



تعیین وابستگی ضریب جداسازی سانتریفوژ گازی به برخی از پارامترهای اصلی

علی نوروزی، پیمان ماکارچی، احمد ذوالفقاری*، عبدالحمید مینوچه‌ر، احمد حقیقت طلب
دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران-ایران

چکیده: برای دستیابی به جداسازی مؤثر در سانتریفوژهای گازی از محرک‌های مکانیکی یا گرمایی برای ایجاد جریان محوری گاز استفاده می‌شود. در این مقاله تحلیل عددی جریان گاز در داخل روتور سانتریفوژ بررسی می‌گردد. برای این منظور برنامه‌ای به نام MakNo-4 توسعه داده شده است. با قرار دادن نتایج حاصل از حل عددی معادله‌ی حرکت گاز در معادله‌ی پخش گاز، غلظت‌های محصول در ورودی و خروجی سانتریفوژ مشخص شدند. با داشتن میزان غنا در قسمت غنی‌کننده و تهی‌کننده‌ی سانتریفوژ، ضریب جداسازی ماشین به دست آمد. در نهایت وابستگی این ضریب به سرعت روتور، برش و نرخ ورود جریان گاز به داخل سانتریفوژ مورد ارزیابی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: سانتریفوژ گازی، محرک‌های مکانیکی و گرمایی، ضریب جداسازی، معادله‌ی پخش، جریان محوری

Determining Dependency of Gas Centrifuge Separation Factor to Some Principals Parameters

A. Noroozi, P. Makarachi, A. Zolfaghari*, A. Minoochehr, A. Haghghattalab
Department of Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran - Iran

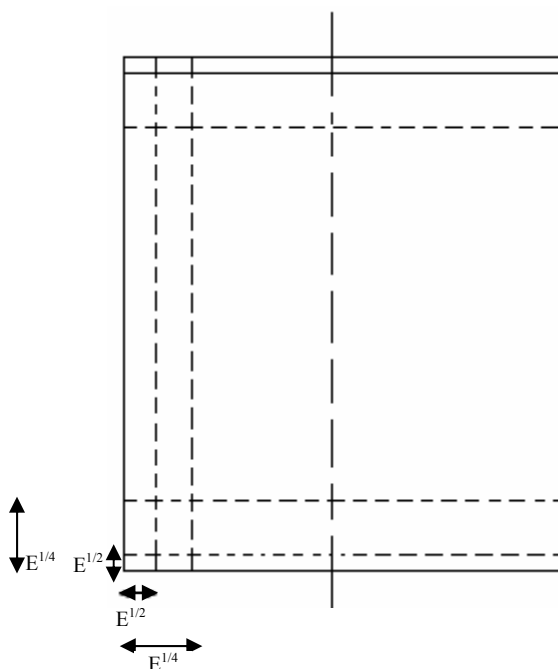
Abstract: For increasing isotopic separation power of a gas centrifuge, the axial circulating flows are created by mechanical or thermal drives. In this paper, the feed injection (mechanical drive) and the axial temperature gradient (thermal drive) are used to induce an internal circulating flow and a model is applied as a governing differential equation of the gas motion. The outcoming of the purely axial flow model is used along with the diffusion equation to obtain concentrations of different isotopes at the gas exodus orifices. The machine separative factor is obtained after specifying x_p (the product concentration of lighter isotope) and x_w (the waste concentration of lighter isotope) from the enriching and stripping sections. Finally, the dependency of the separative factor to rotor speed, cut and feed flow rate was investigated.

Keywords: Gas Centrifuge, Mechanical or Thermal Drives, Separative Factor, Diffusion Dquation, Axial Flow

*email: a-zolfaghari@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

طی سال‌های گذشته مقاله‌های متعددی در رابطه با جریان سیال در داخل سانتریفوژ منتشر شده است. بیش تر فعالیت‌ها با استفاده از مدل‌های خطی شده‌ی یک اغتشاش کوچک بر روی گاز در حال دوران در داخل یک استوانه و در حالت پایا با دمای ثابت و با استفاده از جریان‌های لایه‌های استیوارسون^(۱) [۱] بوده است. برور [۲] در سال ۱۹۷۸ با استفاده از همان تحلیل، جریان ناشی از وجود شیب دما، تزریق جریان و برداشت محصول از بالا و پایین استوانه را مورد ارزیابی قرار داد. ماتسودا و هاشیموتو [۳] در سال ۱۹۷۶ جریان‌های لایه‌های استیوارسون را مورد توجه قرار دادند. آن‌ها اثر عایق کاری حرارتی بر روی صفحات انتهایی و دیواره را بررسی نمودند. در این میان آثار ارزنده‌ی اولاندر [۴] در سال ۱۹۷۲، آوری و دوپس [۵] در سال ۱۹۷۳ و ویلانی [۶] در سال ۱۹۷۶ را نباید نادیده گرفت. در ضمن کار بسیار ارزشمند، هوگلاند و همکارانش [۷] در سال ۱۹۷۹ در مورد فرایند جداسازی به کمک سانتریفوژهای گازی را نیز باید در نظر داشت. یکی از تئوری‌های بسیار ارزشمند براساس لایه‌های مرزی عمودی و افقی است که ضخامت آن‌ها براساس عدد اکمان^(۲) E ، بیان می‌شود. این مقادیر برابر $E^{\frac{1}{2}}$ ، $E^{\frac{1}{4}}$ و $E^{\frac{1}{3}}$ است و برای محاسبه‌ی میدان سرعت در داخل سانتریفوژ ارایه شده‌اند [۶]. شکل ۱ لایه‌های مرزی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار لایه‌های مرزی.

می‌توان به معادله‌ی انسانجر^(۵) [۴] نیز اشاره کرد. دستگاه معادلات پایستگی برای محاسبه‌ی میدان سرعت به یک معادله‌ی دیفرانسیلی مرتبه‌ی ۶ تبدیل و در نهایت معادلات با گذراندن فرض‌هایی، به شکل معادله یا مدل معروف [۴] انسانجر-پانکیک درآمده و تلاش‌های فراوانی برای حل آن صورت گرفته است.

۲- معادلات حرکت

میدان کامل سرعت داخل روتور سانتریفوژهای گازی توسط معادلات حرکت معین می‌شود. در نبود اغتشاشات گرمایی یا مکانیکی، گاز درون روتور به یک حالت تعادل ترمودینامیکی رسیده و به صورت یک جسم صلب به گردش درمی‌آید که دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد

$$V_{\theta eq} = \Omega r, V_{z eq} = 0, V_{r eq} = 0, T_{eq} = T_0$$

$$\rho_{eq} / \rho_w = p_{eq} / p_w = \exp \left\{ -A^2 \left[1 - \frac{r^2}{r_w^2} \right] \right\} \quad (1)$$

در این روابط، V_θ و V_r ، V_z به ترتیب، مؤلفه‌های محوری، شعاعی و زاویه‌ای سرعت و ρ ، P ، T هم به ترتیب، متغیرهای ترمودینامیکی فشار، چگالی و دما و شاخص eq نشان‌گر شرایط تعادل، Ω سرعت زاویه‌ای روتور، r_w شعاع روتور و T دمای گاز می‌باشد. کمیت بدون بعد A نیز به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود

در سال ۲۰۰۵ معادله‌ی ساده‌ای توسط هیو و همکارانش برای محاسبه‌ی میدان سرعت در داخل سانتریفوژ ارایه شد که در آن سرعت، به صورت محوری در نظر گرفته شده و از مؤلفه‌های شعاعی و سمتی سرعت صرف‌نظر شده است. نهایتاً، یک معادله‌ی دیفرانسیلی مرتبه سه به دست آمده است که مؤلفان کاملاً مثل معادله‌ی انرژی سعی در حل تحلیلی آن داشته‌اند. هدف این مقاله به دست آوردن میدان سرعت در داخل سانتریفوژهای گازی با استفاده از روش‌های عددی و استفاده از آن برای حل معادله و پخش و در نهایت محاسبه‌ی ضریب جداسازی^(۳) α و بررسی وابستگی α به سرعت (A^2) ، برش^(۴) (θ) و نرخ ورود جریان گاز می‌باشد. تلاش‌های زیادی برای به دست آوردن میدان سرعت در داخل سانتریفوژ انجام شده است [۸] تا [۱۱].



پیوستگی جرم

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_{eq} ru) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_{eq} w) = 0 \quad (4)$$

تکانه‌ی شعاعی

$$-\bar{\rho} r \Omega^2 - 2\rho_{eq} \Omega v = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \alpha \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) \right] + \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5)$$

تکانه‌ی زاویه‌ای

$$2\rho_{eq} \Omega u = \alpha \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right] + \alpha \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (6)$$

تکانه‌ی محوری

$$0 = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \alpha \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (7)$$

معادله‌ی انرژی

$$-\rho_{eq} \Omega^2 ru = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (8)$$

معادله‌ی حالت گاز

$$\bar{\rho} = \left(\frac{M}{RT_0} \right) \bar{p} - \rho_{eq} \left(\frac{\bar{T}}{T_0} \right) \quad (9)$$

در معادله‌ی حرکت گاز در مقاله‌ی حاضر اثر پوشش‌های انتهایی^(۶) روی جریان داخلی در نظر گرفته نشده و فرض بر این است که جریان فقط مؤلفه محوری دارد. این مدل برای هر مقداری از A^2 قابل استفاده است و لزومی ندارد که حتماً $A^2 \gg 1$ باشد (برای حل معادله‌ی انساجر مقدار A^2 بزرگ‌تر از یک در نظر گرفته شده است).

با حذف اغتشاش فشار و چگالی از معادله‌ی پیوستگی جرم، معادلات تکانه‌های محوری، شعاعی و معادله‌ی حالت و با فرض

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \text{ و } V_r = V_\theta = 0$$

چنین به دست می‌آید.

$$\alpha \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial^2 v'_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v'_z}{\partial r} \right) = \frac{\alpha M \Omega^2 r}{RT_0} \left(\frac{\partial^2 v'_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v'_z}{\partial r} \right) - \frac{\rho_0 \Omega^2 r}{T_0} \frac{\partial T'}{\partial r} \quad (10)$$

$$A^2 = \frac{M \Omega^2 r_w^2}{2RT_0} \quad (2)$$

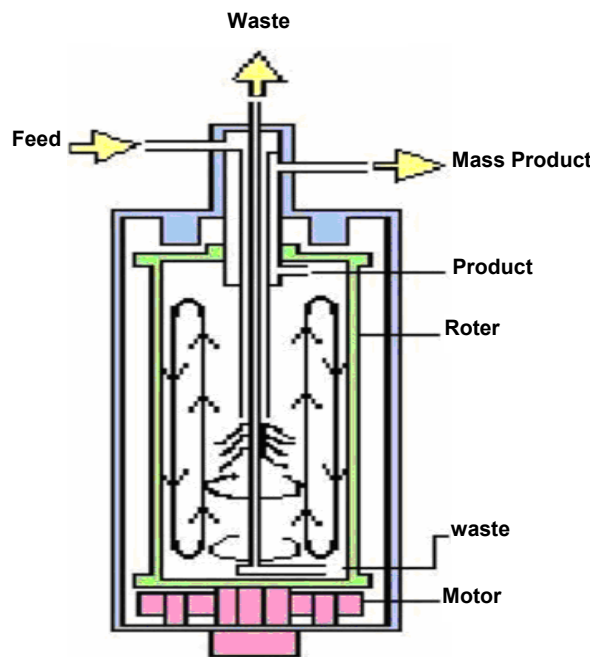
که در آن R ثابت گازها و M وزن مولکولی است. A نسبت سرعت محیطی به محتمل‌ترین سرعت مولکولی گاز می‌باشد که تقریباً برابر عدد ماخ دیواره‌ی روتور است [۴].

انحراف مؤلفه‌های سرعت و متغیرهای ترمودینامیکی از حالت تعادل به اندازه‌ی کوچک است که به صورت اغتشاش در نظر گرفته می‌شود. بنابراین

$$V_r = 0 + u; V_\theta = \Omega r + v; V_z = 0 + w \quad (3)$$

$$p = p_{eq} + \bar{p}; \rho = \rho_{eq} + \bar{\rho}; T = T_0 + \bar{T}$$

در معادلات بالا w ، مؤلفه‌ی سرعت اغتشاشی در راستای ارتفاع، و u و v به ترتیب، مؤلفه‌های مماسی و شعاعی آن، و T_0 دمای تعادلی گاز می‌باشد. با قرار دادن مقادیر اغتشاش در معادلات حرکت گاز و حذف توان‌های بالاتر از یک برای این مقادیر، مجموعه معادلات خطی شده‌ی حرکت در مختصات استوانه‌ای با تقارن محوری و در حالت یکنواخت برای یک سانتریفوژ که طرح‌واره‌ی آن در شکل ۲ نشان داده شده است، به دست می‌آید [۴]



شکل ۲- طرح‌واره‌ی یک سانتریفوژ گازی.



برای معادله انرژی داریم

$$\left(\frac{1}{2\pi\rho D_i} \int_0^{r_w} \frac{\Psi^2}{r} dr + \pi\rho D_i r_w^2 \right) \frac{dx_i}{dz} = \frac{\Omega^2(\bar{M} - M_i)x_i}{RT} \int_0^{r_w} \psi r dr - (P_{iL}^* - P^* x_i)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

که در آن $\Psi = \int_0^r \rho w \psi \pi r dr$ تابع جریمان،
 P_{iL}^* شار محوری جریان مخلوط گاز،
 $P^* = \begin{cases} P; z_F \leq z \leq Z \\ -W; 0 \leq z \leq z_F \end{cases}$ شار محوری جریان برای ایزوتوپ α ،
 ρ چگالی گاز،
 $D_i = \sum_{k=1}^n \frac{D_{ik}}{X_i}$ (که در آن D_{ik} ضریب پخش دو گانه است) و
 $\bar{M} = \sum_{i=1}^n M_i X_i$ وزن متوسط مخلوط گازی یعنی \bar{M} است که
اگر گاز به صورت مخلوطی از دو ایزوتوپ باشد، می‌توان آن را
به صورت زیر نوشت

$$\bar{M} - M_i = \sum_{j=1}^2 M_j X_j - M_i = \Delta M(1 - x) \quad (15)$$

که در آن، ΔM اختلاف وزن مولی دو ایزوتوپ بوده و برابر ۳ در نظر گرفته شده است. برای کوتاه‌تر شدن عبارت‌های این معادله پارامترهای بدون بعدی تعریف می‌شوند که در پیوست ۱ آورده شده‌اند (z_F ارتفاع محل تغذیه‌ی گاز و z_H کل ارتفاع روتور سانتریفوژ است). شکل خلاصه شده‌ی معادله‌ی غلظت ایزوتوپ مورد نظر به صورت زیر است

$$(m^2 + 1) \frac{dx}{d\eta} = \varepsilon_{S0} \sqrt{2E_F} m x(1-x) - \phi \left(\frac{P_L^*}{P^*} - x \right) \quad (16)$$

شرایط مرزی این معادله عبارت است از:

(۱) در بخش غنی‌کننده

$$\begin{cases} x = x_0 & ; \quad \eta = \eta_F \\ x = x_p & ; \quad \eta = \eta_H \end{cases}$$

(۲) در بخش تهی‌کننده

$$\begin{cases} x = x_0 & ; \quad \eta = \eta_F \\ x = x_w & ; \quad \eta = 0 \end{cases}$$

و ($x_F \neq x_0$)

در این روابط، x_p غلظت محصول و x_w غلظت پس‌ماند و x_0 غلظت در محلی است که در آن خوراک به درون روتور و به جریان محوری داخلی تزریق می‌گردد.

$$0 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T'}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T'}{\partial z^2} \quad (11)$$

که در آن، پریم نشان‌دهنده‌ی مقادیر اغتشاش و شاخص بیان‌گر حالت تعادل گاز می‌باشد. در پارامترهای بدون بعد داده شده در پیوست ۱، ρ_w چگالی گاز روی دیواره، r_w شعاع سیلندر روتور سانتریفوژ، α گران روی گاز، M جرم مولی گاز، R ثابت گازها، T_0 دمای داخلی گاز می‌باشد، با وارد نمودن این پارامترهای بدون بعد در معادلات بالا و ادغام آن‌ها با یک‌دیگر داریم

$$\frac{d^2}{d\xi^2} \left[\left(1 - \frac{\xi}{A^2} \right) \frac{dw}{d\xi} \right] + \frac{d}{d\xi} \left[\left(1 - \frac{\xi}{A^2} \right) \frac{dw}{d\xi} \right] = \frac{\text{Re} \left[\frac{r_w}{T_0} \left(\frac{dT_w}{dz} \right) \right]}{8A^6} e^{-\xi} \quad (12)$$

شرایط مرزی را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت. شرایط مرزی ۱ و ۲ این حقیقت را بیان می‌کنند که سرعت محوری روی دیواره، و مشتق آن در داخل روتور در ناحیه‌ی مرزی برابر صفر است.

$$1) w=0 ; \quad \xi=0$$

$$2) \frac{dw}{d\xi} = 0 ; \quad \xi = A^2 \varepsilon$$

$$3) P^* = \frac{\pi\rho_w \Omega r_w^3}{A^2} \int_0^{A^2 \varepsilon} w e^{-\xi} d\xi \quad (13)$$

که در آن، $\varepsilon = 1 - \left(\frac{r_0}{r_w} \right)^2$ و $P^* = 0$ (در حالتی که تنها شیب دما عامل محرک باشد) و در عوامل محرک دیگر $P^* = P$ (در قسمت غنی‌کننده) و $P^* = -W$ (در قسمت تهی‌کننده) است، P^* شار خالص محوری مخلوط و T_0 شعاع میله‌ی ورودی گاز می‌باشد [۱۲].

۳- معادله‌ی پخش و شرایط مرزی آن

برای تعیین توزیع غلظت ایزوتوپ‌های مختلف در درون سانتریفوژ، مجموعه‌ای از معادله‌های غلظت باید حل شوند. با محاسبه‌ی غلظت‌های گاز در خروجی‌های محصول و پس‌ماند، می‌توان ضریب جداسازی α را به دست آورد. معادله‌ی پخش برای چند ایزوتوپ به صورت زیر است [۱۳]



۰،۸۱۴۵ می‌رسد. E_F بازده الگوی جریان^(۹) و نشان‌دهنده‌ی کاهش بازده در اثر انحراف الگوی سرعت محوری از حالت آرمانی خود است. E_F به پارامتر سرعت A^2 وابسته بوده و مقدار آن برای جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیم بسیار بالا است. E_E بازده تجربی^(۱۰) است و اگر در مورد آن اطلاعاتی موجود نباشد، مقدار آن برابر یک گرفته می‌شود. بنابراین، E_F برابر مقدار زیر است

$$E_F = \frac{4 \left(\int_0^{r_w} \psi r dr \right)^2}{r_w^4 \int_0^{r_w} \frac{\psi^2}{r} dr} \quad (22)$$

که با توجه به تابع جریان تعریف می‌شود [۱۵].

۵- حل عددی معادلات

برای حل معادله‌ی دیفرانسیلی (۱۲) از روش تفاضل محدود استفاده شده است

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{d\xi^2} \left[\left(1 - \frac{\xi}{A^2} \right) \frac{dw}{d\xi} \right] + \frac{d}{d\xi} \left[\left(1 - \frac{\xi}{A^2} \right) \frac{dw}{d\xi} \right] = \\ \frac{d^3 w}{d\xi^3} - \frac{2}{A^2} \frac{d^2 w}{d\xi^2} - \frac{\xi}{A^2} \frac{d^3 w}{d\xi^3} + \frac{d^2 w}{d\xi^2} - \frac{1}{A^2} \frac{dw}{d\xi} - \frac{\xi}{A^2} \frac{d^2 w}{d\xi^2} = \\ \left(1 - \frac{\xi}{A^2} \right) \frac{d^3 w}{d\xi^3} + \left(-\frac{2}{A^2} + 1 - \frac{\xi}{A^2} \right) \frac{d^2 w}{d\xi^2} - \frac{1}{A^2} \frac{dw}{d\xi} \end{aligned} \quad (23)$$

که با به کارگیری روش تفاضل محدود، خواهیم داشت

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{\xi_i}{A^2} \right) (w_{i+2} - 3w_{i+1} + 3w_i - w_{i-1}) + \\ h \left(1 - \frac{\xi_i}{A^2} - \frac{2}{A^2} \right) (w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}) + \\ \frac{h^2}{2} \left(-\frac{1}{A^2} \right) (w_{i+1} - w_{i-1}) = h^3 \lambda e^{-\xi_i} \end{aligned} \quad (24)$$

$i = 2, \dots, N-2$

شرط مرزی اول شرط عدم لغزش می‌باشد. با توجه به مشخص بودن این مقدار، یک معادله از تعداد معادلات کم می‌شود. شرط مرزی دوم به صورت یک ورودی از ماتریس ضرایب اعمال می‌شود. به همین ترتیب انتگرال شرط مرزی سوم نیز با استفاده از

دو پارامتر m و E_F در معادله‌ی (۱۶) را باید از حل معادلات گاز درون سانتریفوژ به دست آورد.

با اعمال شرایط مرزی بخش غنی‌کننده در معادله‌ی (۱۶)

خواهیم داشت

$$x_p = \frac{b_e + a_e \left((x_0 - b_e) / (a_e - x_0) \right) e^{k_{0e} (a_e - b_e) (\eta_H - \eta_F)}}{1 + \left((x_0 - b_e) / (a_e - x_0) \right) e^{k_{0e} (a_e - b_e) (\eta_H - \eta_F)}} \quad (17)$$

که در آن، پارامترهای a_e ، b_e و k_{0e} مقادیر a ، b و k_0 در بخش غنی‌کننده می‌باشند [۱۲]

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{2} \left[(1+c) - \sqrt{(1+c)^2 - 4 \frac{P_L^*}{P^*} c} \right] \\ b &= \frac{1}{2} \left[(1+c) + \sqrt{(1+c)^2 - 4 \frac{P_L^*}{P^*} c} \right] \\ c &= \frac{\phi}{\varepsilon_{s0} m \sqrt{2E_F}} \\ k_0 &= \frac{\varepsilon_{s0} m \sqrt{2E_F}}{1+m^2} \end{aligned} \quad (18)$$

۴- تعریف E_F

پیشینه‌ی توان جداسازی یک گاز دو ایزوتوپی در یک سانتریفوژ گازی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]

$$\delta U_{\max} = \frac{\pi}{2} \rho D Z_H \left(\frac{\Delta M \Omega^2 r_w^2}{2RT_0} \right)^2 \quad (19)$$

در عمل، توان جداسازی یک سانتریفوژ (δU_R) کوچک‌تر از δU_{\max} بوده و برابر حاصل ضرب δU_{\max} در بازده جداسازی E می‌باشد

$$\delta U_R = E \delta U_{\max} \quad (20)$$

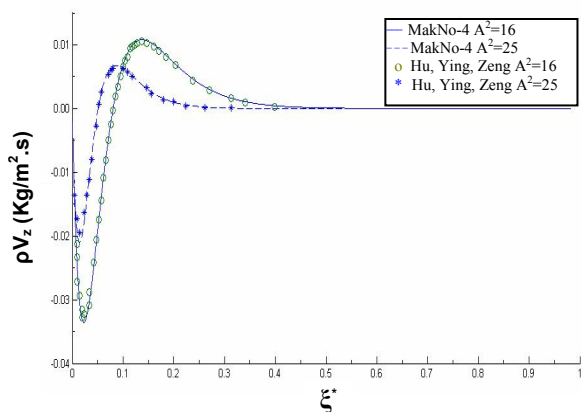
که در آن، E خود به صورت زیر تعریف می‌شود

$$E = E_c E_I E_F E_E \quad (21)$$

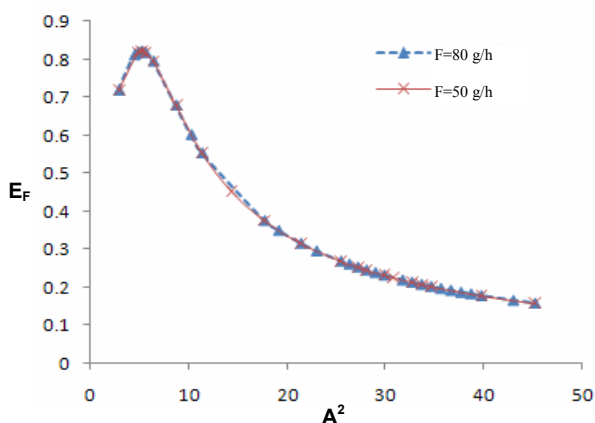
که در آن E_C بازده گردش^(۷) سیال، E_I بازده آرمان‌وارگی^(۸) است، که اگر نرخ گردش ثابت بماند به پیشینه مقدارش،



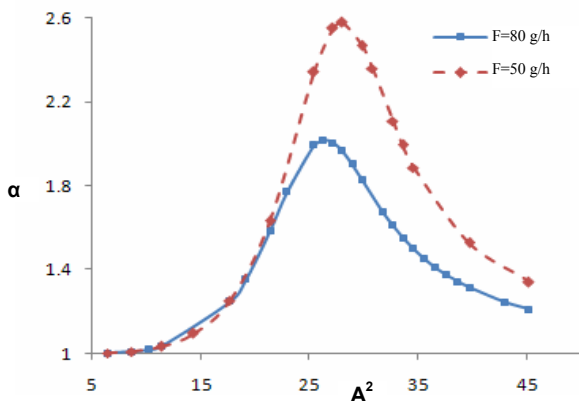
نمودار شکل ۷ مشابه نمودار ارائه شده توسط اچ. جی. وود و همکارانش [۱۵] است با این تفاوت که گاز مورد بررسی به وسیله‌ی آنها زنون می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش نرخ جریان گاز ورودی ضریب جداسازی کاهش می‌یابد.



شکل ۳- توزیع سرعت $\xi^* = \frac{\xi}{A^2}$.



شکل ۴- بازده الگوی جریان بر حسب سرعت.



شکل ۵- ضریب جداسازی به صورت تابعی از سرعت.

قاعده‌ی دوزنقه‌ای برآورد می‌شود تا با قرارگیری در ماتریس ضرایب مجهولات که همان نقاط محدوده‌ی مورد بررسی می‌باشند، تعداد معادلات با مجهولات برابر گردد.

$$\int_0^{A^2} w e^{-\xi} d\xi = \frac{P^* A^2}{\pi \rho_w \Omega r_w^3} \quad (25)$$

با به کارگیری قاعده‌ی دوزنقه‌ای، معادله‌ی زیر به دست می‌آید

$$he^{-h} w_1 + he^{-2h} w_2 + he^{-3h} w_3 + \dots + he^{-(n-1)h} w_{n-1} + 0.5he^{-nh} w_n = \frac{P^* A^2}{\pi \rho_w \Omega r_w^3} \quad (26)$$

که در آن، w_n مقدار سرعت در نقطه‌ی n است و مقدار w_0 با توجه به شرط مرزی عدم لغزش، بر روی دیواره صفر در نظر گرفته شده است.

۶- نتایج محاسبات

محاسبات برای سانتریفوژی به قطر سیلندر روتور ۱۸/۲۹cm، ارتفاع روتور ۳۳۵/۳cm، دمای متوسط گاز ۳۰۰K، فشار دیواره‌ی ۱۳/۳kPa و اختلاف دمای محوری ۱K و برش ۰/۴۵ که در آن گاز UF_6 از میان محور مرکزی به داخل سیلندر روتور جریان می‌یابد و سرعت چرخش نیز با پارامتر A^2 مشخص می‌گردد، انجام شده است.

در شکل ۳ توزیع سرعت با استفاده از برنامه‌ی MakNo-4، به روش عددی محاسبه و با نتایج داده شده توسط هیو و همکارانش [۱۲] مقایسه شده است.

ابتدا نمودار بازده الگوی جریان برای سرعت‌های مختلف روتور ترسیم می‌شود تا بتوان از این نمودار برای تعیین ضرایب معادله‌ی غلظت (۱۴) استفاده کرد. در شکل ۴ بازده الگوی جریان بر حسب سرعت برای دو دبی متفاوت خوراک رسم شده است.

در شکل ۵ ضریب جداسازی $\alpha = \frac{x_p / (1 - x_p)}{x_w / (1 - x_w)}$ به صورت تابعی از سرعت برای نرخ‌های جریان گاز ورودی ۵۰ و ۸۰ گرم بر ساعت نشان داده شده است.

ضریب جداسازی در شکل ۶ بر حسب برش ماشین و در شکل ۷ به صورت تابعی از نرخ جریان گاز ورودی نشان داده شده است.



پیوست ۱: معادلات مربوط به ساده‌سازی توزیع غلظت‌ها.

$$\eta = \frac{Z}{r_w} \quad (۱)$$

$$\eta_H = \frac{Z_H}{r_w} \quad (۲)$$

$$\eta_F = \frac{Z_F}{r_w} \quad (۳)$$

$$\varphi = \frac{P^*}{\pi \rho D r_w} \quad (۴)$$

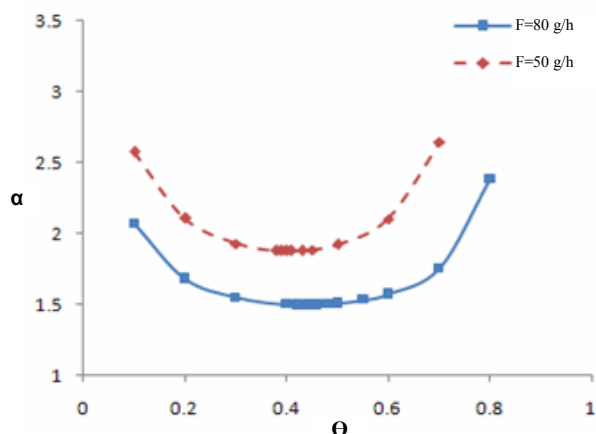
$$\varepsilon_{s0} = \frac{\Omega^2 r_w^2 \Delta M}{2RT} \quad (۵)$$

$$E_F = \frac{4 \left(\int_0^{r_w} \psi r dr \right)^2}{r_w^4 \int_0^{r_w} \frac{\psi^2}{r} dr} \quad (۶)$$

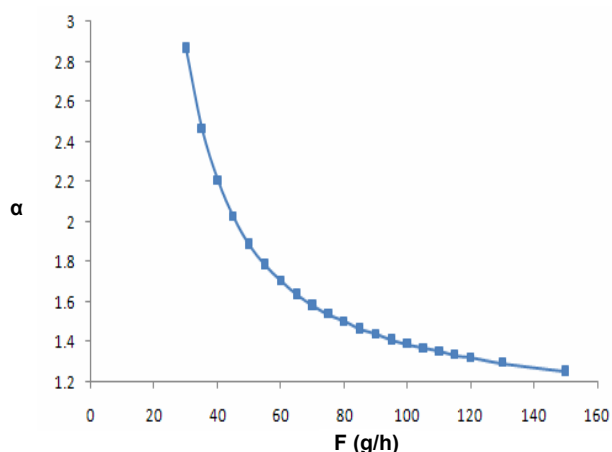
$$m = \frac{\left(\int_0^{r_w} \frac{\psi^2}{r} dr \right)^{0.5}}{\sqrt{2\pi\rho D r_w}} \quad (۷)$$

پی نوشت‌ها:

- ۱- Stewartson
- ۲- Ekman
- ۳- Separation Factor
- ۴- Cut
- ۵- Onsager
- ۶- End Caps
- ۷- Circulation Efficiency
- ۸- Ideality Efficiency
- ۹- Flow Pattern Efficiency
- ۱۰- Experimental Efficiency



شکل ۶- ضریب جداسازی به صورت تابعی از برش برای نرخ‌های مختلف جریان گاز ورودی.



شکل ۷- تغییرات ضریب جداسازی با نرخ جریان گاز ورودی.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به شکل ۴، تغییر نرخ جریان گاز ورودی، اثر چشم‌گیری بر روی بازده الگوی جریان ندارد. بیش‌ترین مقدار ضریب جداسازی در شکل ۳ در گستره‌ی سرعت ۲۵ تا ۳۵ است. علی‌رغم بالا نبودن بازده الگوی جریان در این محدوده، افزایش مقدار m در معادله‌ی غلظت (۱۴) به اندازه‌ای است که کاهش E_F را جبران می‌کند. علت کاهش α در سرعت‌های بالا در شکل ۳، به وجود آمدن جریان‌های متلاطم است. همان‌گونه که از این نمودارها برمی‌آید، با کاهش نرخ جریان گاز ورودی، ضریب جداسازی افزایش می‌یابد. ولی باید مواظب بود که این کاهش جریان گاز ورودی، توان جداسازی دستگاه را تقلیل ندهد.



References:

1. F.H. Bark and T.H. Bark, "On vertical boundary layers in a rapidly rotating gas," *J. Fluid Mech*, 78, 749-761 (1976).
2. J.J.H. Brouwers, "On the motion of a compressible fluid in a rotating cylinder," Ph.D. Thesis, Twente University of Technology, Enschede, The Netherlands (1976).
3. T. Matsuda and K. Hashimoto, "Thermally, mechanically or externally driven flows in a gas centrifuge with insulated horizontal end plates," *J. Fluid Mech*, 78, 337-354 (1976).
4. D.R. Olander, "Technical basis of the gas centrifuge," *Advances in Nuclear Science and Technology*, Vol. 6, Academic (1972).
5. D.G. Avery and E. Davies, *Uranium Enrichment by Gas Centrifuge*, London: Mills and Boon (1973).
6. S. Villani, *Isotope Separation*. American Nuclear Society (1976).
7. R.L. Hoglund, J. Shacter, E. Von Halle, "Diffusion separation methods," In *Encyclopedia of Chemical Technology*, Vol. 7, 3rd edn (ed. R. E. Kirk & D. F. Othmer). Wiley (1979).
8. M. Steenbeck, *Kernenergie*, 1, 921 (1958).
9. H.M. Parker and T.T. Mayo, U.S. AEC Rep. UVA-279-63U (1963).
10. Soubbaramayer, CEA Internal Rep. GC-588 (1961).
11. A.S. Berman, U.S. AEC Rep. K-1535 (1963).
12. J. Hu, C. Ying, S. Zeng, "Overall separation factor in a gas centrifuge using a purely axial flow model," *Separation Science and Technology*, 40, 2139-2152 (2005).
13. C. Ying, Z. Guo, H.G. Wood, "Solution of the diffusion equations in a gas centrifuge for separation of multicomponent mixtures," *Separation Science and Technology*, 31(18), 2455-2471 (1996).
14. H.G. Wood, C. Ying, S. Zeng, Y. Nie, X. Shang, "Estimation of overall separation factor of a gas centrifuge for different multicomponent mixtures by separation theory for binary case," *Separation Science and Technology*, 37(2), 417-430 (2002).