



بررسی قابلیت نرم افزار این فوم برای شبیه‌سازی اثر اتلاف ویسکوز بر مشخصات جریان گاز درون یک سانتریفیوژ گازی

غضنفری، ولی‌اله*^(۱) - صالحی، علی اکبر^(۲) - کشتکار، علیرضا^(۱) - صفدری، سید جابر^(۱) - شادمان، محمد مهدی^(۳) - عسکری، محمد حسین^(۳) - امینی، الهام^(۳)

(۱) سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت

(۲) دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی

(۳) شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران

چکیده:

این فوم یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی است که قابلیت شبیه‌سازی مسائل مختلف را دارد. کدهای این نرم‌افزار به صورت متن باز و رایگان می‌باشد. مسئله حاضر یک سانتریفیوژ گازی است که در صنعت غنی‌سازی اورانیوم استفاده می‌گردد و بررسی عملکرد آن از اهمیت خاصی برخوردار است. در مطالعه حاضر، با اعمال محرک مکانیکی چرخش جریان رخ خواهد داد. با اعمال محرک مکانیکی دمای گاز افزایش یافته که علت آن تنش ویسکوز و اتلاف ویسکوز بین لایه‌های سیال می‌باشد. از اینرو نیاز است قابلیت نرم‌افزار برای محاسبه دما و جریان محوری مورد ارزیابی قرار گیرد. با مقایسه نتایج حاصل از مطالعه عددی انجام شده توسط هارادا مشخص گردید حلگر استفاده شده در این فوم از دقت و صحت خوبی برخوردار می‌باشد.

کلید واژه‌ها: سانتریفیوژ گازی، محرک مکانیکی، جریان چرخشی، شبیه‌سازی عددی

Investigating the ability of openFoam to simulate the effect of viscous dissipation on gas flow in a gas centrifuge

Ghazanfari, Valiyollah¹; Salehi, Aliakbar²; Keshtkar, Alireza¹; Safdari, Seyed jabber¹; Askari, Mohammad hosein³; Shadman, Mohammad mehdi³; Amini, Elham³

1. Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute

2. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology

3. Advanced Technology Company of Iran, AEO

Abstract:

OpenFoam is a computational fluid dynamics toolbox that can simulate different problems. The codes are free and open source. The present study is a gas centrifuge used in the uranium enrichment industry, and its performance has particular importance. In this present study, the circulation flow is caused in the mechanically driven flow. Mechanical driven causes the gas temperature to be increased, which the main reason is viscous stress and viscosity dissipation between fluid layers. Therefore, the software needs to be evaluated to how



calculate the temperature and circulation flow. By comparing the results with the results of the Harada's study, it was determined that the solver used in openFoam has a good accuracy.

Key words: Gas centrifuge, Thermal drive, Circulation flow, Numerical simulation

مقدمه:

در یک ماشین سانتریفیوژ، گاز با ترکیبی از دو یا چند ایزوتوپ وارد روتور می‌شود، تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز شدید جزء سنگین‌تر نزدیک دیواره و جزء سبک‌تر در فاصله‌ای دورتر از دیواره و نزدیک‌تر به محور قرار می‌گیرد. به این ترتیب جدایش شعاعی بین ایزوتوپ‌ها رخ می‌دهد [1]. به منظور افزایش ضریب جداسازی، با استفاده از عوامل محرک باید حرکت محوری و جدایش محوری ایجاد گردد. با توجه به موارد ذکر شده، مطالعات انجام گرفته با شیوه‌های گوناگونی به تحلیل جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ پرداخته‌اند که می‌توان به حل روتور بلند¹ [2] و حل لایه مرزی² (اونساگر) [3, 4, 5] اشاره کرد؛ لازم به توضیح است روش‌های مذکور با فرضیات و ساده‌سازی‌های گوناگون به صورت تحلیلی حل شده‌اند. امروزه با ارتقاء رایانه‌ها از لحاظ سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، روش‌های عددی مورد توجه قرار گرفته‌اند [6, 7, 8] و به تحلیل رفتار گاز درون روتور سانتریفیوژ پرداخته‌اند. در مطالعه حاضر با استفاده از نرم‌افزار این فوم، شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور در حالت متقارن محوری و بدون ورود و خروج جریان (برگشت کامل) انجام گرفته است. لازم به ذکر است در این مطالعه از محرک مکانیکی برای چرخش جریان درون روتور استفاده شده است. حلگر مورد استفاده، حلگر تراکم‌پذیر بر مبنای دانسیته (rhoCentralFoam) و مناسب برای جریان‌های مافوق صوت می‌باشد. با انجام این مطالعه و مشاهده نتایج، قابلیت-های نرم‌افزار این فوم برای انجام شبیه‌سازی جریان درون روتور سانتریفیوژ مورد ارزیابی قرار گرفته است که می‌تواند به عنوان ابزاری مفید در راستای بهینه‌سازی و یا طراحی ماشین‌های سانتریفیوژ بکار رود.

معادلات حاکم بر جریان گاز :

گام نخست برای بررسی مسئله حاضر، تعیین معادلات حاکم بر جریان می‌باشد که به صورت زیر بیان شده است:

¹ Long rotor

² Boundary layer



بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

بقای مومتم:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

بقای انرژی:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v e) = -\nabla \dot{q} - \nabla \cdot (p v) + \nabla \cdot (\tau \cdot v) \quad (3)$$

معادله حالت گاز ایده‌آل:

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

در این معادلات p, I, v, ρ به ترتیب دانسیته گاز، بردار سرعت، انرژی داخلی و فشار می‌باشند. $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ نسبت حرارتی ویژه در فشار و حجم ثابت است. لازم به ذکر است رژیم جریان به صورت آرام در نظر گرفته شده است. تنش ویسکوز ($\nabla \cdot \tau$) در معادله بقای مومتم به علت وجود اختلاف سرعت بین لایه‌های سیال به وجود می‌آید که این تنش به صورت اتلافات ویسکوز ($\nabla \cdot (\tau \cdot v)$) در معادله بقای انرژی ظاهر می‌شود و باعث بالا رفتن دما خواهد شد.

تانسور تنش ویسکوز به صورت زیر قابل نمایش است.

$$\tau = \mu[\nabla V + (\nabla V)^T] + \lambda(\nabla \cdot v)I \quad (5)$$

که در این رابطه μ ویسکوزیته دینامیکی، λ ویسکوزیته بالک سیال ($\lambda = (-2/3)\mu$)، بالا نویس T اشاره به ترانهاده ∇V و I تانسور واحد است. تانسور تنش را می‌توان به صورت ماتریس زیر نوشت:

$$\tau = \begin{bmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda(\nabla \cdot v) & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda(\nabla \cdot v) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda(\nabla \cdot v) \end{bmatrix} \quad (6)$$

دیورژانس تانسور تنش یک بردار می‌باشد که به صورت زیر قابل نمایش است:

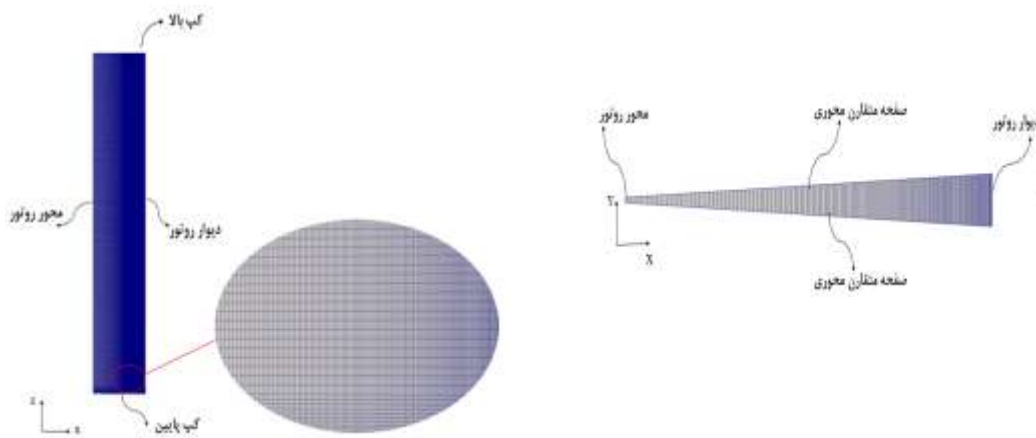


$$\begin{aligned} \nabla \cdot \tau &= \nabla \cdot [\mu[\nabla V + (\nabla V)^T]] + \nabla \cdot (\lambda(\nabla \cdot v)) \\ &= \left[\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda(\nabla \cdot v) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\ &\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda(\nabla \cdot v) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \\ &\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda(\nabla \cdot v) \right] \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

حلگر مورد استفاده در شبیه‌سازی حاضر، یک حلگر تراکم‌پذیر بر مبنای دانسیته می‌باشد که در آن گسسته‌سازی زمانی معادلات بر اساس روش صریح انجام می‌شود. در این حلگر ابتدا معادله پیوستگی حل می‌شود و با حل آن مقدار جدید چگالی بدست می‌آید. بعد از آن معادله مومتم در دو قسمت حل می‌شود که قسمت اول به صورت معادله غیرویسکوز حل شده و مقدار سرعت به روز گردیده و بعد از آن قسمت ویسکوز به آن اضافه می‌گردد. معادله انرژی ابتدا بدون نفوذ حرارتی حل گردیده و هنگامی که دمای به روز شده محاسبه شد قسمت دوم معادله انرژی یعنی همان نفوذ حرارتی اضافه می‌گردد و دمای به روز شده در گام زمانی جدید بدست می‌آید. بعد از محاسبه دما، فشار بر اساس دمای به روز شده جدید و با استفاده از معادله حالت گاز ایده‌آل، محاسبه می‌شود. بدین ترتیب این مراحل به صورت تکرار انجام شده تا همه مقادیر خصوصیات جریان به صورت دقیق بدست آید.

تشریح مسئله:

مسئله حاضر شبیه‌سازی جریان گاز درون یک روتور مدل می‌باشد که به صورت یک استوانه دوار در حالت متقارن محوری در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱ هندسه و شبکه‌بندی در نمای $x-y$ و $x-z$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در جهت x ابعاد سلول‌ها به سمت دیواره ریزتر شده است. در شکل سمت چپ برای نمایش بهتر، شبکه‌بندی قسمت پایین روتور به صورت بزرگ‌نمایی شده نشان داده شده است.



شکل ۱. هندسه و شبکه‌بندی مسئله در نمای $x-y$ و نمای $x-z$

پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی روتور مدل در جدول ۱ برای گاز هگزا فلوراید اورانیم ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی روتور مدل

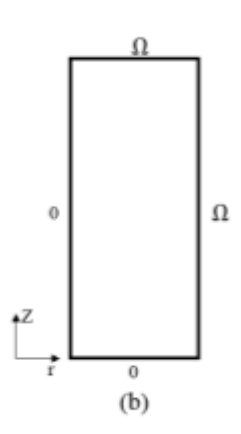
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
شعاع روتور	۱۰۰ (mm)	سرعت دیواره	۳۵۰ (m/s)
ارتفاع روتور	۱۰۰۰ (mm)	فشار دیواره	۲۰ (torr)
جرم مولکولی گاز	۳۵۲ (g/mol)	عدد پرناتل	۰/۹۶
دمای مرجع	۳۰۰ (K)	ضریب گرمای ویژه	۳۷۸ (j/kg.K)
موجودی گاز	۰/۸ (gr)	ویسکوزیته	۱/۸e-۵ (pa.sec)

نتایج:

برای بررسی قابلیت نرم افزار این فوم نیاز است نتایج بدست آمده از آن با مطالعات دیگر مقایسه گردد تا صحت و دقت آن مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج حاصل از حل عددی (اختلاف محدود) معادلات پیوستگی، مومتم، انرژی و معادله حالت گاز ایده‌آل که توسط هارادا انجام شده، مقایسه می‌گردد



[9]. در مرجع [9] هارادا جریان درون روتور در ماخ ۴ در شرایط وجود محرک مکانیکی مطابق شکل ۲ مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مرجع ابعاد به صورت بدون بعد گزارش شده به طوریکه دما با دمای مرجع و سرعت محوری با سرعت خطی دیواره بدون بعد شده است. برای مقایسه نتایج مطالعه هارادا با نتایج مطالعه حاضر، تمامی ابعاد به صورت بدون بعد ارائه می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود برای محرک مکانیکی با فرض ثابت بودن دمای تمامی مرزها تنها از اختلاف سرعت روی کپ پایین و محور استفاده شده است. لازم به ذکر است هنگامی رقیق شدن جریان و دور شدن از نواحی پیوسته، برای افزایش عملکرد روش CFD از شرط مرزی لغزش استفاده می‌گردد. به دلیل اینکه تنها بر روی دیواره روتور ناحیه کاملاً پیوسته ایجاد شده و سایر مرزها در نواحی رقیق قرار دارد بنابراین می‌توان از شرط مرزی لغزش استفاده کرد. در مساله حاضر با توجه به نیاز به اعمال محرک مکانیکی از این شرط مرزی استفاده نمی‌شود.

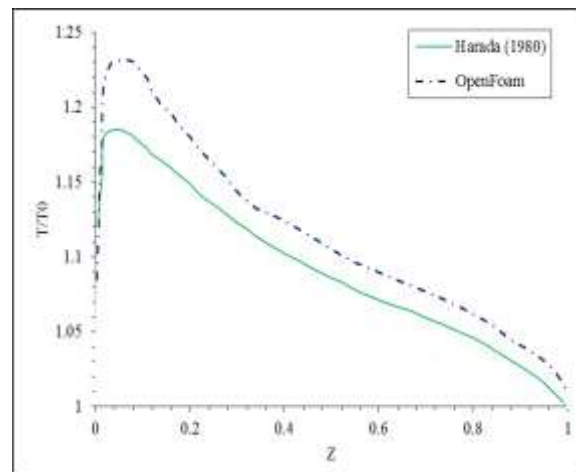


شکل ۲. شرایط مرزی محرک مکانیکی [9]

در مرجع [9] توزیع سرعت محوری و دما در شرایط استفاده از محرک مکانیکی (در واقع محرک در کپ پایین قرار گرفته است) گزارش شده است. همان‌طور که از نمودار توزیع دما در شکل ۳ مشخص است بیشینه مقادیر دما در قسمت پایینی روتور رخ می‌دهد؛ یعنی در محلی که گرادیان سرعت گاز بیشینه است. مشخص است که تغییرات دما وابسته به حرکت گاز، تحت تأثیر اتلاف ویسکوز و تراکم‌پذیری گاز می‌باشد؛ به طوریکه در قسمت پایینی روتور، دمای گاز حدود ۲۰ درصد افزایش یافته است [9]. به منظور ارزیابی شبیه‌سازی انجام گرفته، مسئله حاضر



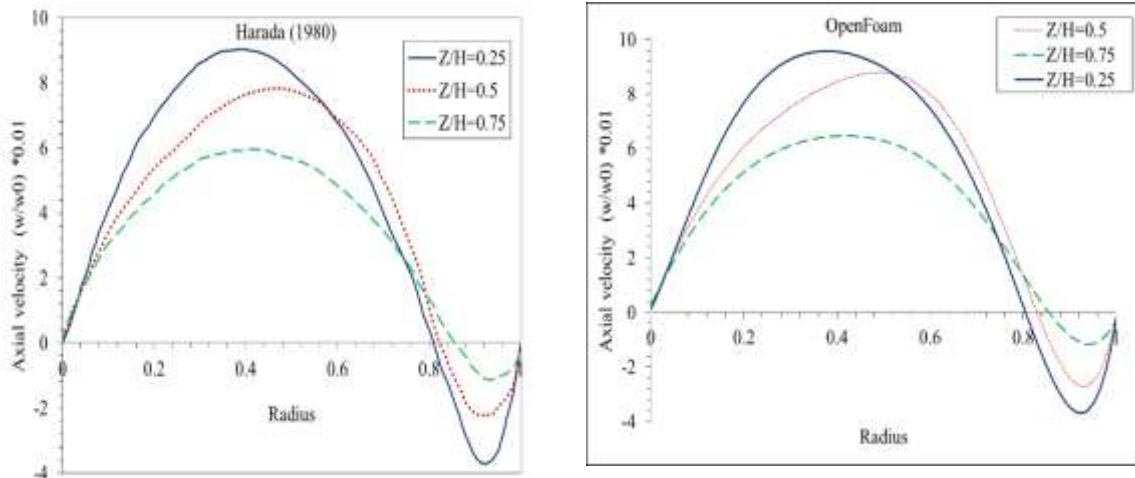
هم به شکل مشابه مسئله هارادا در نظر گرفته شده است به طوریکه محور و کپ پایین در حالت بدون لغزش و با سرعت صفر، کپ بالا و دیواره در حالت بدون لغزش و با سرعت مشخص در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با نزدیک شدن به کپ پایین، دمای گاز درون روتور افزایش یافته است. این نکته قابل توجه است که به دلیل اینکه اختلاف سرعت زاویه‌ای بر روی کپ پایین اعمال شده است بنابراین این اختلاف سرعت باعث افزایش تنش ویسکوز گاز درون روتور گشته و به دنبال آن موجب افزایش دمای گاز در نزدیک کپ پایین شده است. نمودار توزیع دما در راستای محور (Z) رسم شده است. در مطالعه حاضر دمای بدست آمده با دمای مرجع گاز و راستای محور (Z) با ارتفاع روتور بدون بعد شده است.



شکل ۳. مقایسه توزیع دما در راستای محوری مطالعه هارادا با مطالعه حاضر در شرایط وجود محرک

مکانیکی [9]

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد با دور شدن از عامل محرک، سرعت محوری کاهش یافته است. با توجه به اینکه عامل محرک در کپ پایین واقع شده است بنابراین انتظار می‌رود سرعت محوری در نزدیک کپ پایین بیشتر باشد که این نکته در مطالعه هارادا و مطالعه حاضر قابل مشاهده است. قابل ذکر است که اختلاف‌هایی در مقادیر بدست آمده وجود دارد که به دلیل ذکر نشدن اطلاعات و جزئیات کافی از ابعاد هندسی و مقدار موجودی گاز درون روتور در مطالعه هارادا می‌باشد.



شکل ۴. مقایسه توزیع شعاعی سرعت محوری در مقطع میانی روتور در مطالعه هارادا با مطالعه حاضر در

شرایط وجود محرک مکانیکی [9]

بحث و نتیجه گیری:

در این مطالعه با استفاده از نرم افزار اپن فوم شبیه سازی جریان گاز اورانیم با عوامل محرک مکانیکی در نظر گرفته شده است. همان طور که مشاهده گردید با اعمال محرک مکانیکی، به دلیل اتلافات ویسکوز دمای گاز افزایش می یابد. از طرفی با اعمال این محرک، جریان محوری درون روتور ایجاد می شود. با مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی حاضر و نتایج حاصل از مطالعه هارادا مشخص گردید نرم افزار اپن فوم این قابلیت را دارد که پدیده های درون روتور را به خوبی پیش بینی کند و برای شبیه سازی جریان گاز درون روتور مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع:

- [1] Soubbaramayer, "centrifugation," *Applied Physics*, vol. 35, pp. 183-244, 1979.
 [2] J. Hu, C. Ying and S. Zeng, "Overall Separation Factor in a Gas Centrifuge Using a Purely Axial Flow Model," *Separation Science and Technology*, vol. 40, pp. 2139-2152, 2005.



- [3] D. R. Olander, "The Theory of Uranium Enrichment by the Gas Centrifuge," vol. 8, pp. 1-33, 1981.
- [4] Brouwers, "On Compressible Flow in a Gas Centrifuge and its Effect on the Maximum Separative Power.," *Nuclear Technology*, vol. 39, 1978.
- [5] P. Migliorini, "Modeling and Simulation of Gas Centrifuge Cascade for Enhancing the Efficiency of IAEA Safeguards," pp. 1-158, 2013.
- [6] T. KAI, "Basic Characteristics of Centrifuges, (III) Analysis of Fluid Flow in Centrifuges," *Journal of nuclear science and technology*, vol. 14, pp. 267-281, 1976.
- [7] D. JIANG and S. Zeng, "CFD simulation of 3D flowfield in a gas centrifuge," *International Conference on Nuclear Engineering July 17-20, Miami, Florida, USA*, 2006.
- [8] S. Bogovalov, V. kislov and I. Tronin, "Verification of numerical codes for modeling of the flow and isotope separation in gas centrifuges," *Computers & Fluids*, vol. 86, pp. 177-184, 2013.
- [9] I. HARADA, "Computation of Strongly Compressible Rotating Flows," *JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS*, vol. 38, pp. 335-356, 1980.