}\theta_N - P = 0 \quad (23)$$

$$L''_2(1 - \theta_1) - W = 0 \quad (24)$$

$$L_2(1 - \theta_2) - L''_2 = 0 \quad (25)$$

:

$$\varepsilon = L\theta_2 \quad (26)$$

$$L_{N-1}(1 - \theta_{N-1}) - L''_{N-1} = 0 \quad (27)$$

$$L'_{N-1}(1 - \theta_N) - L''_N = 0 \quad (28)$$

$$\varepsilon' = L(1 - \theta_{N-1}) \quad (29)$$

$$L''_{N_F+1} + L'_{N_F-1} - L_{N_F} = -Feed \quad (30)$$

$$L''_{i+1} + L'_{i-1} - L_i = 0 \quad (31)$$

با اعمال برش‌های به‌دست‌آمده از ارتباط بین برش‌ها که از معادلات یک آبشار مربعی اتخاذ می‌گردد و استفاده از یکی از روش‌های حل دستگاه معادلات خطی، به‌راحتی هیدرولیک متناظر با آن برش‌ها به دست می‌آیند. توزیع غلظت اجزاء مخلوط نیز از روش تکرار q استفاده می‌شود [۶].

۳- نتایج

در آبشار مربعی تعداد مراحل (N)، مرحله ورود خوراک (N_F)، دبی خوراک ورودی به آبشار، مقدار ثابت دبی ورودی به مراحل، مرحله اول یا برش آبشار، فاکتور جداسازی آبشار، غلظت ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵ در خوراک



ورودی و خوراک بهینه تک ماشین (F_{Opt}) جزء معلومات مسئله می باشند. برای بررسی بیشتر در این کار تحقیقی برای دبی خوراک ورودی به آبشار، برش مرحله اول و برش آبشار محدوده مشخصی به ترتیب (۰/۰۵-۲۰g/hr.)، (۰/۰۵-۳/۵) و (۰/۰۵-۰/۶۵) در نظر گرفته شد تا بهترین عملکرد یک آبشار مربعی بدست آید. در این شرایط، دبی خوراک ورودی به آبشار، برش مرحله اول و برش آبشار به ترتیب با گام های ۱۰ gr/hr.، ۰/۰۵ و ۰/۰۵ تغییر داده شد. ورودی هر دو آبشار مطابق جدول (۱) فرض شد. نتایج شبیه سازی آبشار مربعی با کار جداسازی مطلوب و غلظت محصول بالای ۳٪ و غلظت پسماند زیر ۰/۲٪ به صورت جدول (۲) و سپس در شرایط مشابه نتایج شبیه سازی یک آبشار مخروطی در جدول (۳) ارائه گردید. لازم به ذکر است تعداد ماشین ها و در نتیجه L ورودی به مراحل در آبشار مربعی برای همه تست ها ثابت و به ترتیب برابر ۲۰۰ ماشین و ۲۵۰ g/hr در نظر گرفته شد.

جدول ۱: ورودی، خروجی و نتایج شبیه سازی یک آبشار مربعی

ورودی				
F _{Opt}	N _F	N	α	Z _F
۲۵	۱۱	۲۰	۱/۳۴	۰/۰۰۷

جدول ۲: شرایط بهینه و خروجی شبیه سازی یک آبشار مربعی

Feed	شرایط بهینه		تست	
	θ	θ_1		
۲۰	۰/۰۵	۰/۵	۱	
۴۰	۰/۱۵	۰/۳۵	۲	
۱۰۰	۰/۰۵	۰/۴۰	۳	
خروجی آبشار مربعی				
SWU (g/hr)	$\sum L$	y_p	x_w	تست
۳۵/۱۵	۵۰۰۰	۴٪/۰۴	۰٪/۰۰۶	۱
۳۷/۴۷	۵۰۰۰	۳٪/۰۷۲	۰٪/۰۱۷	۲
۳۸/۵۹	۵۰۰۰	٪/۰۴	۰٪/۰۵۳	۳



حال تمام پارامترهای ورودی برای آبشار مخروطی (متقارن غیرایده آل) را مشابه آبشار مربعی در نظر گرفته و برای ضریب غنی سازی و تهی سازی حالتی را در نظر گرفته که ضرب این دو عدد برابر α باشد. در این تست میزان ضریب غنی سازی $1/162$ و تهی سازی $1/158$ در نظر گرفته شد. در نتیجه نتایج به شرح جدول ۳ حاصل می شود:

جدول ۳: نتایج شبیه سازی یک آبشار مخروطی

خروجی آبشار مخروطی						
تست	Feed	تعداد ماشین	x_W	y_P	$\sum L$	SWU (g/hr)
۱	۲۰	۹۲	۰/۰۱۶	۳/۰۵۵	۱۶۷/۰۷	۱۹/۱۷
۲	۴۰	۱۵۴	۰/۰۱۶	۳/۰۵۵	۱۲۰۰/۷۴	۳۹/۲۷
۳	۱۰۰	۲۰۰	۰/۰۱۶	۳/۰۵۵	۸۳۵/۴۰	۹۸/۲۲

از جداول (۱) و (۳) مشهود است که در دبی های خوراک پایین آبشار مخروطی با تعداد ماشین کمتر دارای SWU نسبتاً بالاتری است و همچنین مجموع جریان های میان مرحله ای آن بسیار کمتر از یک آبشار مربعی با شرایط یکسان است. غلظت محصول در آبشار مخروطی بسیار مطلوب و قابل قیاس با این آبشار مربعی است. اما در دبی بالای خوراک یک آبشار مخروطی بسیار کارایی بالاتری نسبت به یک آبشار مربعی دارد. همانطور که مشاهده می گردد SWU آبشار مخروطی در چنین شرایطی تقریباً ۲ برابر یک آبشار مربعی با شرایط ورودی مشابه است. برای نشان دادن کارایی بالاتر یک آبشار مخروطی نسبت به یک آبشار مربعی دو تست در شرایط بهینه هر کدام در جدول ۴ ارائه می گردد. لازم به ذکر است، در این تست محدوده دبی خوراک، برش مرحله اول و برش آبشار در هر دو آبشار یکسان به ترتیب $(100-20 \text{ g/hr})$ ، $(0/0-3/5)$ و $(0/05-0/65)$ در نظر گرفته شده است.



جدول ۴: شرایط و خروجی شبیه‌سازی یک آبشار مربعی و مخروطی

ورودی هر دو آبشار						
N	α	Z_F			تست	
۲۰	۱/۳۴۵۶	۰/۷۱۱			۱	
۲۰	۱/۳۴۵۶	۰/۷۱۱			۲	
خروجی هر دو آبشار						
SWU (g/hr.)	$\sum L$	y_P	x_W	N_F	Feed	تست
۳۷/۴۳	۵۰۰۰	۳/۵۰	۰/۱۶	۱۵	۴۱	۱
۵۴/۵۴	۳۸۸۷	۳/۵۴	۰/۱۶	۱۰	۵۵	۲

نتیجه‌گیری

از مقایسه آبشارهای مربعی و مخروطی در یک محدوده دبی خوراک مشخص این نتیجه بدست می‌آید که دبی - های خوراک پایین آبشار مربعی می‌تواند قابل قیاس و گاهی حتی بهتر از یک آبشار مخروطی باشند اما اگر از مجموع دبی میان مرحله ای و تعداد ماشین ها صرف‌نظر شود، با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که یک آبشار مخروطی از نظر SWU، غلظت‌های پسماند و محصول، راندمان و عملکرد بهتری را می‌تواند در تعداد ماشین و مجموع دبی میان مرحله ای کمتر دارا باشد.

مراجع

1. Benedict, Manson, 1981, Nuclear Chemical Engineering, Second Edition, Mcgraw-Hill Book Company.
2. Villani, Stelio, Brigoli. B, 1979, Enrichment Of Uranium, NewYork, Springer-Verlag.
3. L. P. Kholpanov, "Calculation of a Square Cascade with Losses of the Working Material in the Steps and Pipelines During Separation of Multicomponent Isotope Mixtures," Atomic Energy , vol. 104, no. 1, pp. 17-23, 2008



بیست و پنجمین کنفرانس هسته‌ای ایران



۲۱ اسفندماه ۱۳۹۷- دانشگاه آزاد اسلامی (واحد بوشهر)

4. L. P. Kholpanov, " On the Calculation of a Squared-off Cascade for Multicomponent Isotope Separation.," Chemical Engineering and Processing, vol. 37, 1998.
5. V. D. Borisevich, " Calculation Study of Cadmium Isotopes in Gas Centrifuges," Theoretical Foundation of Chemical Engineering, vol. 34, no. 2, 2007.
6. Zeng,S, Ying,C., A robust and efficient calculation procedure for determining concentration distribution of multicomponent mixtures, J. Sep. Sci. Technol, 2000, vol. 35, no. 4, p. 613,.