

بهینه سازی یک آبشار مخروطی با استفاده از الگوریتم علف‌هرز (IWO) برای سیستم های چند جزئی با استفاده با اصلاح اثر چشمه خوراک یک ماشین سانتریفیوژ

مسعود خواجه نوری^(۱) - صادق یوسفی نسب^(۲)* - سید جابر صفدری^(۱) - جواد کریمی ثابت^(۲) - محمد حسن ملاح^(۱) - محمد حسین عسکری^(۱)

(۱) سازمان انرژی اتمی - شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران

(۲) سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته ای

چکیده

در این مقاله اثر چشمه جرمی خوراک در یک ماشین سانتریفیوژ مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ناحیه گاز رقیق و قسمتی از ناحیه پیوسته به عنوان ناحیه محاسباتی برای محاسبه چشمه جرمی در نظر گرفته شده و چشمه جرمی با روش DSMC محاسبه شده است. با محاسبه شار جرمی حاصل از دو چشمه و محاسبه تابع جریان و تلفیق آن با اثرات محرک دمایی و اسکوپ حاصل از تابع جریان اولاندر، تابع جریان جدیدی پیشنهاد شده که اثر محرک خوراک به آن افزوده شده است. با جایگذاری تابع جدید جریان حاصل از دو چشمه جرمی در معادلات انساجر-کوهن، پارامترهای جداسازی به ازای مقادیر مختلف خوراک و برش محاسبه شده که در طراحی یک آبشار مخروطی سانتریفیوژ گازی با الگوریتم علف‌هرز^۱ استفاده شده است. با استفاده از چشمه جرمی به دست آمده از روش DSMC، تعداد ماشین های سانتریفیوژ مورد نیاز در زنجیره ۲ عدد کمتر تعیین شد.

کلید واژه‌ها: روتور سانتریفیوژ، چشمه جرمی، DSMC، الگوریتم علف‌های هرز

Optimization of a conical cascade using weed algorithm (IWO) for multi-component systems by modifying the effect of the feed source of a gas centrifuge

M. Khajenoori^(۱), S. Yousefi-Nasab^{(۱,۲)*}, J. Safdari^(۱,۲), J. Karimi-Sabet^(۲), M.H. Mallah^(۱,۲), M.H. Askari^(۱)

^۱Atomic Energy Organization of Iran, Iran Advanced Technologies Company

^۲ Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute, Material and Nuclear Fuel Research School

Abstract:

In this paper, the effect of mass source in a centrifuge is investigated. For this purpose, the dilute gas area and part of the continuous area are considered as the computational area for calculating the mass source and the mass source is calculated by DSMC method. By calculating the mass flux resulting from the two sources and calculating the flow function and combining it with the effects of the thermal and the scoop drives resulting from the Olander flow function, a new flow function is proposed to which the feed drive effect is added. By placing the new flow function of the two mass sources in the Onsager-Cohen equations, the separation parameters are calculated for different feed and cut values, which is used in the design of a gas centrifugal conical cascade with a weed algorithm. Using the mass source obtained from the DSMC method, the number of centrifuges required in the chain was determined to be 2 less.

Keywords: Centrifuge rotor, Mass source, DSMC, Weed algorithm

*syousefy@aeoi.org.ir

^۱ Invasive Weed Optimization algorithm

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل کاربردهای روزافزون ایزوتوپ‌ها در زمینه‌های تولید رادیوایزوتوپ‌ها در درمان و تشخیص بیماری‌ها، تحقیقات علوم مختلف از جمله فیزیک، شیمی، داروسازی و ... نیاز به دستیابی به روش‌های مناسبی برای جداسازی آن‌ها بوجود آمده است. [۴-۱]. اولین بار در سال ۱۹۹۸ پالکین با ارائه تابع مربوط به فاکتور جداسازی در ماشین سانتریفیوژ، غنی‌سازی اورانیم را با استفاده از الگوریتم جستجوی مستقیم مورد بررسی قرار داد [۵]. از سال-های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۵ نیز جداسازی U-235 از ترکیب اورانیم بازفرآوری شده را با فرضیات مختلف مورد بررسی قرار داد [۶-۸]. در سال ۲۰۱۱ نوروژی و همکاران با محاسبه مستقیم فاکتور جداسازی ماشین سانتریفیوژ عملکرد یک آبشار غنی‌سازی را مورد بررسی قرار دادند که در آن از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است [۹]. در سال ۲۰۱۷ نیز با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات به جداسازی ایزوتوپ‌های گوگرد پرداخته شد و نتایج آن برای الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات مقایسه شد [۱۰]. از آنجائیکه بهینه‌سازی یک آبشار مستلزم شناخت صحیح و دقیق رفتار گاز در یک ماشین می‌باشد، لذا در این مقاله دو نوع ورودی (تست کیس) از یک ماشین ارائه شده است. در نمونه اول اثر خوراک با چشمه جرمی فرضی گانزبرگر و همکارانش در نظر گرفته شده و با روش تفاضل محدود معادله انساگر-پنکیک ناهمگن حل شده و در نهایت پارامترهای جداسازی حاصل از حل معادلات اولاندر محاسبه شده است. در نمونه دوم اثر ورود خوراک به یک ماشین و اثر گذاری آن در ناحیه پیوسته با روش DSMC بررسی شده و پارامترهای جداسازی حاصل از آن ارائه شده است. پارامترهای جداسازی حاصل از دو نمونه از رفتار گاز در یک ماشین، مستقیماً در یک آبشار بهینه شده با الگوریتم علف‌های هرز به عنوان ورودی استفاده شده و نتایج آبشار بهینه با یکدیگر مقایسه شده است. بنابراین در این مقاله کد کارآمدی تهیه شده است که در آن ضمن استفاده از پارامترهای جداسازی یک ماشین با روش DSMC از الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز به منظور دستیابی به یک آبشار با حداقل تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ جهت دستیابی به یک غنای مشخص از یک ایزوتوپ در جریان محصول و پسماند استفاده شده است.

۲. روش کار

۲.۱. معادلات حاکم در یک ماشین سانتریفیوژ

در این مقاله از معادله انساگر-پنکیک با چشمه و چاه جرمی استفاده شده است. این معادله بصورت زیر می‌باشد (برای جزئیات بیشتر به [۱۱-۱۲] مراجعه شود).

$$(e^x (e^x \chi_{xx})_{xx})_{xx} + B^2 \chi_{yy} = F(x, y); \quad 0 < x < x_T, \quad 0 < y < y_T \quad (1)$$

$$F(x, y) = \frac{B^2}{4A^4} \int_x^{x_T} \int_y^{y_T} \mathcal{M}_y \, dy' \, dx \quad (2)$$

در رابطه فوق، $\mathcal{M}_y = z/a$ چشمه یا سینک جرمی و χ پتانسیل مستر می‌باشد که رابطه آن با تابع جریان Ψ به صورت $\Psi = 2A^2 \chi_x$ تعریف شده است. همچنین اعداد بی‌بعد در معادله فوق به صورت $A^2 = (a \Omega)^2 / 2RT_0$ و $B = \text{Re } S^{\frac{1}{2}} / 4A^6$ تعریف شده که در آن $\text{Re} = \rho_{\text{wall}} \Omega a^2 / \mu$ ، $S = 1 + \text{Pr } A^2 (\gamma - 1) / 2\gamma$ و پارامترهای $\text{Pr} = c_p \mu / k$ و Ω ، T_0 ، a ، k و R به ترتیب دمای گاز، سرعت چرخش روتور، شعاع روتور، ضریب هدایت

حرارتی و ثابت جهانی گازها می‌باشد. در سمت راست معادله انساگر، اثر چشمه یا چاه جرمی اعمال می‌شود. محققان تاکنون اثر خوراک که در مرز دو ناحیه به صورت چشمه جرمی اعمال می‌شود را بصورت یک تابع فرضی در نظر گرفته اند [۱۴-۱۲]. یکی از توابع فرضی مورد استفاده در مقالات، تابع چشمه جرمی گوسینی (\mathcal{M}) گانزبرگر و همکارانش می‌باشد که به صورت رابطه (۳) پیشنهاد شده است [۱۲].

$$\mathcal{M} = S_0 e^{-\alpha((x'-x_s)^2 + (y'-y_s)^2)} \quad (3)$$

در رابطه فوق x_s و y_s محل مرکز چشمه، x' ، y' به ترتیب به مختصات شعاع و ارتفاع اشاره دارد و مقدار α طوری در نظر گرفته می‌شود که در دایره‌ای به شعاع یک ($\mathcal{M}((x'-x_s)^2 + (y'-y_s)^2) = 1$)، دارای مقدار ثابت S_0 ، 10^{-6} باشد و مقدار S_0 نیز به مقدار ورود خوراک بستگی دارد. گانزبرگر مقدار قدرت این چشمه جرمی (S_0) که تابعی از مقدار دانسیته عددی ذرات و دبی خوراک ورودی می‌باشد را با توجه به $\iiint \mathcal{M} dv = 1$ برابر $4/39$ بدست آورد [۱۲]. در این مقاله اثر چشمه جرمی با روش $DSMC$ محاسبه شده و بصورت رابطه زیر ارائه شده است.

$$\mathcal{M}_0 = S_0 e^{-(\alpha_1(x-x_s)^2 + \alpha_2(y-y_s)^2)} \quad (4)$$

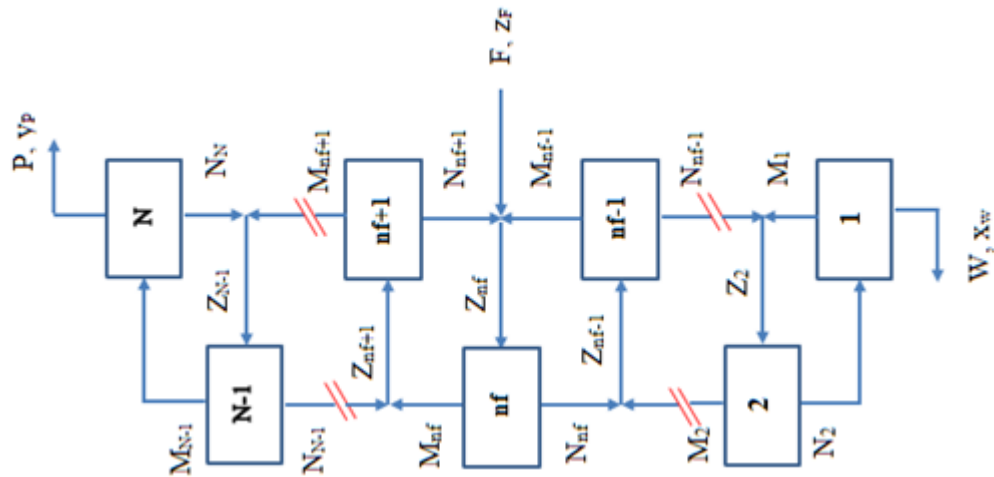
در رابطه فوق \mathcal{M}_0 چشمه جرمی با روش $DSMC$ می‌باشد. مقدار S_0 به مقدار خوراک ورودی بستگی دارد که با توجه به مقدار گازی که در واحد زمان وارد می‌شود محاسبه می‌گردد. x_s و y_s مختصات محل ورود خوراک یا مرکز آن در نظر گرفته شده است. با جایگذاری آن در رابطه (۴)، تابع جریان الاندر به صورت زیر اصلاح شده است:

$$F_{new}(x, \eta) = \left(\frac{-\pi a^2}{A^2} \int_{A^2}^x \rho_{eq} w(x, \eta) dx \right)_{\text{Onsager with mass source}} + \left(B_w [e^{-x} - (1+x)e^{-2x}] [4\eta(1-\eta)]^{\frac{2}{3}} \right. \\ \left. + B_s \left[e^{-\frac{x}{2}} - \left(1 + \frac{x}{2}\right) e^{-x} \right] e^{-2\eta} + P (2e^{-x} - e^{-2x}) \right. \\ \left. - W(2e^{-x} - e^{-2x}) \right)_{\text{Olander}} \quad (4)$$

که در رابطه فوق ضرایب B_w و B_s مربوط به محرک‌های حرارتی و مکانیکی ماشین می‌باشند که مقدار آن‌ها برای تابع هدف ماکزیمم سازی توان جداسازی قابل تعیین است. معادله انساگر پنکیک با چشمه جرمی دقیق $DSMC$ ، با روش تفاضل محدود حل و تابع جریان حاصله در معادلات غلظت مربوط به ماشین جایگذاری و توزیع غلظت $U-235$ درون روتور تعیین می‌گردد و سپس غلظت ایزوتوپ مورد نظر از این شبیه سازی وارد روابط مربوط به زنجیره و الگوریتم بهینه سازی مربوط به آن می‌شود.

۲.۲ معادلات حاکم در یک آبشار مخروطی

با توجه به متفاوت بودن تعداد ماشین‌ها در هر مرحله، یک زنجیره مخروطی انتخاب شد. شماتیکی از آبشار مخروطی با یک جریان خوراک و یک جریان محصول و یک جریان پسماند در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیکی از زنجیره مخروطی

تعداد اجزاء برابر Nc و تعداد مراحل آبشار برابر N است. جریان خوراک با نرخ F در مرحله nf با غنای z_f وارد آبشار می‌شود. جریان‌های میان‌مرحله‌ای با نرخ جریان Mn و Nn و ترکیب درصدهای $y_{i,n}$ و $x_{i,n}$ و جریان‌های پسماند و محصول W و P با ترکیب درصد x_w و y_p بیان می‌گردد $(i=1, 2, \dots, Nc)$ [۹-۱۰].

$$F = P + W \quad (5)$$

$$Fz_F = Py_p + Wx_w \quad (6)$$

$$z_{i,n}Z_n - y_{i,n}M_n - x_{i,n}N_n = 0 \quad (7)$$

$$z_{i,n}Z_n - y_{i,n-1}M_{n-1} - x_{i,n+1}N_{n+1} = z_{i,F}F, \quad n = n_f \quad (8)$$

$$z_{i,n}Z_n - y_{i,n-1}M_{n-1} - x_{i,n+1}N_{n+1} = 0, \quad n \neq n_f \quad (9)$$

$$\alpha_{ij,n} = \frac{(y_{i,n}/y_{j,n})}{(x_{i,n}/x_{j,n})} = \alpha_{0,n}^{(M_j - M_i)}, \quad (i = j-1, j = 2, \dots, N_c) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{N_c} z_{i,n} = \sum_{i=1}^{N_c} y_{i,n} = \sum_{i=1}^{N_c} x_{i,n} = 1 \quad (11)$$

۲.۳ الگوریتم بهینه سازی

در آبشار بهینه هدف دستیابی به آبشاری است که علاوه بر اینکه غلظت ایزوتوپ هدف در جریان محصول $C_{k,p}$ و غلظت ایزوتوپ هدف در جریان پسماند $C_{k,w}$ را به مقدار مورد نظر برساند بلکه از کمترین تعداد ماشین سانتریفیوژ استفاده نماید. تابع هدف در نظر گرفته شده در این تحقیق رابطه (۱۲) می‌باشد که در آن \sum^n بیانگر مجموع ماشین‌های سانتریفیوژ در آبشار می‌باشد. در رابطه (۳۰) ضرایب a ، b و c متناسب با شرایط مسئله انتخاب می‌شوند.

$$\text{Objective_Function} = (a \times \sum n) \times [b|C_N^{P*} - C_N^P| + c|C_1^{W*} - C_1^W|] \quad (12)$$

۳. نتایج

در این مقاله اثر چشمه جرمی با روش DSMC و اثر چشمه جرمی فرضی در مقالات در یک ماشین در قالب فاکتور جداسازی به عنوان ورودی یک زنجیره بهینه با الگوریتم علف‌های هرز در نظر گرفته شده و اثر آن در تعداد ماشین‌های حاصل از طراحی بررسی شده است. مشخصات سانتریفیوژ فرضی مورد استفاده در مقالات مختلف، در جدول زیر ارائه شده است [۱۱-۱۲].

جدول (۱): مشخصات سانتریفیوژ فرضی

فشار دیواره	برش	دبی خوراک	سرعت خطی روتور	شعاع	طول
۱۰۰ تور	۰/۴	۱۸۰ گرم بر ساعت	۷۰۰ متر بر ثانیه	۹/۱۴۵ سانتی‌متر	۳/۳۹۳ متر

در ابتدا برای محاسبه چشمه جرمی در مرز دو ناحیه (M_0) با روش DSMC از توزیع فراوانی ذرات در نزدیکی مرز دو ناحیه استفاده شده است. مقدار S_0 ارتفاع قله می باشد که با توجه به مقدار گازی که در واحد زمان وارد می شود محاسبه می‌گردد و مقادیر α_1 و α_2 به ترتیب با فیت کردن رابطه (۴) با برش‌های افقی ایجاد شده در کانکتور جریان ایجاد شده برای چشمه جرمی به دست آمده از روش DSMC، برابر با ۰/۴ و ۱۸ محاسبه شده است. با محاسبه اثرات محرک مکانیکی و دمایی با تابع پیشنهادی در ماکزیمم کار جداسازی، توزیع غلظت برای جزء سبک تر U-235 با استفاده از معادلات اصلاح شده انساگر-کوهن محاسبه شده است. با استفاده از تابع جریان حاصل از این دو چشمه جرمی و حل معادلات انساگر-کوهن پارامترهای جداسازی محاسبه می‌گردد. بطور مشابه مقدار غلظت در برش‌های مختلف در خوراک‌های مختلف محاسبه شده است. مقدار ضریب جداسازی در خوراک‌های مختلف و برش مختلف محاسبه می‌گردد. در جدول (۲) مشخصات طراحی زنجیره جهت دستیابی به حداقل تعداد ماشین ارائه شده است. مقادیر در نظر گرفته شده برای مقدار خوراک و غناهای محصول و پسماند زنجیره به صورت فرضی در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مشخصات طراحی زنجیره

مقدار خوراک زنجیره (mg/sec)	y_p	x_w	Z_F	P (mg/sec)	W (mg/sec)
۱۰۰۰	۱/۶۰ %	۰/۳۴ %	۰/۷ %	۴۵۸	۵۴۲

جهت طراحی آبخاری با کمترین تعداد ماشین (تابع هدف) با استفاده از فاکتور جداسازی حاصل از چشمه جرمی فرضی گانزبرگر و همکارانش و چشمه جرمی حاصل از روش DSMC جهت دستیابی به غنای ۰/۳۴ و ۱/۶۰ درصد در پسماند و محصول در آبشار (قیود مورد نظر)، از الگوریتم بهینه علف‌های هرز استفاده شده است. نتایج طراحی زنجیره با استفاده از فاکتور جداسازی حاصل از چشمه جرمی فرضی گانزبرگر و همکارانش و روش DSMC به ترتیب در جدول (۳) و (۴) ارائه شده است.

جدول (۳): پارامترهای بهینه زنجیره با استفاده از فاکتور جداسازی حاصل از چشمه جرمی فرضی گانزبرگر و همکارانش

Step No.	No. of centrifuge	Concentration		Z (mg/sec)	θ	α
		y	x			
1	13	0.0057	0.0033	1.1235	0.3693	1.6821
2	22	0.0070	0.0042	1.8649	0.3975	1.6688
3	30	0.0085	0.0052	2.6788	0.4587	1.6171
4	22	0.0096	0.0061	1.9631	0.5225	1.5950
5	16	0.0109	0.0070	1.5294	0.5199	1.5639
6	12	0.0122	0.0079	1.1660	0.5680	1.5397
7	9	0.0141	0.0090	0.8089	0.5416	1.5673
8	5	0.0162	0.0099	0.4381	0.6653	1.6479
	Total number: 129					

جدول (۴): پارامترهای بهینه زنجیره با استفاده از فاکتور جداسازی حاصل از چشمه جرمی با روش DSMC

Step No.	No. of centrifuge	Concentration		Z (mg/sec)	θ	α
		y	x			
1	13	0.0059	0.0033	1.0711	0.3376	1.7173
2	20	0.0071	0.0042	1.7027	0.3709	1.6811
3	30	0.0084	0.0052	2.5616	0.4764	1.6361
4	22	0.0096	0.0060	1.9270	0.5174	1.5933
5	16	0.0111	0.0069	1.4212	0.5029	1.6095
6	12	0.0122	0.0077	1.0516	0.5966	1.5864
7	9	0.0139	0.0088	0.7828	0.5696	1.5864
8	5	0.0161	0.0099	0.4459	0.6514	1.6324
	Total number: 127					

مقادیر کات، فاکتور جداسازی و غنای هر مرحله نیز در جدول (۳) و (۴) آورده شده است. علی‌الحال با توجه به هدف این مقاله، تابع هدف در نظر گرفته شده برای الگوریتم بهینه سازی، فقط دستیابی به کمترین تعداد ماشین برای هر مرحله در نظر گرفته شده است. نتایج جدول (۳) و (۴) نشان می‌دهد که در طراحی یک آبشار بهینه با استفاده از فاکتور جداسازی حاصل از چشمه جرمی با روش DSMC برای دستیابی به غنایی مشخص در یک آبشار ۸ مرحله‌ای به تعداد ماشین کمتری نیاز می‌باشد. دلیل این اتفاق در این است که با در نظر گرفتن اثر چشمه جرمی با روش DSMC، این اثر برای یک ماشین موجود در زنجیره دقیق‌تر لحاظ می‌شود. از آنجایی که خود چشمه خوراک نیز به عنوان یک محرک جریان محوری و در نتیجه عامل افزایش بر جداسازی محوری یک ماشین محسوب می‌شود، دقیق‌تر دیدن اثر این محرک موجب افزایش مقدار جداسازی ماشین و در نتیجه کاهش تعداد ماشین‌های یک زنجیره برای رسیدن به یک مقدار مشخص از غنا در خروجی‌های زنجیره می‌شود. پارامتر تکرار برای همگرایی حل دو زنجیره مخروطی بهینه شده با استفاده از الگوریتم غلظت‌های هرز، برای حالت تابع جریان در نظر گرفته شده با روش DSMC بزرگتر از حالت تابع جریان فرضی الاندر ($n_{it} > 200$) اتفاق افتاد.

۴. بحث و نتیجه گیری

نتایج نشان داد با افزایش مقدار خوراک فاکتور جداسازی کاهش می‌یابد. همچنین فاکتور جداسازی حاصل از استفاده از چشمه جرمی با روش DSMC، با افزایش مقدار کات تا $0/6$ کاهش و سپس مقدار آن افزایش می‌یابد. پارامترهای جداسازی حاصل از چشمه جرمی فرضی گانزبرگر و همکارانش و چشمه جرمی حاصل از روش DSMC در طراحی بهینه با الگوریتم علف‌های هرز یک آبشار مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که در طراحی آبشار بهینه با استفاده از پارامترهای جداسازی حاصل از رفتار گاز در یک ماشین سانتریفیوژ با چشمه جرمی حاصل از روش DSMC، می‌توان با تعداد کمتری ماشین به غنای مطلوب دست یافت.

مراجع

- [1] K. Cohen, "The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of UTM." Pp.103-125, (1951).
- [2] Soubbaramayer. "Centrifugation", Applied Physics, vol.35, pp.183-244, (1979).
- [3] L. D. Cloutman, R. A. Gentry, "Numerical simulation of the countercurrent flow in a gas centrifuge", Los Alamos Scientific Laboratory Rep. LA-UR-81-1821, Los Alamos, NM, 1981.
- [4] Carrier, G. F, Maslen, S. H., "Flow phenomena in rapidly rotating systems." USAEC Rep. TID-18065, 1962.
- [5] Palkin, V.A., 1998, "Determination of the optimal parameters of a cascade of gas centrifuges," At Energy, Vol. 84(3), pp. 199 .
- [6] Palkin, V.A., Sbitnev, N.A., Frolov, E.S., 2002, "Calculation of the optimal parameters of a cascade for separating a multicomponent mixture of isotopes," At. Energy, Vol. 92, pp. 141.
- [7] Palkin, V.A., 2013, "Optimization of a centrifuge cascade for separating a multicomponent mixture of isotopes," At Energy, Vol.115, pp. 93.
- [8] Palkin, V. A., 2015, "Multicomponent separation efficiency of an optimal cascade with prescribed target isotope concentration," At Energy, Vol.117, pp. 148.
- [9] Norouzi, A., Minuchehr, A.H., Zolfaghari, A., Hagighattalab, A., 2011, "Parameters optimization of a counter-current cascade based on using a real coded genetic algorithm," Sep. Sci. Tech. Vol. 46, pp. 2223 .
- [10] Safdari, J., Norouzi A., Tumari, R., 2017, "Using a Real Coded PSO Algorithm in the Design of a Multi-Component Counter-Current Cascade," J. Sep. Sci. Technol. pp. 1520-5754.
- [11] Furry W. H., Jones R. C. and Onsager L. (1939) On the theory of isotope separation by thermal diffusion, Phys. Rev. 55, 1083 .
- [12] M.D. Gunzburger, H.G. Wood, J.A. Jordan, A finite element method for gas centrifuge flow problems, Journal on scientific and statistical computing 5(1) 1984 78-94.