

## مطالعه پارامترهای عملیاتی درون سانتریفیوژ گازی با استفاده از روش عددی در نرم‌افزار OpenFOAM

ولی‌اله غضنفری<sup>۱</sup>، علی‌اکبر صالحی<sup>۲</sup>، علیرضا کشتکار<sup>۱\*</sup>، محمد مهدی شادمان<sup>۱</sup>، محمد حسین عسکری<sup>۳</sup>

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

۲. دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۴۵۶۵-۱۱۱۴، تهران-ایران

۳. شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۵۴۳۱، تهران-ایران

\*Email: akeshtkar@aeoi.org.ir

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۳/۳۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۶/۸

### چکیده

برای افزایش عملکرد یک سانتریفیوژ گازی که در صنعت غنی‌سازی اورانیم استفاده می‌شود، میدان جریان گاز درون آن بررسی و شبیه‌سازی می‌گردد. در این مطالعه، برای شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور از روش دقیق و کامل معادلات ناویراستوکس با استفاده از روش CFD بهره‌گیری شده است. برای استفاده از روش CFD، برای اولین بار یک حلگر ضمنی کوپل‌شده و بر مبنای چگالی در نرم‌افزار اپن‌فوم (OpenFOAM) توسعه داده شد که از آن برای شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور استفاده گردید. در یک روتور نمونه، توان جداسازی با تنظیم پارامترهای دبی خوراک، فشار دیواره، گرادیان دمای دیواره و نیروی درگ اسکوپ بهبود یافت. بررسی نتایج نشان داد کمیت‌های عملیاتی مقدار بهینه‌ای دارند که در آن مقدار بهینه، توان جداسازی بیشینه شده است. برای رسیدن روتور مدل به بیشینه توان جداسازی ۱۲/۸۷ کیلوگرم سو UF<sub>۶</sub> بر سال، شرایط بهینه روتور در دبی خوراک ۹۰ گرم بر ساعت، فشار دیواره ۴۴ تور، گرادیان دمای ۲۵ کلون و نیروی درگ ۱۵۵۷ دین تعیین شد. با انجام این مطالعه گام مهمی در ارتقا عملکرد جداسازی سانتریفیوژ برداشته شده است.

**کلیدواژه‌ها:** سانتریفیوژ گازی، مطالعه پارامتریک، روش عددی، اپن‌فوم

## Parametric studies for a gas centrifuge using numerical method in OpenFOAM

V. Ghazanfari<sup>1</sup>, A.A Salehi<sup>2</sup>, A. Keshtkar<sup>1\*</sup>, M. M. Shadman<sup>1</sup>, M. H. Askari<sup>3</sup>

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

2. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 14565-1114, Tehran-Iran

3. Advanced Technology Company of Iran, AEOI, P.O.Box: 14399-55431, Tehran-Iran

### Research Article

Received 20.6.2020, Accepted 29.8.2020

### Abstract

In order to increase the performance of a gas centrifuge used in the uranium enrichment industry, the gas flow field inside it is studied and simulated. In the present work, the full Navier-Stokes equations using the CFD method are used to simulate the gas flow inside the rotor. For the CFD method, a density-based implicit coupling solver was developed in OpenFOAM software, which was used to simulate the gas flow inside the rotor. The separation power was improved in a sample rotor by adjusting feed flow parameters, wall pressure, wall temperature gradient, and scoop drag force. The results show that the process variable had an optimal value in which the separation power is maximum. In order to achieve the maximum separation power of 12.87 kg UF<sub>6</sub> SWU/year, the optimum rotor conditions were determined at a feed rate of 90 g/h, wall pressure of 44 torr, the temperature gradient of 25 K, and drag force of 1557 dyne. This study can be considered an important step in improving the performance of centrifuge separation.

**Keywords:** Gas centrifuge, Parametric studies, Numerical method, OpenFOAM



## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر غنی‌سازی به روش سانتریفیوژ به یکی از متداول‌ترین روش‌های غنی‌سازی ایزوتوپ‌ها تبدیل شده است. در این راستا مطالعات زیادی برای بهبود عملکرد سانتریفیوژها انجام شده است [۱-۵]. بهبود عملکرد جداسازی سانتریفیوژ از این جهت حایز اهمیت است که منجر به کاهش هزینه‌ها و افزایش مقدار محصول غنی‌شده خواهد شد. بنابراین تعیین شرایط بهینه برای بالا بردن عملکرد جداسازی سانتریفیوژ ضروری است.

در یک ماشین سانتریفیوژ، گاز با ترکیبی از دو یا چند ایزوتوپ وارد روتور می‌شود و تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز شدید ناشی از دوران روتور، لایه‌بندی شعاعی در ماشین ایجاد می‌گردد. به این ترتیب جدایش شعاعی بین ایزوتوپ‌ها رخ می‌دهد [۶]. در جدایش شعاعی، ضریب جداسازی بسیار پایین است؛ به‌منظور افزایش ضریب جداسازی، لازم است حرکت محوری و جدایش محوری ایجاد شود. از طریق عوامل محرکی مانند گرادیان دمای دیواره، حضور اسکوپ و ورود خوراک، جریان محوری ایجاد می‌گردد. با شکل‌گیری جریان محوری، جدایش محوری نیز درون روتور اتفاق می‌افتد و عملکرد جداسازی روتور افزایش می‌یابد [۷]. به‌طور کلی هدف از بررسی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ، رسیدن به جریان محوری مطلوب برای جداسازی ایزوتوپ‌های موردنظر می‌باشد. از این‌رو تلاش می‌گردد عواملی که بر روی جریان محوری تأثیرگذار بوده مورد مطالعه قرار گیرد تا بتوان عملکرد سانتریفیوژ را بهبود داد.

در سال ۲۰۰۰، دوندو و همکاران [۸] پارامترهای مقدار دبی خوراک، نیروی درگ اسکوپ<sup>۱</sup>، گرادیان دمای دیواره و فشار دیواره را به‌صورت جداگانه بر جریان گاز UF<sub>۶</sub> درون روتور سانتریفیوژ بررسی کرده و مقدار توان جداسازی مربوطه را محاسبه کردند. نتایج مطالعه آن‌ها، که برای شبیه‌سازی جریان از روش تحلیلی اونسگر پنکک استفاده کردند، نشان داد که توان جداسازی برای هر کدام از مقادیر گرادیان دمای دیواره، دبی خوراک و نیروی درگ اسکوپ دارای مقدار بهینه‌ای می‌باشد و برای یک نیروی درگ ثابت و معین، با افزایش فشار دیواره، توان جداسازی روند افزایشی خواهد داشت [۸]. در این پژوهش اثر متقابل پارامترها بر یکدیگر بررسی نشده است و برای حل از روش تحلیلی اونسگر پنکک استفاده شده که نسبت به معادلات کامل ناویراستوکس دارای فرضیات و ساده‌سازی‌هایی می‌باشد. در سال ۲۰۰۰، کای و هاسه‌گاوا [۹] به بررسی اثر پارامترهای مقدار دبی خوراک، گرادیان دمای دیواره و فشار دیواره به‌صورت جداگانه بر توان جداسازی درون روتور پرداختند. آن‌ها برای شبیه‌سازی جریان گاز SF<sub>۶</sub> از حل

معادلات ناویراستوکس با روش اختلاف محدود در حالت متقارن محوری استفاده کردند. برای مدل‌سازی اسکوپ از دیسک دوار با نیروی درگ مشخص استفاده شد. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد برای هر یک از پارامترهای دبی خوراک، گرادیان دمای دیواره مقدار بهینه وجود دارد که در آن مقدار توان جداسازی بیشینه خواهد شد. علاوه بر این نشان داده شد که تغییرات فشار دیواره با فشار در محفظه محصول و پسماند متناسب بوده و در یک نیروی درگ ثابت و معین، با افزایش فشار دیواره، توان جداسازی کاهش خواهد یافت [۹]. باید توجه داشت که شرایط مربوط به مطالعه کای با شرایط مطالعاتی دوندو از نظر نیروی درگ و نوع گاز متفاوت است. در سال ۲۰۰۱، بورسویچ و لوین [۱۰] با حل معادلات ناویراستوکس به روش اختلاف محدود، تأثیر تغییر پارامترهای مختلف درون ماشین سانتریفیوژ Iguacu بر گازهای SF<sub>۶</sub> و TeF<sub>۶</sub> را مورد بررسی قرار دادند. مشخص گردید جنس گاز و دبی خوراک بر عملکرد جداسازی روتور دارای اثر متقابل می‌باشند به‌طوری که در شرایط یکسان، با افزایش دبی خوراک توان جداسازی کاهش یافته و برای گاز دیگر توان جداسازی افزایش خواهد یافت. همچنین نیروی درگ مقدار بهینه‌ای خواهد داشت که در آن توان جداسازی بیشینه خواهد شد. علاوه بر این، نتایج آن‌ها نشان داد که در یک نیروی درگ ثابت، با افزایش مقدار موجودی (یا فشار دیواره) گاز TeF<sub>۶</sub>، توان جداسازی روند صعودی داشته و در یک نیروی درگ ثابت دیگر، با افزایش موجودی گاز، توان جداسازی کاهش خواهد یافت [۱۰]. در سال ۲۰۱۳، میگلرونی [۱۱] با استفاده از حل معادله‌ی پنکک برای ماشین‌های سانتریفیوژ Iguacu و Rome، نحوه‌ی تأثیر دبی خوراک گاز UF<sub>۶</sub> را بر توان جداسازی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که مقدار بهینه‌ای برای دبی خوراک برای دستیابی به توان جداسازی بیشینه وجود دارد و تأثیرگذاری تغییر دبی خوراک در دو ماشین متفاوت است [۱۱].

مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که برای بهبود عملکرد جداسازی روتور، نیاز به تنظیم مقادیر بهینه عملیاتی برای آن وجود دارد به‌طوری که با اعمال شرایط بهینه، توان جداسازی روتور بیشینه خواهد شد. همچنین مشخص گردید پارامترها بر روی یکدیگر اثر متقابل داشته و لازم است تغییرات این پارامترها به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شود. از مهم‌ترین پارامترها که بر روی یکدیگر اثر متقابل خواهند داشت می‌توان به تغییر دبی خوراک و مقدار فشار دیواره بر عملکرد جداسازی روتور اشاره کرد که تأثیر این دو پارامتر باید به‌صورت هم‌زمان بررسی گردد.

در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی جریان گاز UF<sub>۶</sub> درون روتور یک سانتریفیوژ مدل، در حالت متقارن محوری انجام شده است. برای شبیه‌سازی جریان از حل عددی و دقیق معادلات

## 1. Drag Force



## ۲.۲ معادله غلظت

به منظور به دست آوردن توزیع غلظت ایزوتوپها در روتور سانتریفیوژ از معادله بقای جرم جزیبی، که به صورت زیر است، استفاده می‌شود:

$$\nabla \cdot \vec{J}_A + \nabla \cdot (C_A \vec{V}) = 0 \quad (5)$$

که در آن غلظت مولی جزء  $A$  در مخلوط، به صورت زیر با کسر مولی جزء  $A$  و غلظت کل مرتبط می‌شود:

$$C_A = xC \quad (6)$$

که  $x$  کسر مولی جزء  $A$  و  $C$  غلظت کل مخلوط می‌باشد.

شار<sup>۳</sup> نفوذی  $J_A$  درون روتور سانتریفیوژ از مجموع شار نفوذ فشاری و شار نفوذ غلظتی به دست می‌آید. نفوذ فشاری به علت گرادیان فشاری ایجاد شده و به صورت زیر ارایه می‌گردد:

$$\vec{J}_A(P) = -\frac{D_{AB}}{RT} + (x(1-x)) \frac{\Delta M}{M_A} \nabla P \quad (7)$$

نفوذ غلظتی به دلیل وجود گرادیان غلظت ایزوتوپی ایجاد شده که از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$\vec{J}_A(C) = -CD_{AB} \nabla x \quad (8)$$

در رابطه فوق  $D_{AB}$  ضریب نفوذ جزء  $A$  در جزء  $B$ ،  $\Delta M$  اختلاف بین جرم مولکولی جزء سبک ( $M_A$ ) و جرم مولکولی جزء سنگین ( $M_B$ )،  $R$  ثابت جهانی گازها و  $T$  دمای متوسط گاز است. معادله غلظت با استفاده از روش عددی حجم محدود و به صورت ضمنی با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم حل می‌گردد.

## ۳.۲ توان جداسازی

مهم‌ترین معیاری که به کمک آن می‌توان توانایی جداسازی یک واحد جداساز را مورد بررسی قرار داد، توان جداسازی است [۱۲]. توان جداسازی توصیف‌کننده افزایش ارزش محصول خروجی از ماشین نسبت به ارزش خوراک ورودی به آن می‌باشد. توان جداسازی تعداد سانتریفیوژهای مورد نیاز در یک آبشار را مشخص می‌کند. بهینه کردن توان جداسازی سانتریفیوژهای به کار گرفته شده در یک آبشار به معنی کاهش تعداد آن‌ها و در نتیجه کاهش هزینه است. هر سانتریفیوژ با توجه به پارامترهای طراحی و عملکردی آن دارای یک توان جداسازی بیشینه است. با مشخص بودن شدت جریان‌های خوراک، محصول و پسماند یک واحد جداساز و ترکیب درصد آن‌ها، توان جداسازی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

ناویراستوکس با استفاده از روش حجم محدود کمک گرفته شده است. این مطالعه از این‌رو اهمیت دارد که تا به حال مطالعه پارامترهای عملیاتی با روش‌های عددی انجام نشده است. برای بررسی دینامیک گاز درون روتور، یک حلگر بر مبنای چگالی، ضمنی و کوپل به نام ICDB<sup>۱</sup> توسط نویسندگان در نرم‌افزار این‌فوم<sup>۲</sup> توسعه داده شده است. هدف از انجام این مطالعه، رسیدن به توان جداسازی بیشینه در یک روتور معین، با تغییر پارامترهای دبی خوراک، فشار دیواره، نیروی درگ اسکوپ پسماند و گرادیان دمای دیواره می‌باشد.

## ۲. معادلات حاکم

## ۱.۲ معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر گاز به صورت پایا و در حالت متقارن محوری به شکل زیر بیان شده است. فرضیات لحاظ شده در مطالعه حاضر عبارتند از در نظر گرفتن سیال گازی به عنوان گاز کامل، ناچیز در نظر گرفتن شتاب گزانش در برابر شتاب گریز از مرکز ماشین و حالت پایا برای جریان.

معادلات حاکم بر جریان در فرم کلی به صورت زیر است [۹]:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

معادله تکانه:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} e) = -\nabla \cdot (k \nabla T) - \nabla \cdot (p \vec{V}) + \nabla \cdot (\tau \vec{V}) \quad (3)$$

معادله حالت گاز ایده‌آل:

$$p = (\gamma - 1) \rho I, \gamma = \frac{c_p}{c_v}, I = c_v T \quad (4)$$

در این معادلات  $\Delta \rho$  چگالی جرمی،  $v$  سرعت سیال،  $p$  فشار و  $\tau$  تانسور تنش ویسکوز است. هم‌چنین  $e$  و  $T$  به ترتیب انرژی داخلی و دما می‌باشند.  $k$  ضریب انتقال حرارت هدایتی و  $\gamma = C_p/C_v$  نسبت ظرفیت حرارتی ویژه در فشار و حجم ثابت است که در مطالعه حاضر به صورت ثابت در نظر گرفته شده است.

1. Implicit Coupled Density Based
2. OpenFOAM

3. Flux

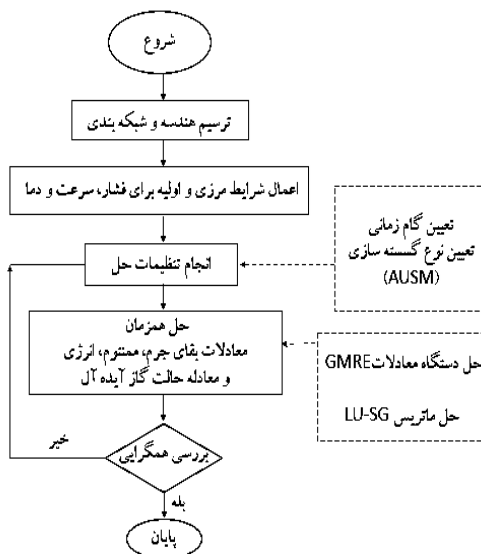


خطاهای عددی کم و بازدهی محاسباتی بالایی دارد [۱۸]. در روش‌های AUSM، براساس عدد ماخ توابع چند جمله‌ای شکسته می‌شود به طوری که از میان‌یابی به روش مرکزی و بالادست برای جریان‌های فروصوت و فراصوت استفاده می‌شود. مهم‌ترین مزیت روش AUSM<sup>+</sup>Up اعتبار و قابلیت‌های بالای آن برای جریان‌های از سرعت پایین تا سرعت بالا می‌باشد. با توجه به این که سرعت زاویه‌ای گاز درون روتور از محور تا دیواره روند افزایشی دارد، بنابراین استفاده از روش AUSM<sup>+</sup>UP در حلگر ICDB مناسب می‌باشد. الگوریتم حل در نرم‌افزار این فوم در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### ۴. مدل‌سازی روتور

در این قسمت شبیه‌سازی جریان گاز UF<sub>6</sub> درون روتور سانتریفیوژ در حالت با ورود و خروج جریان و با در نظر گرفتن تمامی عوامل محرک به صورت همزمان انجام شده است. هندسه مسئله دارای شعاع ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰۰ میلی‌متر است.

در شکل ۲ هندسه روتور، نوع مرزهای آن از قبیل محل ورود خوراک، اسکوپ محصول، اسکوپ پسماند، بفل و همچنین شبکه روتور نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی روتور حاضر، از شبکه ساختاریافته استفاده شده به طوری که در محل‌هایی که گرادیان خصوصیات جریان شدیدتر است، از شبکه ریزتر استفاده شده است. از این رو شبکه در اطراف اسکوپ پسماند، خوراک و اسکوپ محصول به صورت بزرگ‌تر نمایش داده شده تا کیفیت شبکه مشخص باشد. تعداد سلول‌های استفاده شده برای شبکه در جهت شعاع برابر با ۷۰۰ و در جهت محوری برابر با ۵۰۰ می‌باشد به طوری که عرض کوچک‌ترین سلول در نزدیک دیواره روتور برابر با ۱ میکرومتر می‌باشد.



شکل ۱. شبکه‌بندی ساختاریافته روی دامنه سیال در صفحه تخت.

$$\delta U = M (2y - 1) \ln \frac{y}{1-y} + N (2x - 1) \ln \frac{x}{1-x} - Z (2z - 1) \ln \frac{z}{1-z} \quad (9)$$

#### ۳. حل معادلات

در این قسمت توضیحاتی در مورد حلگر ICDB، که توسط نویسندگان حاضر توسعه داده شده، ارائه شده است. ICDB یک حلگر بر مبنای چگالی است که با روش AUSM<sup>+</sup>UP به گسسته‌سازی شار عبوری از مرزها می‌پردازد. حل معادلات در این حلگر براساس روش تکرار، حل به صورت همزمان و ضمنی انجام می‌گیرد. روش تکراری که در آن معادلات به صورت یک دستگاه معادلات و همزمان حل می‌شوند GMRES<sup>۲</sup> نام دارد که توسط شایبی ارائه شده [۱۴] و در این حلگر از آن استفاده می‌شود. علاوه بر این، شن‌چون حل معادلات براساس روش LU-SG<sup>۳</sup> را در نرم‌افزار این فوم پیاده‌سازی کرده است [۱۵] که در این حلگر از این قابلیت استفاده شده است. ماتریس LU-SG به دلیل سهولت پیاده‌سازی در کدهای محاسباتی و حجم کم محاسبات، به طور گسترده در روش‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور مثال برای یک دستگاه معادله  $Ax=b$  روش LU-SGS به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$A=L+D+U \simeq (L+D)D^{-1} (D+U) \quad (10)$$

که در آن  $A$  ماتریس ضرایب،  $L$  ماتریس پایین مثلثی،  $D$  ماتریس قطری و  $U$  ماتریس بالا مثلثی دستگاه معادله  $Ax=b$  هستند. سپس با جایگذاری در رابطه  $Ax=b$  خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} D \Delta x^* &= b - Ax^n - L \Delta x^* \\ D \Delta x &= D \Delta x^* - U \Delta x \\ x^{n+1} &= x^n + \Delta x^* \end{aligned} \quad (11)$$

که  $\Delta x$  یک مقدار تصحیح‌کننده است و به صورت تکراری قابل محاسبه می‌باشد. نحوه پیاده‌سازی این روش برای شبکه‌های ساختاریافته و بی‌ساختار متفاوت می‌باشد که در کتاب اصول کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی [۱۷] به تفصیل بیان شده است.

در پژوهش حاضر، مطالعه انجام شده توسط شن‌چون ادامه داده شده و قابلیت حلگر ایشان با به کارگیری و اضافه کردن روش AUSM<sup>+</sup>UP بهبود پیدا کرده است. روش‌های AUSM مزیت‌هایی از قبیل دقت بالا در برخورد با ناپیوستگی‌ها،

1. Advection Upstream Splitting Method
2. Generalized Minimal Residual
3. Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel



با تغییر فشار دیواره، مقدار موجودی گاز درون روتور تغییر می‌کند که با محاسبه مجموع جرم گاز موجود در هر سلول از دامنه حل، مقدار موجودی کل گاز درون روتور به دست می‌آید. باید توجه داشت افزایش موجودی گاز با توجه به محدودیت‌های متالورژیکی و مکانیکی روتور دارای محدودیت می‌باشد.

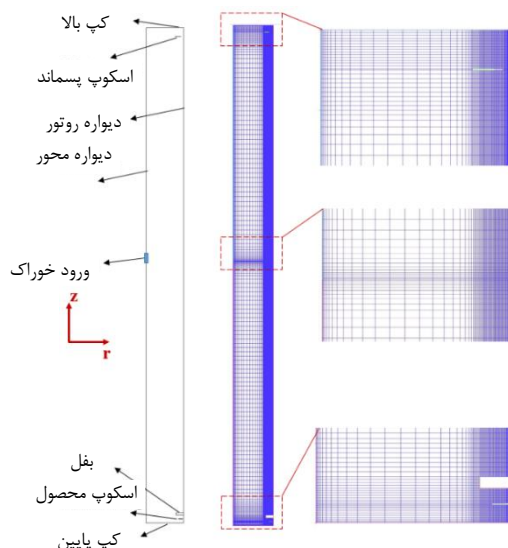
در نمودار شکل ۳ تأثیر هم‌زمان تغییرات فشار دیواره و مقدار دبی خوراک بر توان جداسازی روتور نشان داده شده است. نتایج این قسمت در شرایط ثابت و برابر ۰/۴۵۵، گرادیان دمای دیواره ثابت و برابر با ۲۰ کلوین و نیروی درگ اسکوپ پسماند ثابت و برابر با ۱۷۵۰ دین به دست آمده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، در تمامی نمودارها در یک دبی خوراک یکسان، توان جداسازی با افزایش فشار دیواره افزایش یافته، به نقطه بیشینه رسیده و سپس کاهش می‌یابد. روند افزایش و کاهش در سه مقدار دبی خوراک مشابه یکدیگر است. با توجه به نمودار به دست آمده مشخص گردید که در دبی خوراک ۹۰ گرم بر ساعت، مقدار توان جداسازی در فشار ۴۴ تور به ۱۲/۷۳ کیلوگرم سو UF<sub>۶</sub> بر سال می‌رسد که بالاترین مقدار توان جداسازی این روتور در این شرایط می‌باشد.

جدول ۱. پارامترهای گاز هگزافلوراید اورانیم.

پارامتر	مقدار
جرم مولکولی گاز (M)	۳۵۲ (g/mol)
ضریب گرمای ویژه (Cp)	۳۷۸ (j/kg.K)
نسبت گرمای ویژه ( $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ )	۱.۰۶
ضریب هدایت گرمایی (k)	۰.۰۰۷۱ (W/m.K)
ویسکوزیته ( $\mu$ )	۰.۰۰۰۰۱۸ (pa.sec)

جدول ۲. پارامترهای عملیاتی خوراک و فشار دیواره.

مورد	دبی خوراک (گرم بر ساعت)	موجودی گاز (گرم)	فشار دیواره (تور)
۱		۰.۵۵	۱۸
۲		۰.۸۹	۲۸
۳		۱.۳۱	۴۴
۴	۶۵	۱.۸۸	۶۲
۵		۳.۱۶	۱۰۵
۶		۰.۵۵	۱۸
۷		۰.۸۹	۲۸
۸		۱.۳۱	۴۴
۹	۹۰	۱.۸۸	۶۲
۱۰		۳.۱۶	۱۰۵
۱۱		۰.۵۵	۱۸
۱۲		۰.۸۹	۲۸
۱۳	۱۵۰	۱.۳۱	۴۴
۱۴		۱.۸۸	۶۲
۱۵		۳.۱۶	۱۰۵



شکل ۲. هندسه و شبکه روتور

#### ۴.۱ شرایط مرزی

در مسئله حاضر شرایط مرزی برای متغیرهای سرعت، فشار و دما تعیین می‌گردد. شرط مرزی flowRateOutletVelocity برای خروج گاز از دو اسکوپ محصول و پسماند در نظر گرفته شده است و با استفاده از ضریب برش مقادیر برای خروج گاز از اسکوپ محصول و پسماند تنظیم می‌گردد.

به منظور اعمال دبی ورودی ثابت در روتور از طریق مرز ورودی خوراک، از شرط مرزی فشار ثابت، دما ثابت و سرعت ثابت استفاده شده است. از آنجا که ورود خوراک از دهانه لوله خوراک به داخل ماشین دچار پدیده خفگی می‌شود، برای اعمال مقدار دبی ورودی می‌توان با استفاده از سرعت برابر با ۸۶.۶۵ متر بر ثانیه (عدد ماخ برابر با ۱) در جهت x، دمای ۳۰۰ کلوین و فشار ۱۲ پاسکال استفاده کرد. سرعت زاویه‌ای دیواره و بفل ۵۶۵۰ رادیان بر ثانیه، محرک دمایی خطی روی دیواره و محرک مکانیکی اسکوپ پسماند به صورت اختلاف سرعت زاویه‌ای اسکوپ با گاز مجاور اعمال شده است. دمای محور و بفل به صورت ثابت و برابر با ۳۰۰ و ۳۱۰ کلوین در نظر گرفته شده است. هم‌چنین سرعت محور برابر صفر اعمال شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی سانتریفیوژ مدل در جدول ۱ برای گاز هگزافلوراید اورانیم ارائه شده است.

#### ۵. نتایج

برای بررسی عملکرد جداسازی روتور، با تغییر پارامترهای عملیاتی، مقادیر توان جداسازی ارزیابی می‌گردد. در اینجا تغییرات مقدار دبی خوراک و هلداب به صورت هم‌زمان مورد مطالعه قرار گرفته است. با اعمال هلداب‌های مختلف، شبیه‌سازی انجام شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد، ۱۵ مورد شبیه‌سازی عددی در شرایط با فشار دیواره و مقدار دبی خوراک متفاوت در نظر گرفته شده است تا بتوان تأثیرات این دو پارامتر را به صورت هم‌زمان لحاظ کرد. هم‌چنین





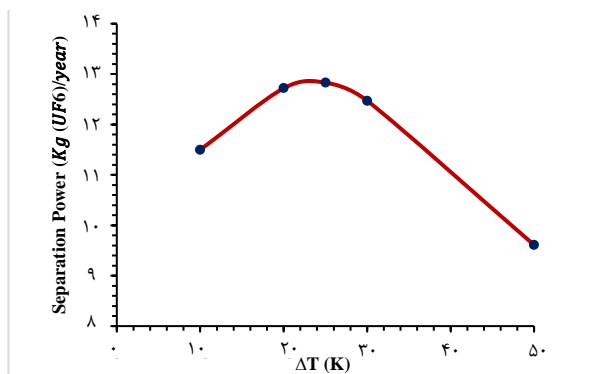
تعیین می‌گردد؛ به طوری که در این بازه توان جداسازی بیش‌ترین مقدار را دارد و با افزایش یا کاهش مقادیر فشار دیواره، تغییر شدیدی در مقدار توان جداسازی ایجاد نخواهد شد.

با توجه به نمودار ترسیم شده در شکل ۳، مشخص گردید مقادیر بهینه دبی خوراک و فشار به ترتیب برابر ۹۰ گرم بر ساعت و ۴۴ تور می‌باشد؛ بنابراین لازم است اثر سایر پارامترها از قبیل نیروی درگ اسکوپ و گرادیان دمای دیواره در این شرایط مورد بررسی قرار گیرد که در این‌جا به آن پرداخته شده است.

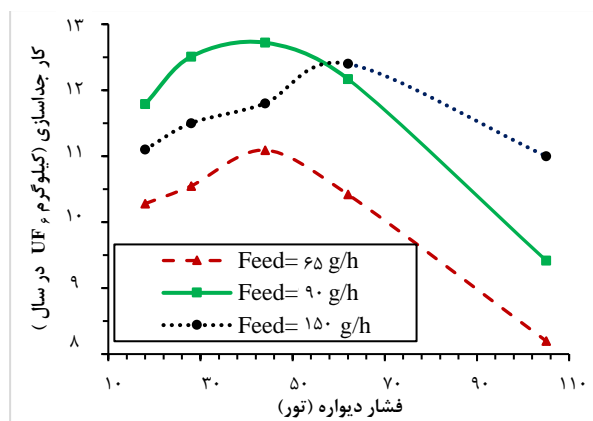
در شکل ۴ تغییرات توان جداسازی براساس تغییر گرادیان دمای دیواره نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شکل ۳، در این‌جا در دبی خوراک ۹۰ گرم بر ساعت، فشار دیواره ۴۴ تور، کات ۰/۴۵۵ و نیروی درگ ثابت و برابر ۱۷۵۰ دین، تغییرات گرادیان دمای دیواره در ۵ حالت ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۵۰ در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار گرادیان دمای دیواره، توان جداسازی افزایش یافته و به یک مقدار بیشینه می‌رسد و با افزایش مقدار گرادیان دمای دیواره، کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار به دست آمده، مشخص است که در گرادیان دمای دیواره ۲۵ کلوین، توان جداسازی بیشینه شده و به مقدار ۱۲/۸۲ کیلوگرم سو UF<sub>۶</sub> بر سال رسیده است. در شرایط عملیاتی باید بازه‌ای برای گرادیان دمای دیواره روتور انتخاب گردد تا با تغییر اندک در دمای دیواره، مقادیر توان جداسازی دچار تغییرات شدید نگردد. باید توجه داشت افزایش دمای دیواره روتور با توجه به محدودیت‌های متالورژیکی و مکانیکی روتور دارای محدودیت می‌باشد. با توجه به شکل ۴، بازه دمایی ۲۰ تا ۳۰ کلوین به عنوان محدوده دمایی بهینه برای گرادیان دمای دیواره پیشنهاد می‌گردد.

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، در دبی خوراک ۹۰ گرم بر ساعت، فشار دیواره ۴۴ تور، گرادیان دمای دیواره ۲۵ کلوین و نیروی درگ ۱۷۵۰ دین، مقدار توان جداسازی به ۱۲/۸۲ کیلوگرم سو UF<sub>۶</sub> بر سال می‌رسد.



شکل ۴. تغییرات توان جداسازی با در نظر گرفتن تغییرات گرادیان دمای دیواره (دبی خوراک ۹۰ گرم بر ساعت، فشار دیواره ۴۴ تور، کات ۰/۴۵۵ و نیروی درگ ۱۷۵۰ دین).



شکل ۳. تغییرات توان جداسازی با در نظر گرفتن اثر دبی خوراک و فشار دیواره به صورت هم‌زمان.

برای تحلیل بیش‌تر روتور، چنان‌که در یک فشار دیواره ثابت مقادیر دبی خوراک تغییر کند، روند تغییرات توان جداسازی به راحتی قابل پیش‌بینی نخواهد بود و لازم است اثرات محرک مکانیکی اسکوپ هم لحاظ شود که در قسمت بعد در این مطالعه به آن پرداخته شده است. در حال حاضر در یک فشار دیواره ثابت، با افزایش دبی خوراک، روند تغییرات توان جداسازی سه حالت مختلف خواهد داشت (شکل ۳):

- حالت اول: در فشار دیواره‌های زیر ۴۵ تور، با افزایش دبی خوراک ابتدا توان جداسازی افزایش یافته و با بیش‌تر کردن مقدار دبی خوراک، توان جداسازی کاهش می‌یابد.
  - حالت دوم: در فشار دیواره‌های بین ۴۵ تا ۶۳ تور، با افزایش دبی خوراک، ممکن است ابتدا توان جداسازی افزایش یافته و سپس کاهش یابد (دبی خوراک ۱۵۰ گرم بر ساعت)؛ یا ممکن است با افزایش دبی خوراک توان جداسازی کاهش یابد (۶۰ و ۹۰ گرم بر ساعت).
  - حالت سوم: در فشارهای بالاتر از ۶۳ تور، با افزایش دبی خوراک، توان جداسازی تنها روند صعودی خواهد داشت.
- با بررسی بیش‌تر روند تغییرات نمودار مشخص گردید در دبی‌های خوراک بیش‌تر از ۹۰ گرم بر ساعت و فشار دیواره‌های بالاتر از ۴۵ تور، دبی خوراک و فشار دیواره دارای اثر متقابل می‌باشند؛ بدین معنا که با افزایش فشار دیواره در یک دبی ثابت الزاماً توان جداسازی افزایش یا کاهش نخواهد یافت.

لازم به ذکر است حالات مذکور در شرایطی که گرادیان دما، کات و محرک نیروی درگ اسکوپ ثابت فرض گردد قابل تحلیل خواهد بود. بنابراین در شرایط عملیاتی و واقعی ماشین سانتریفیوژ همه پارامترها هم‌زمان با هم مؤثر بوده که در مطالعات آتی به آن پرداخته خواهد شد.

محدوده عملیاتی روتور باید در بازه‌ای تعیین گردد تا با تغییرات اندک در مقادیر ورودی و خصوصیات جریان، توان جداسازی دچار تغییرات شدید نگردد. با توجه به موارد ذکر شده در مطالعه حاضر، محدوده کاری روتور سانتریفیوژ در دبی خوراک ۹۰ گرم بر ساعت، و فشار دیواره در بازه ۳۰ تا ۵۰ تور

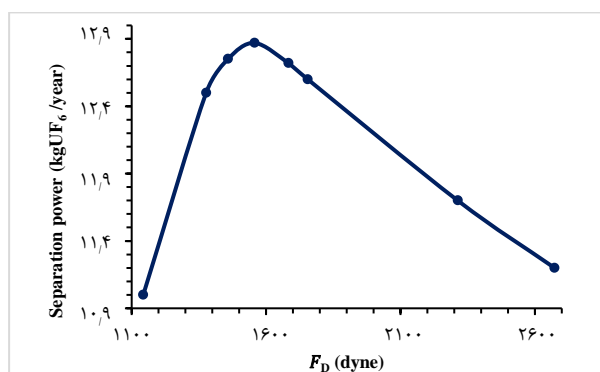


### ۶. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، هدف اصلی حل عددی جریان گاز  $UF_6$  با استفاده از حلگر توسعه یافته در نرم‌افزار این‌فوم و تعیین مقادیر بهینه برای شرایط عملیاتی درون روتور سانتریفیوژ است. برای این کار حل کامل معادلات ناویراستوکس برای جریان سیال و حل معادله غلظت برای به‌دست آمدن توزیع غلظت درون روتور انجام گردید. برای رسیدن به شرایط بهینه، تغییرات دبی خوراک و فشار به‌صورت هم‌زمان و سایر پارامترها از قبیل گرادیان دمای دیواره و نیروی درگ اسکوپ به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد در مقدار دبی خوراک ۹۰ گرم بر ساعت و فشار دیواره ۴۴ تور، توان جداسازی به مقدار بیشینه ۱۲/۷۳ کیلوگرم سو  $UF_6$  بر سال رسیده است. سپس با ثابت نگه داشتن مقادیر بهینه فشار و دبی خوراک به‌دست آمده، گرادیان دمای دیواره تغییر داده شد؛ به‌طوری که مقدار بهینه گرادیان دمای دیواره ۲۵ کلوین به‌دست آمد و توان جداسازی بیشینه به مقدار ۱۲/۸۲ کیلوگرم سو  $UF_6$  بر سال رسید. سپس با توجه به شرایط بهینه به‌دست آمده از مراحل قبل، نیروی درگ اسکوپ پسماند تغییر داده شد و در مقدار بهینه ۱۵۵۷ دین (معادل با ۱۸/۵ درصد اختلاف بین سرعت زاویه‌ای اسکوپ نسبت به سرعت زاویه‌ای دیواره) توان جداسازی به ۱۲/۸۷ کیلوگرم سو  $UF_6$  بر سال رسید. بنابراین شرایط بهینه روتور در دبی خوراک ۹۰ گرم بر ساعت، فشار دیواره ۴۴ تور، گرادیان دمای ۲۵ کلوین و نیروی درگ ۱۵۵۷ دین انتخاب می‌گردد تا روتور مدل به بیشینه توان جداسازی ۱۲/۸۷ کیلوگرم سو  $UF_6$  بر سال برسد. با انجام این مطالعه، اثر متقابل پارامترها بر یکدیگر مشخص گردید؛ به‌طوری که با تعیین شرایط عملیاتی بهینه می‌توان عملکرد جداسازی روتور در شرایط واقعی را بهبود بخشید. علاوه بر این پیشنهاد می‌گردد برای بهبود و دقیق‌تر کردن اجراهای انجام شده، اثر ضریب برش در نظر گرفته شود که با اعمال آن فاکتورهای غنی‌سازی و تهی‌سازی برابر شده و به شرایط ایده‌آل نزدیک خواهیم شد؛ در این شرایط توان جداسازی نیز بهبود خواهد یافت.

درصد اختلاف سرعت زاویه‌ای اسکوپ نسبت به سرعت دیواره و به تبع آن نیروی درگ به‌دست آمده از حل جریان در جدول ۳ ارایه شده است.

در شکل ۵ تغییرات توان جداسازی نسبت به تغییرات نیروی درگ اسکوپ پسماند یا درصد تغییرات سرعت زاویه‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در شرایطی که سایر پارامترهای عملیاتی ثابت است، با افزایش مقدار نیروی درگ اسکوپ، توان جداسازی افزایش یافته است. با توجه به این‌که نیروی درگ اسکوپ به‌عنوان یک محرک مکانیکی برای ایجاد جریان محوری عمل می‌کند، بنابراین در این شرایط با افزایش نیروی درگ، جریان محوری بهبود یافته و توان جداسازی افزایش یافته است. در نیروهای درگ ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ دین، توان جداسازی به مقادیر بیشینه خود رسیده است و سپس با افزایش مقدار نیروی درگ، کاهش می‌یابد. در نیروی درگ ۱۵۵۷ دین، توان جداسازی به بیشینه مقدار خود یعنی ۱۲/۸۷ کیلوگرم سو  $UF_6$  بر سال رسیده است.



شکل ۵. تغییرات توان جداسازی با در نظر گرفتن تغییرات نیروی درگ (دبی خوراک ۹۰ گرم بر ساعت، فشار دیواره ۴۴ تور، کات ۰/۴۵۵ و گرادیان دمای ۲۵ کلوین).

جدول ۳. پارامترهای عملیاتی برای سرعت زاویه‌ای اسکوپ پسماند.

مورد	$\frac{\Delta\omega}{\omega_{wall}}$ (%)	$F_D$ (دین)
۱	۳۲	۲۶۷۳
۲	۲۹	۲۳۱۳
۳	۲۲	۱۷۵۵
۴	۲۰	۱۶۸۳
۵	۱۸.۵	۱۵۵۷
۶	۱۶.۸	۱۴۵۸
۷	۱۵	۱۳۷۷
۸	۱۱.۵	۱۱۴۳



## مراجع

1. T. Kai, "Theoretical analysis of ternary UF6 gas isotope separation by centrifuge," *Journal of Nuclear Science and Technology*. 20, 491 (1993).
2. P. Omnes, "Numerical and physical comparisons of two models of a gas centrifuge," *Computers & Fluids*. 36, 1028 (2007).
3. H. Wood, "Analysis of feed effects on a single-stage gas centrifuge cascade," *Separation Science and Technology*. 30, 2631 (1995).
4. V. Borisevich, M. Borshchevskiy and S. J. D. Zeng, "On ideal and optimum cascades of gas centrifuges with variable overall separation factors," *Chemical Engineering Science*. 116, 465 (2014).
5. S. Bogovalov, V. Kislov and I. Tronin, "Impact of the pulsed braking force on the axial circulation in a gas centrifuge," *Applied Mathematics and Computation*. 272, 670 (2016).
6. Soubbaramayer, *Centrifugation*, (Springer, Berlin, Heidelberg, 1979).
7. I. Harada, "Computation of strongly compressible rotating flows," *Journal of Computational and Computational Physics*. 38, 335 (1980).
8. F. Doneddu, P. Roblin and H. G. Wood, "Optimization studies for gas centrifuges," *Separation Science and Technology*. 35, 1207 (2000).
9. T. Kai and K. Hasegawa, "Numerical calculation of flow and isotope separation for SF6 gas centrifuge," *Nuclear Science and Technology*. 30, 100 (2000).
10. V. D. Borisevich and E. V. Levin, "Separation of multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge," *Separation Science and Technology*. 36, 1697 (2001).
11. P. J. Migliorini, PhD thesis, *IAEA safeguards*, 1-158, (2013).
12. M. Benedict, "Nuclear chemical engineering," *McGraw-Hill Book Company*, vol. chapter 14, 1981.
13. K. Cohen, *The theory of isotope separation*, *McGraw Book Company*. (1951).
14. S. Ye, W. Yang and X. Xu, "The Implementation of an implicit coupled density based solver based on OpenFOAM," in *Computing Machinery*, Wuhan, China. (2017).
15. S. Chun, and et al., "Implementation of density based implicit LU-SGS solver in the framework of OpenFOAM," *Advances in Engineering Software*. 91, 80 (2016).
16. F. Moukalled, L. Mangani and M. Darwish, *The finite volume method in computational fluid dynamics An advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab®*, (Springer International Publishing Switzerland, 2016).
17. J. Blazek, *Computational fluid dynamic principle and Application*, *Elsevier*. (2001).
18. K. Kitamura and A. Hashimoto, "Reduced dissipation AUSM-family fluxes: HR-SLAU2 and HR-AUSM+ for high resolution unsteady flow simulations," *Computers & Fluids*. 126, 41 (2016).

## COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers. \*



## استناد به این مقاله

ولی‌اله غضنفری، علی‌اکبر صالحی، علیرضا کشتکار، محمد مهدی شادمان، محمد حسین عسکری (۱۴۰۰)، مطالعه پارامترهای عملیاتی درون سانتریفیوژ گازی با استفاده از روش عددی در نرم‌افزار OpenFOAM. ۹۸، ۱۹-۲۶

DOI: [10.24200/nst.2021.1307](https://doi.org/10.24200/nst.2021.1307)

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1307.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1307.html)

