



## تحلیل جریان گاز $UF_6$ و مدل سازی نحوه قرار گیری و برخورد گاز به اسکوب ها (Scoops) در یک سانتریفیوژ گازی

فرزین، آقابابایی<sup>۱\*</sup>، محمد ره گشای<sup>۲</sup>

Farzin.babae2001@gmail.com  
m.rahgoshay@gmail.com

### چکیده:

ما در این مقاله برای محاسبه نیروی هیدرودینامیکی از دو مدل سانتریفیوژ گازی می پردازیم، مدل اول از طریق شرایط مرزی شبیه سازی حرکت اسکوب ها و مدل دوم بررسی نیروی دراگ در اتافک سانتریفیوژ گازی است. تحلیل عددی این مدل بر اساس روش حجم محدود با نوع مش بندی مستطیلی با نقاط گرهی ثابت می باشد. همگرایی در این مدل یکی از مباحث مهم می باشد. سانتریفیوژ مورد استفاده در این تحلیل به صورت یک سیلندر عمودی از نوع جریان Counter-current اروپایی می باشد، Feed از سمت بالا وارد شده و Product از طرف بالا و Tail از پایین سانتریفیوژ، خارج می شوند مزیت این متد در بهبود عملکرد جدایی است. به طوریکه موقعیت Feed تقریباً در نیمی از ارتفاع در امتداد خط مرکزی بوده و جایگاه جریان Feed در داخل سیلندر اهمیت بسیار زیادی در Product، Tail و لایه های مرزی دارد.

کلمات کلیدی: نیروی دراگ، سانتریفیوژ گازی، حجم محدود، همگرایی عددی.

### ۱- مقدمه:

اساس سانتریفیوژ گازی بدین شرح است که: در اثر گردش گاز در حالت بسته، سنگین ترین اجزا در نزدیکی دیواره چرخش و به سمت پایین و اجزا سبک در امتداد خط مرکزی به سمت بالا حرکت می کنند. جدا سازی جریان گاز در نزدیکی Center line از پایین به بالا و در دیواره سیلندر از بالا به پایین است. گردش گاز در داخل سیلندر در امتداد دیواره سیلندر و کلاک های انتهایی بوده که در نتیجه آن باعث ایجاد لایه های گاز و نواحی جریان در این راستا می گردد. اساس مدل کردن Scoops، نقش

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشگاه علوم تحقیقات تهران / ۰۹۱۴۴۹۱۱۹۹۰

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده فنی مهندسی دانشگاه علوم تحقیقات تهران



برجسته در نوع و اندازه و جهت قرار گیری اسکوب ها از مباحث بسیار مهم می باشند. استخراج میزان گاز در یک سانتریفیوژ بر اساس ترمهای  $M_s, U_s, T_s, P_e, F_e$ ، که به ترتیب نیروی وارده بر اسکوب، قدرت ذخیره، درجه حرارت اسکوبها، سرعت در سه جهت  $(r, \theta, z)$ ، جرم گاز عبوری می باشد. [1]

۲- اساس سانتریفیوژ گازی کوتاه:

سانتریفیوژ مورد استفاده در این تحلیل به صورت یک سیلندر عمودی از نوع جریان Counter-current، اروپایی می باشد، Feed از سمت بالا وارد شده و Product از طرف بالا و Tail از پایین سانتریفیوژ، خارج می شوند مزیت این متد در بهبود عملکرد جداسازی است. به طوریکه موقعیت Feed تقریباً در نیمی از ارتفاع در امتداد خط مرکزی بوده و جایگاه جریان Feed در داخل سیلندر اهمیت بسیار زیادی در Product، Tail و لایه های مرزی دارد. توضیح این اثر بدین شرح است که: در این گردش بسته، سنگین ترین اجزا در نزدیکی دیواره چرخش و به سمت پایین و اجزا سبک در امتداد خط مرکزی به سمت بالا حرکت می کنند. جدا سازی جریان گاز در نزدیکی Center line از پایین به بالا و در دیواره سیلندر از بالا به پایین است. گردش گاز در داخل سیلندر در امتداد دیواره سیلندر و کلاهک های انتهایی بوده که در نتیجه آن باعث ایجاد لایه های گاز و نواحی جریان در این راستا می گردد.

۳- معادلات حاکم بر جریان سیال دینامیکی:

در این قسمت به تحلیل و تجزیه مدلهای ریاضی بدست آمده می پردازیم. بعد از حل معادلات بقاء انرژی؛ ممنتوم؛ پیوستگی؛ جرم؛ معادله حالت برای گاز ایده آل تراکم ناپذیر و گسسته سازی معادلات غیرخطی بیضوی داریم:

$$\underline{v}^* = \frac{v}{U}, P^* = \frac{P_r}{\rho_w \Omega a U}, \rho^* = \frac{\rho}{\rho_w}, T^* = \frac{T}{T_0}, Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}, Br = \frac{\mu V_w^2}{\lambda T_0} = \frac{2A\mu R_0}{\lambda M}, Re = \frac{\rho_w a V_w}{\mu}$$

$$z = \frac{Z}{l}, L = \frac{l}{a}, r = \frac{R}{a}, V_w = \Omega a, A = \frac{M V_w^2}{2R_0 T_0}, E = \frac{v U / a^2}{\Omega U} = \frac{v}{\Omega a^2}, \varepsilon = \frac{U^2 / a}{\Omega U} = \frac{U}{\Omega a} \quad (1)$$

$V_w$  = سرعت دیواره،  $\rho_w$  = دانسیته دیواره،  $a$  = شعاع سیلندر،  $P_w$  = فشار دیواره

$\Omega$  = سرعت زاویه ای در چرخش سیلندر،  $L$  = نسبت طول بدون بعد،  $Br$  = عدد برینکمن،  $E$  = عدد اکمن

$\varepsilon$  = عدد راسبی،  $A$  = پارامتر سرعت،  $Re$  = عدد رینولدز،  $Pr$  = عدد پرانتل،  $z$  = ارتفاع سانتریفیوژ بدون بعد، تمامی روابط با رابط ستاره، معادله بی بعد شده می باشند.

معادله ممنتوم محوری:

$$0 = -\frac{1}{L} \frac{\partial (P_r^{**})}{\partial z} + E \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 w}{\partial Z^2} + \frac{1}{3L} \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^* \underline{v}^*) \right] \quad (2)$$



معادله ممنتوم شعاعی:

$$r(\theta - 2\omega)e^{-x} = -\frac{\partial(P_r^{**})}{\partial r} + E \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial ru}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{L^2 \partial z^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial r} (\nabla^* \underline{v}^*) \right] \quad (3)$$

معادله ممنتوم زاویه ای:

$$\frac{2ue^{-x}}{r} = E \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial r^2 \omega}{\partial r} \right) + \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

معادله بقای انرژی:

$$-Bre^{-x}ur = E \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] \quad (5)$$

$$\theta = \text{درجه حرارت} , \omega = \text{سرعت زاویه ای} , x = \text{مختصات شعاعی بدون بعد} = A(1-r^2)$$

لایه های مرزی در امتداد دیواره و به طور خاص در امتداد کلاهک های بالو پائین بسیار نازک هستند و این یک چالش اصلی و مهم در تعیین جریان اصلی در سانتریفیوژ است. خواص حرارتی دیواره سیلندر و کلاهک های انتهایی و همچنین ضریب انتقال حرارت بین سیلندر دوار و محیط اطراف اثر بسیار محدودی بر روی عملکرد جداسازی در یک سانتریفیوژ گازی کوتاه دارد.

#### ۴- مدل کردن Scoops:

اسکوب ها ، تنها قسمت سه بعدی سانتریفیوژ می باشند که در این پروژه ما تصمیم گرفته ایم ، برای حل عددی و ذخیره سازی منابع کامپیوتری ، اسکوب را به صورت اشیاء دو بعدی مدل کنیم البته با این حال ، حفظ دو نقش آنها در فرایند جداسازی را باید در نظر داشته باشیم: ۱- اجازه استخراج گاز در سانتریفیوژ توسط اسکوب با تغییر زاویا و شیب (شکل ۲ الف) که فقط از طریق شرایط مرزی مابین کاسه ها و حفره های اسکوب امکان پذیر می باشد که در آن  $P$  میزان محصول ،  $W$  میزان زباله و  $R$  میزان شدت جریان بازگشتی است. ۲- در این قسمت کل سانتریفیوژ را بررسی خواهیم کرد که شامل حفره های اسکوب و مدل سازی آنها از طریق استخراج میزان گاز در یک سانتریفیوژ بر اساس ترمهای  $M_s, U_s, T_s, P_e, F_e$  ، که به ترتیب نیروی وارده بر اسکوب ، قدرت ذخیره ، درجه حرارت اسکوبها ، سرعت در سه جهت  $(r, \theta, z)$  ، جرم گاز عبوری است ، می باشد.

نقش برجسته در نوع و اندازه و جهت قرار گیری اسکوب ها از مباحث بسیار مهم می باشند. دو اسکوب در دو انتهایی سانتریفیوژ واقع شده اند ، اسکوب بالای محصول تهی سازی شده را استخراج می کند در حالیکه اسکوب پایینی دو نقش عمده را

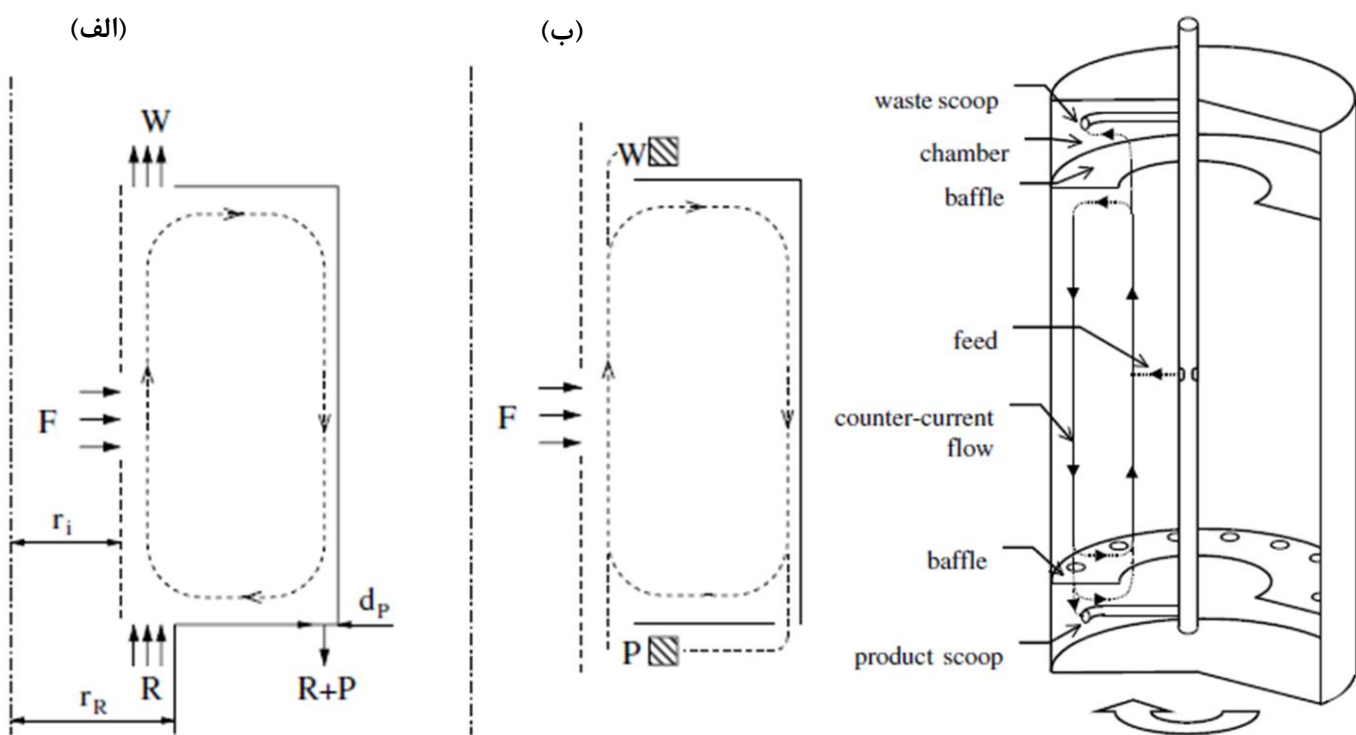
بازی می کند، ابتدا جریان غنی سازی شده را استخراج می کند و شامل یک جریان مخالف مکانیکی که در اثر کاهش چرخش جریان گازی در اثر نیروی کوریولیس است و نیز جریان مخالف حرارتی توسط اختلاف دمایی دو سر کلاهک های بالایی و پایینی ایجاد می شود. مکانیسم کاهش و افزایش جریان غنی سازی به مدل کردن نوع قرارگیری زوایای اسکوب و کاسه ها بستگی دارد بدین معنی که نیروی های وارده از طرف اسکوب بر جریان گاز را نیروی حاصله دراگ می نامیم. نیروی دراگ از دانسیته گاز و سرعت مماسی بر جریان شعاعی (Azimuthal) (رابطه ۱۶) محاسبه می گردد.

### ۵- مدل کردن Bowl:

در این مدل شبیه سازی حرکتی اسکوب ها در میان صفحات بفل و نرخ جریان مشخص می شود. بر اساس مختصات شعاعی

$r_i, r_R$ ، که شعاع داخلی و خارجی کاسه بوده (شکل ۲. الف) میزان نرخ جرمی خروجی برابر است با:

$$2\pi \int_{r_i}^{r_R} \rho u_z r dr = R \quad (۶)$$



شکل ۲- دو مدل از اسکوپها: (الف) تنها کاسه (ب) کاسه و اتاقک سانتریفیوژ، [2]

شکل ۱- شماتیک از یک سانتریفیوژ گازی کوتاه، [2]



۶- معادلات حاکم:

ابتدا معادله ناویر استوک را برای گاز کامل با دانسیته  $\rho$ ، فشار  $P$ ، دمای  $T$  و سرعت  $U = (u_r, u_\theta, u_z)$  را در حالت استوانه به صورت زیر تعریف می کنیم:

۱- معادله بقای جرم

$$\nabla \cdot (\rho U) = M_s \quad (7)$$

۲- معادله ممنتوم:

$$\nabla \cdot (\rho U \times U) + \nabla P - \nabla \cdot \tau = M_s U_s + F_e \quad (8)$$

که رابطه تنش لزجی برابر است با:

$$\tau = \mu(\nabla U) - \frac{2}{3}\mu(\nabla U) \quad (9)$$

۳- معادله انرژی:

$$\nabla \cdot \left\{ \left[ \rho \left( C_v T + \frac{1}{2} U^2 \right) + P \right] U \right\} - k \Delta T - \nabla \cdot (U \cdot \tau) = M_s \left( C_v T_s + \frac{1}{2} U_s^2 \right) + P_e \quad (10)$$

۴- معادله گاز ایده آل:

$$P = \frac{R}{M} \rho T \quad (11)$$

و رابطه جرم کل در سانتیفریوژ برابر است با:

$$m = 2\pi \int \rho r dr dz \quad (12)$$

که در آن  $F_e = (F_r, F_\theta, F_z)$  نیرو در واحد حجم،  $U_s = (u_s, v_s, w_s)$  سرعت گاز می باشد.

البته قابل ذکر است که در داخل اسکوب ها  $F_z = F_r = 0$  می باشد.

بر اساس شرایط مرزی Neumann، دانسیته جریان در حالت آشفته  $\frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$  را انتخاب می کنیم. علاوه بر این در منطقه

خروجی فرض می کنیم  $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ ،  $\frac{\partial v}{\partial z} = 0$



$$\partial T / \partial z = 0 \quad \text{و}$$

که:  $\rho_s$  = دانسیته گاز بر روی دیواره در حالت تعادل استاتیکی ،  $\Omega$  = سرعت زاویه ای ،  $M_s$  = جرم گاز در دیواره ،  $C_v$  =

ضریب ثابت گازها ،  $F_e$  = نیرو در واحد حجم برابر  $F_e = (F_r, F_\theta, F_z)$

$P_e$  = میزان قدرت ذخیره ،  $m$  = جرم کل گاز در سانتیفریوژ ،  $\mu$  = لزجت دینامیکی گاز ،

(تمامی اندیسهای  $s$  برای حالت تعادل استاتیکی می باشند)

۷- مدل کردن جریان مکانیکی اسکوپها:

نیروی دراگ در واحد حجم ( با  $F_n$  نشان داده می شود) به صورت یک مانع ثابت در جریان گاز است که متناسب با دانسیته ، توان دوم سرعت عمودی سیال ( $V_n^2$ ) می باشد که:

$$F_n = C_D \frac{1}{2} \rho V_n^2 \quad (13)$$

که در آن  $C_D$ ، به هندسه اسکوب، عدد ماخ گاز بستگی دارد. از طرفی با در نظر گرفتن  $2\pi$  رادیان در سانتیفریوژ در مورد اسکوب داریم:

$$F_\theta = -\frac{C_e}{4\pi} \rho_s \Omega^2 r_s \rho_0 (1 + \rho) \frac{(v + r)^2}{r} \quad (14)$$

که در آن  $C_e$  ضریب وابسته به عدد ماخ که مابین ۱ تا ۲ است،  $\rho_s$  دانسیته گاز در حالت تعادل استاتیکی می باشد.

معادلات حاکم بر اساس خطی سازی:

در این قسمت به تحلیل و تجزیه مدلهای ریاضی بدست آمده می پردازیم. بعد از حل معادلات بقاء انرژی؛ ممتم؛ پیوستگی؛ جرم؛ معادله حالت برای گاز ایده آل تراکم ناپذیر و خطی سازی معادلات داریم:



$$r = r_s r^* \quad , \quad z = r_s z^* \quad , \quad \rho = \rho_s \rho_0 (\rho^* + 1) \quad , \quad \rho_0 = \exp[-A(1-r^{*2})] \quad (15)$$

$$u_r = \Omega r_s u^* \quad , \quad u_\theta = \Omega r_s (r^* + v^*) \quad , \quad u_z = \Omega r_s w^* \quad , \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

$$T = T_0 (T^* + 1) \quad , \quad A = \frac{M (\Omega r_s)^2}{2RT_0} \quad , \quad E = \frac{\mu}{\Omega r_s^2 \rho_s} \quad , \quad Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

که:

$E$  = عدد اکمن ،  $Pr$  = عدد پرانتل ،  $\mu$  = لزجت دینامیکی گاز ،  $u_r, u_\theta, u_z$  = سرعت‌های گاز در جهات شعاعی و محوری و زاویه ای

معادله بقاء جرم:

$$\nabla \cdot [\rho_o (\rho^n + 1) U^n] - C_e^n r_s \rho_o (1 + \rho^n) (v^n + r) = 0 \quad (16)$$

معادله ممنتوم شعاعی:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot [\rho_o (\rho^n + 1) u^+ U^n] - \frac{\rho_o (\rho^n + 1)}{r} v^+ (v^n + 2r) + \frac{1}{2A} \rho_o \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{1}{2A} \frac{\partial}{\partial r} [\rho_o (\rho^n + 1) T] \\ - E \left( \Delta u^+ - \frac{u^+}{r^2} \right) - C_e^n r_s \rho_o (1 + \rho^n) (v^n + r) u^n = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

معادله ممنتوم محوری:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot [\rho_o (\rho^n + 1) v^+ U^n] - \frac{\rho_o (\rho^n + 1)}{r} u^+ (v^n + 2r) - E \left( \Delta v^+ - \frac{v^+}{r^2} \right) \\ - \rho_o (1 + \rho^n) (v^n + r) \times \left[ C_e^n r_s v^n - \frac{C_D^n (v^n + r)}{4\pi r} \right] = 0 \end{aligned} \quad (18)$$



معادله ممنتهم زاویه ای:

$$\nabla \cdot [\rho_o (\rho^n + 1) w^+ U^n] + \frac{1}{2A} \rho_o \frac{\partial \rho^+}{\partial z} + \frac{1}{2A} \frac{\partial}{\partial z} [\rho_o (\rho^n + 1) T] - E \Delta w^+ + [C_e^n r_s \rho_o (\rho^n + 1) \times (v^n + r) w^n] = 0 \quad (19)$$

معادله انرژی:

$$\nabla \left\{ \rho_o (\rho^n + 1) \left[ \frac{\gamma}{2A(\gamma-1)} T^+ + \frac{1}{2} \left( (u^n)^2 + (v^n)^2 + (w^n)^2 \right) \right] U^n \right\} + \frac{1}{2A} \rho_o \nabla [( \rho^n + 1) U^+] - \frac{\gamma E}{2A(\gamma-1) P_r} \Delta T^+ + \left[ \frac{C_e^n}{4\pi} (v^n + r) \right] = 0 \quad (20)$$

تمامی اندیسهای  $n$  بر حسب گامهای تکرار می باشد.

۸- شرایط مرزی:

شرایط مرزی برای ورود و خروج جریان گاز با احتساب دو مدل:

۱- دیواره سانتریفیوژ و صفحات بفل به هم بستگی دارند که:

$$u^+ = v^+ = w^+ = 0 \quad (21)$$

و درجه حرارت از:

$$T(r, z) = \frac{\Delta T}{T_0} \left( \frac{1}{2} - \frac{r_s}{z_s} \right) \quad (22)$$

که در آن  $z_s$ ، ارتفاع کل سانتریفیوژ و  $r_s$ ، شعاع خارجی دیواره سانتریفیوژ می باشد.  $(r_i, r_R)$  فاصله از خط مرکزی موهومی استوانه هستند که  $r_R > r_i$

۲- زمانیکه ما تعریف می کنیم  $z_s$ ، ارتفاع کل سانتریفیوژ است در این حالت به عنوان مرجع  $z = 0$ ، در حالت محوری و برای کلاهک پایینی انتخاب می گردد. و در مرز هسته خلاء که شامل  $r = r_i$ ، است در قسمت فید وارد داریم:





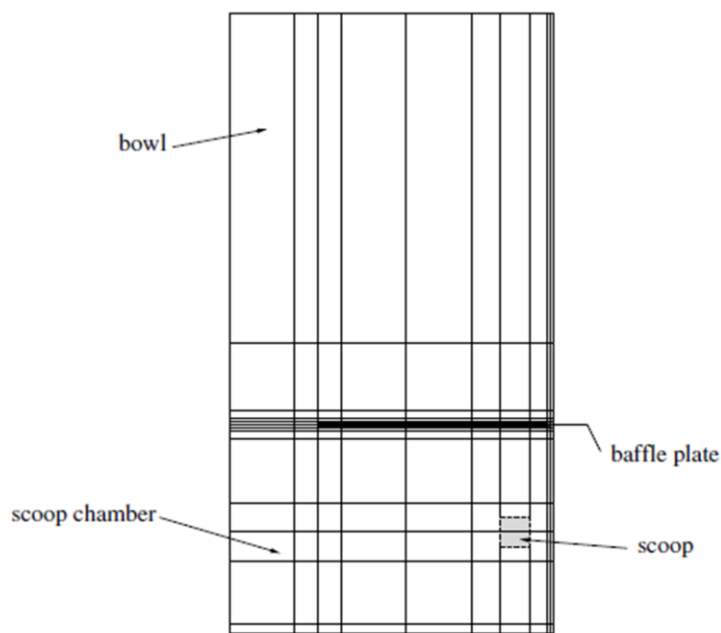
$$u^+ = \frac{F}{2\pi r_s \Omega r_s^2 h_F \rho_s \rho_0 (\rho^n + 1)}, \quad \frac{\partial \rho^+}{\partial r} = 0 \quad (23)$$

که در آن  $h_F$  ارتفاع فید وارده و  $F$  نرخ جریان فید است. و در قسمت بیرونی زون فید  $u^+ = 0$  است. همچنین از تنش برشی وارده برابر صفر است داریم:

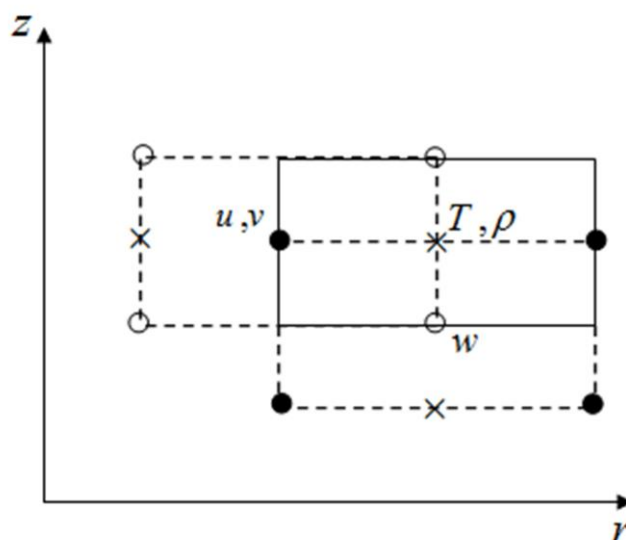
$$\frac{\partial w^+}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T^+}{\partial r} = 0 \quad (24)$$

۹- گسسته سازی معادلات خطی:

- ۱- عدد Ekman number برابر  $E = 3.36 \times 10^{-6}$  است.
- ۲- در طبقه بندی گاز  $A \approx 10$  و تغییرات نسبی  $\rho_0$  تقریباً از او رد  $10^4$  می باشد.
- ۳- با توجه به اینکه اغلب جریان گاز در نزدیکی دیواره های راست و چپ روتور و کلاهکهای بالا و پایین سانتریفیوژ می باشد بنابراین سلولهای مش بندی قدر این نواحی ریزتر بوده و از آن فاکتور  $10^{-4}$  می باشد.



شکل ۴- نوع مش بندی سانتریفیوژ با اعمال مبحث تجمع شبکه در دیواره های روتور و در اطراف کلاهک ها و اسکوپها [3]



شکل ۳- نوع مش بندی متقارن



۱۰- نتیجه گیری و همگرایی عددی :

در این قسمت نوع مش بندی ها را برای هر دو حالت تحلیل جریان گاز UF<sub>6</sub> در داخل سانتریفیوژ گازی کوتاه و نیز تغییر زوایای اسکوب ها را برای افزایش ظرفیت جداسازی با استفاده از تغییرات تعداد مش بندی سانتریفیوژ به صورت زیر داریم:

جدول ۱- میزان تغییرات مش بندی روتور در راستای شعاعی و محوری

	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$
$n_i$	40×80	60×130	80×160	100×240

که ویژگی های اصلی سانتریفیوژ انتخابی به صورت زیر است: مشخصات گاز UF<sub>6</sub> و نوع سانتریفیوژ کوتاه :

$$M = 352 \frac{kg}{kmol} \quad \mu = 1.43 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot sec} \quad \lambda = 7.35 \times 10^{-3} \frac{w}{m \cdot k^0} \quad (25)$$

$$A = 20.056 \quad Br = 2.1045 \quad E = 3.5890 \times 10^{-6} \quad \varepsilon = 0.055$$

$$F = 11.833 \times 10^{-6} \frac{KgUF6}{sec} \quad W = 5.9165 \times 10^{-6} \frac{KgUF6}{sec}$$

$$l = 110cm \quad V_w = V_a = 1300 \frac{m}{sec} \quad a = 12cm$$

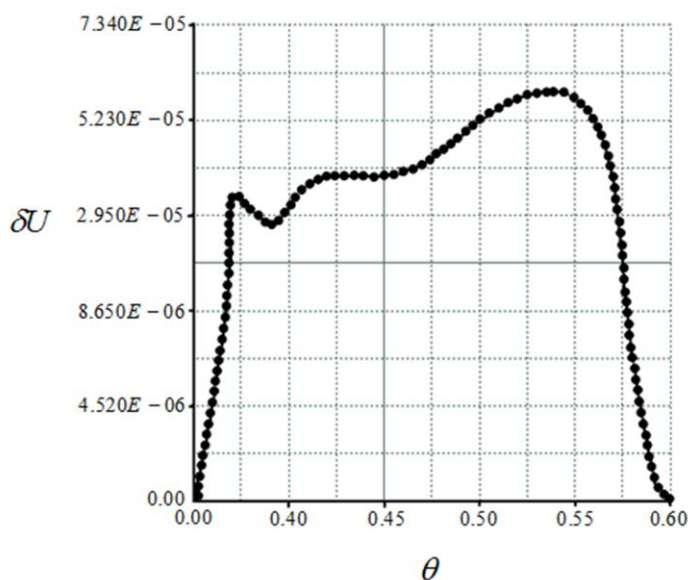
$$r_s = 0.1m \quad z_s = l = 1.1m \quad \frac{Waste}{Feed} = 0.55 \quad T_0 = 320^k$$

$$h_{Feed} = 0.08m \quad r_i = 0.032m \quad r_R = 0.042m$$

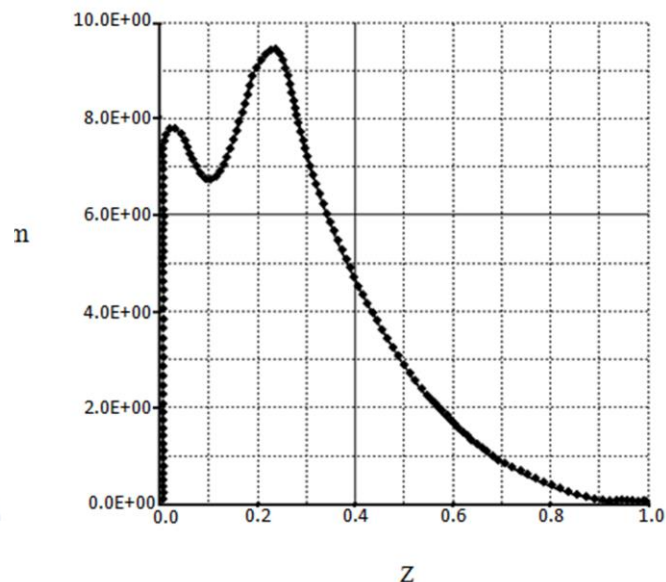
در این مقاله، مدل تحلیلی و عددی برای جریان گاز سنگین در داخل یک روتور کوتاه و همچنین جداسازی ایزوتوپها مورد بحث قرار گرفت. که نتایج این بررسی ها در گراف های ذیل مشاهده میگردد. لایه های مرزی تشکیل شده اعم از لایه استوارتسون، لایه اکمن، و نواحی جریان Viscous و Inviscid بسیار نازک بوده و دارای ضخامت بسیار کم می باشند که در این مقاله ما توانستیم این نواحی از گاز را توسط نرم افزار فلونت شبیه سازی نماییم این لایه ها در امتداد کلاهک های انتهایی ضخیم تر شده و در بعضی از نقاط به دو برابر ضخامت می رسد. همچنین در اثر اختلاف درجه حرارت مابین کلاهک های انتهایی و اختلاف سرعت زاویه ای در کلاهک های انتهایی، و تاثیر عدد Rossby و نیروی کوریولیس در جهات جریان گاز، قسمتی از گاز به درون لایه اکمن پمپ می شود که در اثر این عمل گاز وارد ناحیه Viscous و هسته diffusive می گردد و از اینها به طور غیر



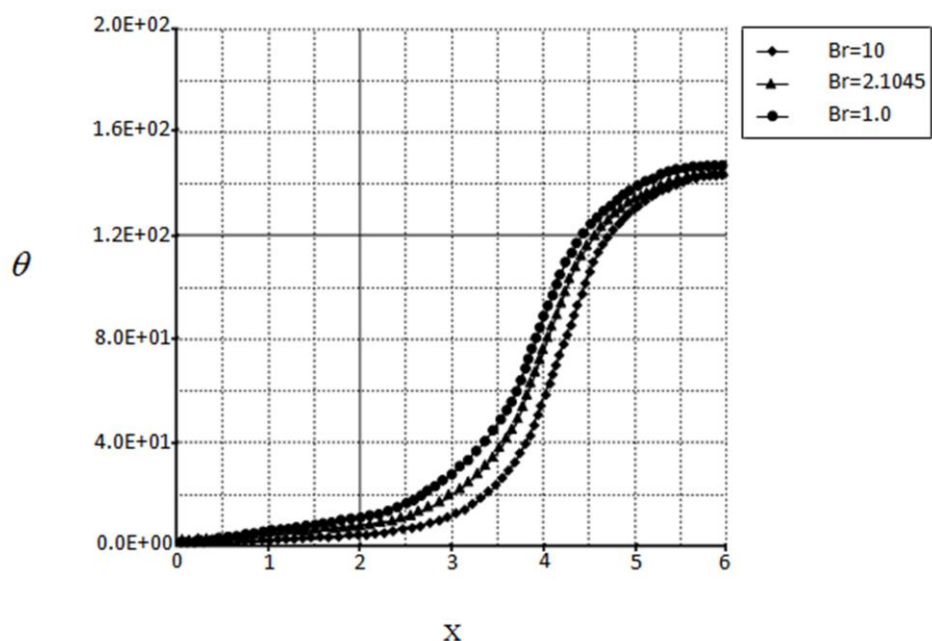
مستقیم به داخل ناحیه inviscid راه می یابد. این نتایج نشان می دهند که تابع جریان در راستای محوری به طور خطی افزایش می یابد. اختلاف درجه حرارت دیواره ها و کلاهدک های انتهایی بر روی فاکتور بازده جریان (EF) و قدرت جریان ( $m$ ) تاثیر مستقیمی دارد این نشان می دهد که خواص مواد بکار رفته اثر محدودی بر روی فاکتور بازده جریان دارد و ضریب انتقال حرارت مابین کلاهدک های انتهایی و محیط، تاثیر بسیار زیادی بر روی قدرت جریان ( $m$ ) ایفا می کند که در نتیجه آن بازده جریان کاهش می یابد. بسته به نوع شرایط مرزی، قسمت پایین سانتریفیوژ کوتاه و گرادیان درجه حرارت در امتداد دیواره، باعث توسعه بازده جریان می گردد.



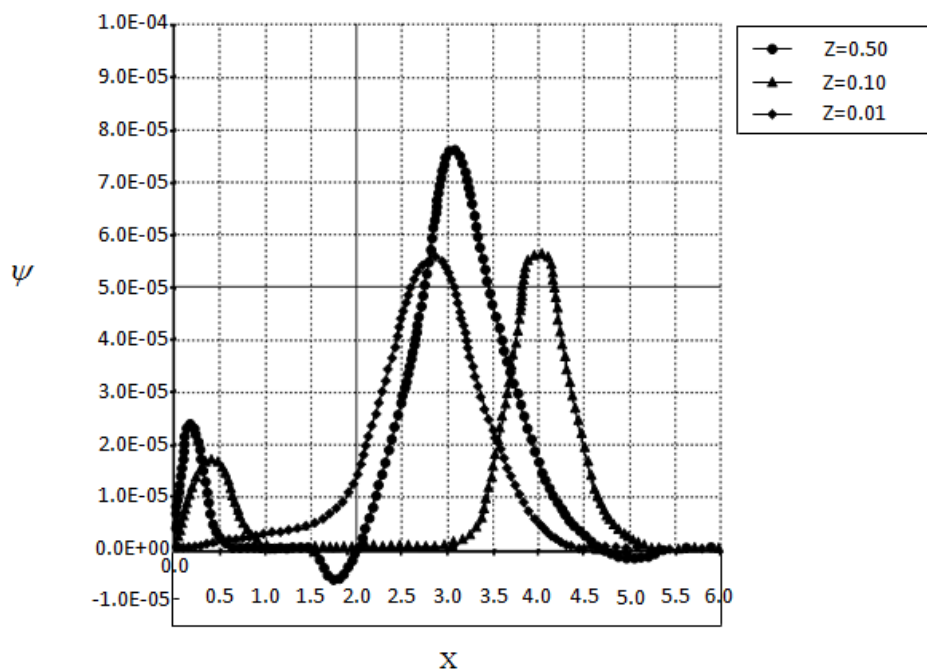
شکل ۲- میزان تغییرات ظرفیت جداسازی ( $\delta U$ ) بر حسب تغییرات  $\theta$  در کل ارتفاع سانتریفیوژ



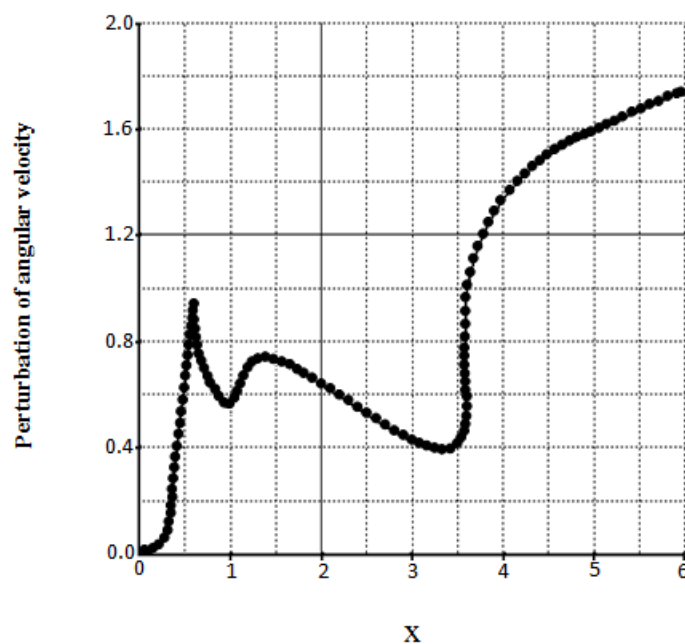
شکل ۱- توزیع محوری نیروی جریان ( $m$ ) در امتداد محور Z برای  $Br = 2.1045$  در یک سانتریفیوژ گازی



شکل ۳- میزان درجه حرارت با استفاده از اعداد مختلف  $Br$ ، برای سانتریفیوژ کوتاه در کلاهک بالا و کلاهک پایین



شکل ۴- توزیع جریان گاز در  $Z$  های مختلف بر حسب نتایج بدست آمده در یک سانتریفیوژ کوتاه



شکل ۵- توزیع سرعت زاویه ای در حالت شعاعی در یک سانتریفیوژ کوتاه براساس شرایط مرزی دیواره و کلاهک های انتهایی

مراجع:

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Thorium and Unconventional UF<sub>6</sub> Resources, (Proc. Technical Meeting, 12-15 September 2005, Vienna), in press.
2. BAILLY, H., MENESSIER, D., PRUNIER, C. (Eds), The Nuclear Fuel of Pressurized Water Reactors and Fast Neutron Reactors, Lavoisier, Paris (1999).
3. MILLER, A.I., "Heavy gas: A Manufacturers' Guide for the Hydrogen Century", Canadian Nuclear Society Bulletin 221 (February 2001).
4. Benedict, M., and A. Boas: Chem. Eng. Progr. 41: 51, 111 (1951).
5. Berman, A.: U.S. AEC Report K-1535, 1963.
6. Bilous, O., and G. Couнас: "Determination of the Separation Factor of the Uranium Isotopes Produced by Gaseous Diffusion," PICG(2) 4: 405 (1958).
7. Matsuda, T. 1975 Isotope Separation by thermally driven countercurrent gas centrifuge. J. Nuclear .sci. Tech. 12, 512-123



8. Brouwers ,J.J.H.1978 on compressible flow in a rotating cylinder. J.Eng.Maths.12,265-63
- 9.Brouwers ,J.J.H.1976 on the motion of a compressible fluid in a rotating cylinder.phd.thesis.Twente univ .of Technology,Enschede,The Netherlands.
10. Soubbaramayer .1979 centrifugation in uranium enrichment .Topics in Appl.Phys .35(ed.S.Villani)..Berlin, Springer Verlag .183
11. Stewartson ,K.1957 on almost rigid rotation.J.Fluid Mech.3,17-216
12. Stewartson ,K.1966 on almost rigid rotation ,part 2.J.fluid Mech.26,133-14
13. Benedict ,Manson and pigford. Thomas and Levi, Hans
14. Dickinson, G.J& Jones ,1981 Numerical solutions for the compressible flow in rapidly rotating cylinder.J.Fluid. Mech.170,189-107
15. J. A. Woollam CO. Inc., Lincoln, NE 68508-2243 USA
16. Manara, D. and B. Renker (2003). "Raman spectra of stoichiometric and hyperstoichiometric uranium dioxide." J. Nucl. Mat. 321(2-3): 233-37.
17. Aronson, S., R. B. Roof, et al. (1957). "Kinetic Study of the Oxidation of Uranium Dioxide." J.Chem. Phys. 27(1): 137-44.