



شبیه‌سازی جریان گاز هگزاfluorاید اورانیم درون روتور در حالت متقارن محوری با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم

ولی‌اله غضنفری^۱، علی اکبر صالحی^۲، علیرضا کشتکار^{۳*}، محمد حسین عسکری^۲، محمد مهدی شادمان^۱

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: ۹۹/۲/۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۵/۲۶

چکیده

برای بالا بردن عملکرد یک سانتریفیوژ گازی، به تثبیت یک جریان محوری درون روتور نیاز است. شبیه‌سازی کامپیوتری در دستیابی به جریان محوری مطلوب، اهمیت قابل‌توجهی دارد. در این پژوهش یک حلگر خاص (ICDB) موجود در نرم‌افزار این‌فوم برای شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ توسعه داده شده است. توسعه حلگرها در نرم‌افزار این‌فوم با توجه به قابلیت‌هایی همانند هزینه پایین و متن‌باز بودن آن بسیار حایز اهمیت است. برای بررسی صحت و دقت این حلگر، مطابق با مطالعه انجام شده توسط گروهی از پژوهشگران، جریان هوا با سرعت بالا روی یک صفحه تخت در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج حاصل از حلگر ICDB، نرم‌افزار فلونت نتایج به‌دست آمده در مطالعه آن‌ها حاکی از اعتبار و صحت حلگر ICDB می‌باشد. سپس با استفاده از حلگر ICDB و نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی جریان گاز هگزاfluorاید اورانیم درون روتور در حالت متقارن محوری با در نظر گرفتن عوامل محرک متعدد از قبیل گرادیان دمای دیواره، اختلاف دمای کپ‌ها، ورود و خروج گاز و محرک مکانیکی اسکوپ انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد برای شبیه‌سازی جریان گاز هگزاfluorاید اورانیم درون روتور می‌توان از حلگر ICDB در این‌فوم استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: سانتریفیوژ گازی، شبیه‌سازی جریان گاز، این‌فوم، هگزاfluorاید اورانیم

Simulation of uranium hexafluoride gas flow inside the axisymmetric rotor using OpenFOAM software

V. Ghazanfari¹, A.A. Salehi², A. Keshtkar^{*1}, M. H. Askari³, M. M. Shadman¹

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, 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, AEOL, P.O.Box: 14399-55431, Tehran-Iran

Research Article

Received 23.4.2020, Accepted 16.8.2020

Abstract

To increase the performance of a gas centrifuge, it is necessary to stabilize an axial flow inside the rotor. For this purpose, computer simulation is an effective method. In the present work, a specific solver (ICDB) was developed in OpenFOAM to simulate the gas flow in the rotor. Creating a solver is important because OpenFOAM is free and open-source software. According to a study carried out by a research group, high-speed airflow is considered on a flat plate to assess the accuracy of this solver. To validate the ICDB, the results are compared with those of Fluent software and other researchers. It is found that the results corresponding to ICDB solver are in good agreement with other effects. Moreover, using the ICDB solver and the fluent software, the uranium hexafluoride gas flow inside the axisymmetric rotor was simulated considering different drives such as the thermal drive (wall and caps) and the mechanical drive (scoop). The obtained results show that the developed solver in OpenFOAM can simulate the uranium hexafluoride gas flow inside the rotor.

Keywords: Gas centrifuge, Gas flow simulation, OpenFOAM, Uranium hexafluoride



۱. مقدمه

میزان جداسازی ایزوتوپ‌ها در سانتریفیوژ گازی، که تنها عامل جداسازی در آن نیروی گریز از مرکز است، با استفاده از معرفی فاکتور جداسازی اولیه مشخص می‌گردد. برای محاسبه فاکتور جداسازی اولیه، ابتدا فرض می‌شود که یک گاز کامل در استوانه چرخان وجود داشته و تمامی اجزا گاز با سرعت دورانی یکسان و بدون جریان محوری و یا شعاعی، در حرکت است.

در چرخش صلب گاز که مولکول‌ها فقط دارای مؤلفه زاویه ای سرعت بوده و مؤلفه‌های سرعت شعاعی و محوری ندارند، ضریب جداسازی بسیار پایین است. به‌منظور افزایش ضریب جداسازی، لازم است که گاز علاوه بر حرکت دورانی جریان محوری نیز داشته باشد. ایجاد جریان محوری درون روتور به شدت، ضریب جداسازی را افزایش می‌دهد [۱].

به‌طور کلی هدف از بررسی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ، دستیابی به جریان محوری مطلوب برای جداسازی ایزوتوپ‌های مورد نظر است که این امر از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری امکان‌پذیر می‌باشد. از این‌رو ضروری است جریان گاز مدل‌سازی و شبیه‌سازی گردد. مطالعات انجام گرفته با شیوه‌های گوناگونی به تحلیل جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ پرداخته‌اند که می‌توان به حل روتور بلند^۱ [۲] و حل لایه مرزی^۲ (اونساگر) [۳-۵] اشاره کرد. لازم به توضیح است روش‌های مذکور با در نظر گرفتن فرضیه‌ها و ساده‌سازی های گوناگون به‌صورت تحلیلی حل شده‌اند. در سال ۱۹۷۴ ناکایاما و همکارش از یک روش عددی برای محاسبه توزیع غلظت هگزافلوراید اورانیم در داخل روتور سانتریفیوژ در حالت مدل متقارن محوری استفاده کرده‌اند. با به‌کارگیری ترم‌های همرفتی در رابطه برای اعداد با رینولدز بالا، همگرایی قابل قبولی در حل به‌دست آمده است [۶].

در سال ۱۹۷۶، کای با روش انتگرال‌گیری عددی از معادلات ناویراستوکس [۷]، در سال ۱۹۷۷، تاکوجی تحلیل عددی توان جداسازی ماشین سانتریفیوژ در حالت مدل متقارن محوری [۸] و کلاتمن و همکارش در سال ۱۹۸۳ شبیه‌سازی عددی جریان گاز در ماشین سانتریفیوژ را انجام داده‌اند [۹].

هم‌چنین در سال ۲۰۰۶، زنگ و همکارش شبیه‌سازی سه بعدی جریان گاز درون سانتریفیوژ را با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۳ [۱۰]، امنس در سال ۲۰۰۷ از دو مدل متفاوت برای محاسبات هیدرودینامیکی روتور سانتریفیوژ استفاده کرده و سپس دو مدل را با هم مقایسه کرده است [۱۱] و در سال ۲۰۱۳، بوگوالو و همکارانش با استفاده از روش عددی به بررسی جریان گاز درون روتور

سانتریفیوژ و جداسازی ایزوتوپ‌ها در حالت مدل متقارن محوری پرداخته‌اند [۱۲].

یکی از این ابزارهای محاسباتی نرم‌افزار اپن‌فوم^۴ می‌باشد. در سال ۲۰۱۳ قابلیت‌های حلگرهای CFD موجود در نرم‌افزار اپن‌فوم برای جریان‌های فراصوتی توسط شن‌چان و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی حاکی از دقت و صحت این حلگرها بود [۱۳].

در سال ۲۰۱۹، کریمی‌ثابت و همکارانش مطالعه‌ای شبیه سازی به‌منظور تعیین پروفایل غلظت در ماشین سانتریفیوژ گازی برای خوراک گازی سه‌جزیی در حالت جریان برگشتی کامل با استفاده از روش DSMC انجام دادند. در آن مطالعه نتایج در دو حالت با گرادیان دمای خطی ۲۰ درجه و بدون گرادیان خطی مقایسه گردید [۱۴].

در سال ۲۰۱۹، یوسفی و همکارانش رفتار گاز درون روتور را با اعمال تمامی محرک‌ها شامل محرک‌های گرمایی و مکانیکی با استفاده از کد dsmc و حلگر dsmcFoam اصلاح شده مورد بررسی قرار دادند. در آن مطالعه تغییرات شار جرمی محوری، فشار و سرعت ارایه شد و نتایج حاکی از انطباق دو روش با یکدیگر بود [۱۵].

در سال ۲۰۱۹، غضنفری و همکارانش قابلیت‌های نرم‌افزار اپن‌فوم برای جریان درون روتور را با مدل متقارن محوری و در حالت جریان برگشتی کامل مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه محرک دمایی برای ایجاد جریان محوری استفاده گردید و با مقایسه نتایج با سایر مطالعات انجام شده، قابلیت‌های نرم افزار اپن‌فوم به اثبات رسید [۱۶].

هدف از پژوهش حاضر، اعتبارسنجی حلگر ICDB^۵ در نرم افزار اپن‌فوم به‌منظور استفاده از آن در شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور می‌باشد. از این‌رو ابتدا صحت این حلگر از طریق مقایسه نتایج آن با کارهای انجام شده توسط شن‌چان مقایسه شده است [۱۷]. سپس شبیه‌سازی جریان درون روتور با در نظر گرفتن همه عوامل محرک انجام گرفته است. ICDB یک حلگر تراکم‌پذیر بر مبنای چگالی است که گسسته‌سازی شار در آن به روش AUSM⁺ up انجام می‌گیرد که در آن معادلات بر اساس روش عددی حجم محدود و به‌صورت هم‌زمان حل می‌شوند. هم‌چنین نرم‌افزار فلوئنت به‌عنوان یک مرجع برای مقایسه نتایج به‌دست آمده از روتور در نظر گرفته شده است. بدین‌منظور نتایج حاصل از نرم‌افزار فلوئنت هم ابتدا با حل شن‌چان اعتبارسنجی شده و سپس برای مقایسه نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان درون روتور از آن استفاده می‌گردد.

4. OpenFOAM

5. Implicit Coupled Density-Based

1. Long Rotor
2. Boundary Layer
3. Computational Fluid Dynamic



۲. معادلات حاکم بر جریان گاز [۱۸]

گام نخست برای بررسی مسئله، تعیین معادلات حاکم بر جریان است. معادلات حاکم بر جریان در حالت پایا و در فرم کلی به صورت زیر بیان شده است:

$$\nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (۱)$$

معادله تکرانه:

$$\nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (۲)$$

معادله انرژی:

$$\nabla \cdot (\rho V e) = -\nabla \cdot (k \nabla T) - \nabla \cdot (p V) + \nabla \cdot (\tau V) \quad (۳)$$

معادلات مورد نیاز مربوط به گاز ایده‌آل:

$$p = (\gamma - 1) \rho I, \gamma = \frac{C_p}{C_v}, I = C_p T \quad (۴)$$

در این معادلات ρ, V, T, p به ترتیب چگالی گاز، بردار سرعت، انرژی کل، دما و فشار می‌باشند. همچنین k ضریب انتقال حرارت هدایتی است و $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ نسبت ظرفیت حرارتی ویژه در فشار و حجم ثابت است. فرضیات در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر شامل در نظر گرفتن سیال گازی به عنوان گاز کامل، ثابت در نظر گرفتن ویسکوزیته، هدایت گرمایی و گرمای ویژه گاز و همچنین ناچیز در نظر گرفتن شتاب گرانش در برابر شتاب گریز از مرکز ماشین می‌باشند. همچنین جریان به صورت آرام فرض شده است.

۳. روش حل

ابتدا فضای محاسباتی که جریان در آن مورد تحلیل قرار خواهد گرفت، به تعداد زیادی المان هندسی، که شبکه نام دارد، تقسیم می‌شود. سپس معادلات حاکم بر جریان با روش مناسب گسسته‌سازی می‌شوند. آن‌گاه گرادیان‌ها و شارها، گسسته‌سازی شده و با روش‌های استاندارد که مناسب مسئله مورد نظر هستند، محاسبه و در معادلات جایگذاری می‌شوند. نهایتاً مسئله با استفاده از روش تکرار حل شده و مجهولات در کل ناحیه حل به دست می‌آیند. برای حل این معادلات از حلگر ICDB استفاده شده است.

۱.۳ حلگر ICDB

در این قسمت یک حلگر بر مبنای چگالی، که در آن با روش AUSM⁺ up به گسسته‌سازی شار می‌پردازد، توسعه داده شده

است. حل معادلات در این حلگر بر اساس روش تکرار، حل به صورت هم‌زمان و ضمنی^۱ انجام می‌گیرد.

روش تکراری که در آن روابط به صورت یک دستگاه معادلات و به طور هم‌زمان حل می‌شوند (GMRE)^۲ نام دارد که به وسیله شواهدی انجام شده [۱۹] و در این حلگر از آن استفاده می‌شود. علاوه بر این شن‌چان، حل معادلات براساس روش LU-SG^۳ را در نرم‌افزار اپن‌فوم پیاده‌سازی کرده است [۲۰]. در مطالعه حاضر کار انجام شده توسط شن‌چان ادامه داده شده و قابلیت حلگر ایشان با به کارگیری و اضافه کردن روش AUSM⁺ up ارتقا یافته و بهبود پیدا کرده است. روش های AUSM مزیت‌هایی از قبیل دقت بالا در برخورد با ناپیوستگی‌ها، خطاهای عددی کم و بازدهی محاسباتی بالایی دارند [۲۱]. در روش‌های AUSM، براساس عدد ماخ توابع چند جمله‌ای شکسته می‌شوند؛ به طوری که از میان‌یابی به روش مرکزی^۴ و بالادست^۵ برای جریان‌های فروصوت و فراصوت استفاده می‌شود. روش میان‌یابی مرکزی براساس تخمین متقارنی از اطلاعات موجود در نقاط مجاور سطح سلول عمل می‌کند و در نتیجه جهتی که اطلاعات از آن به سلول می‌رسد، در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین با توجه به ناچیز بودن اتلافات موجود در روش مرکزی و به منظور از بین بردن نواسانات موجود در حل، می‌بایست تقریب مناسبی از جملات حذف شده هنگام گسسته‌سازی، به عنوان اتلافات مصنوعی^۶، به معادلات اضافه شود که نقش مهمی در دقت حل ایفا می‌کند. با توجه به این که روش‌های بالادست بر پایه شار انتشار اطلاعات جریان در امتداد جهات مشخصه استوارند، از این‌رو با فیزیک جریان در سراسر میدان تطابق خوبی دارند.

۱.۱.۳ روش AUSM⁺ up

برای توضیح روابط حاکم بر روش AUSM⁺ up و تفاوت آن با سایر روش‌های AUSM معادلات غیرویسکوز در فرم برداری به صورت زیر نوشته شده است:

$$\phi + \nabla \cdot F = 0 \quad (۵)$$

که در آن $\Phi = [\rho \quad \rho u \quad \rho e]$ و $F = [\rho u \quad \rho u^2 \quad P \quad \rho u e]$ برای شار یک‌بعدی است.

در همه روش‌های AUSM، شار غیرویسکوز به صورت مستقیم به شارهای جابه‌جایی و فشاری تقسیم می‌شود:

$$F = F^C + P \quad (۶)$$

1. Implicit
2. Generalized Minimal Residual
3. Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel
4. Central
5. Upwind
6. Artificial Dissipation



$$M_p = -K_p \max(1 - \sigma \overline{M}^{\tau, \cdot}, 0) \frac{p_R - p_L}{p_f C_f^{\tau}} \quad (18)$$

$$\sigma \leq 1, \quad \rho_f = (\rho_L + \rho_R) / 2$$

$$\max(1 - \sigma \overline{M}^{\tau, \cdot}, 0) \geq 0$$

که در این رابطه $0 \leq K_p \leq 1$ می‌باشد. همچنین فاکتور Δm به منظور ساده‌سازی با رابطه Δm جایگذاری می‌شود:

$$\Delta m = [m_{(\tau, \beta)}^+(Ma_L - m_{(\cdot)}^+(Ma_L)) - m_{(\tau, \beta)}^-(Ma_L) - m_{(\cdot)}^-(Ma_R)] \geq 0 \quad (19)$$

در روش AUSM⁺ up شار فشاری با اضافه کردن ترم دیفرانسیلی سرعت P_u (نفوذ) اصلاح می‌شود:

$$p_f = p_{(\Delta, \alpha)}^+(Ma_L) p_L + p_{(\Delta, \alpha)}^-(Ma_R) p_R + p_u \quad (20)$$

که در آن:

$$p_u = -K_u p_{(\Delta, \alpha)}^+(Ma_L) p_L p_{(\Delta, \alpha)}^-(Ma_R) * (\rho_L + \rho_R) C_f (u_R - u_L) \quad (21)$$

در این رابطه $0 \leq K_u \leq 1$ می‌باشد. الگوریتم حل در نرم‌افزار این‌فوم در شکل ۱ گزارش شده است.

۳.۲ اعتبارسنجی حلگر

برای اعتبارسنجی حلگر (ICDB) جریان هایپرسونیک هوا روی یک صفحه تخت آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی در صفحه بالایی و قسمت خروج جریان به صورت گرادیان صفر، برای فشار، سرعت و دما لحاظ شده است (شکل ۲). برای شبکه‌بندی از شبکه ساختار یافته مطابق شکل ۳ استفاده شده است. در شبکه ساختاریافته هر المان را می‌توان به راحتی با شماره سطر و ستون آدرس‌دهی کرد چرا که شبکه با ساختاری بسیار منظم و مرتب تولید شده است اما برای شبکه بدون ساختار، به دلیل ساختار نامنظم، این گونه از آدرس دهی عملاً امکان پذیر نخواهد بود. برای بررسی بهتر گرادیان‌های شدید در لایه مرزی، سلول‌های نزدیک صفحه تخت به خوبی ریز شده است. با مطالعه شبکه، مشخص گردید که تعداد سلول‌ها 200×200 ، و ابعاد نزدیک‌ترین سلول به صفحه تخت برابر با $20 \mu m$ شبکه مناسبی خواهد بود. جریان آزاد هوا در حال عبور از روی صفحه تخت با عدد ماخ 6.47 ، دمای K 241.5 و فشار Pa 648.1 می‌باشد.

طبق مرجع [۲۲]، شار در صفحه میانی بین سلول‌ها به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F_f = \frac{1}{\gamma} \left[C_f Ma_f (\Phi_L + \Phi_R) - C_f |Ma_f| (\Phi_L - \Phi_R) \right] + \begin{bmatrix} \cdot \\ pn \\ \cdot \end{bmatrix}_f \quad (7)$$

سرعت صوت در صفحه مشترک:

$$C_f = \frac{1}{\gamma} (C_L + C_R) \quad (8)$$

عدد ماخ در سمت راست و چپ صفحه میانی:

$$Ma_L = \frac{u_L}{C_f} \quad (9)$$

$$Ma_R = \frac{u_R}{C_f} \quad (10)$$

در صفحه میانی و فشار:

$$Ma_f = m_{(\tau, \beta)}^+(Ma_L) + m_{(\tau, \beta)}^-(Ma_R) \quad (11)$$

$$p_f = p_{(\Delta, \alpha)}^+(Ma_L) p_L + p_{(\Delta, \alpha)}^-(Ma_R) p_R \quad (12)$$

در نظر گرفته شده و همچنین عدد ماخ و فشار به صورت زیر گسسته می‌گردد:

$$m_{(\cdot)}^{\pm}(Ma) = \frac{1}{\gamma} (Ma + |Ma|) \quad (13)$$

$$m_{(\tau)}^{\pm}(Ma) = \begin{cases} m_{(\cdot)}^{\pm}(Ma) & \text{if } |Ma| \geq 1 \\ \frac{\pm 1}{\gamma} (Ma \pm 1)^{\tau} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$m_{(\tau, \beta)}^{\pm}(Ma) = \begin{cases} m_{(\cdot)}^{\pm}(Ma) & \text{if } |Ma| \geq 1 \\ m_{(\tau)}^{\mp}(Ma) [1 \mp \beta m_{(\tau)}^{\mp}(Ma)] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

$$p_{(\Delta, \alpha)}^{\pm}(Ma) = \begin{cases} \frac{1}{Ma} m_{(\cdot)}^{\pm}(Ma) & \text{if } |Ma| \geq 1 \\ \pm m_{(\tau)}^{\mp}(Ma) [2 \mp \beta \alpha m_{(\tau)}^{\mp}(Ma)] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

این روش به AUSM⁺ معروف است. هنگامی که M_p و P_u به معادلات بالا اضافه می‌شوند این روش AUSM⁺ up نامیده می‌شود.

$$Ma_f = m_{(\tau, \beta)}^+(Ma_L) + m_{(\tau, \beta)}^-(Ma_R) + M_p \quad (17)$$

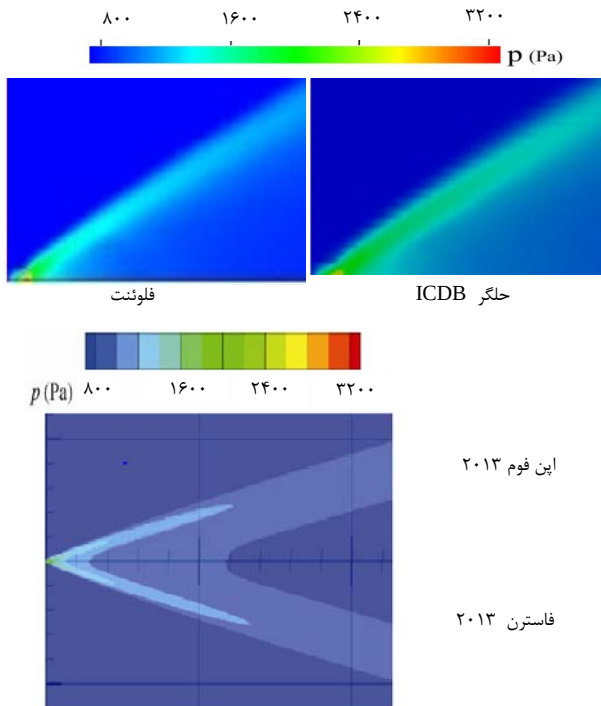
که در آن M_p ترم نفوذ فشاری است که برای ارتقا محاسبات برای جریان با عدد ماخ پایین به صورت زیر تعریف می‌شود:



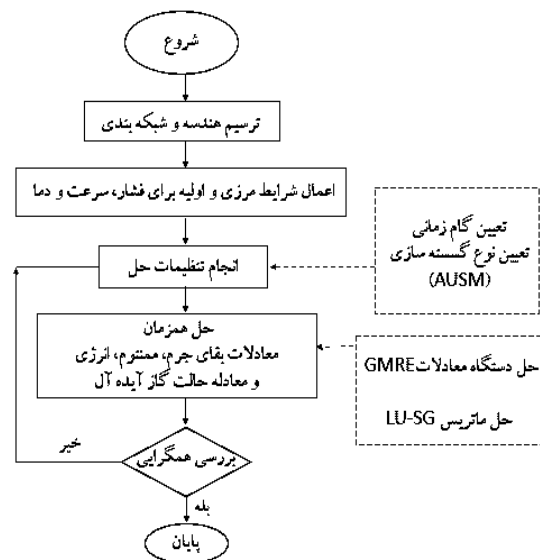
صفحه تخت در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف قابل توجهی بین نتایج حاضر با مطالعه شن‌چان وجود ندارد.

در شکل ۶، مقدار بیشینه به‌دست آمده از حل ICDB نسبت به مقدار بیشینه به‌دست آمده از حل شن‌چان کم‌تر می‌باشد اما نتایج کاملاً نزدیک و مشابه همدیگر بوده و بیش‌ترین اختلاف در حدود ۶ درصد است. در شکل ۷، نتایج به‌دست آمده از ICDB نسبت به حل شن‌چان دارای نوسانات کم‌تری است. بیش‌ترین اختلاف بین ICDB و مطالعه شن‌چان نزدیک خروجی جریان و در حدود ۳ درصد می‌باشد.

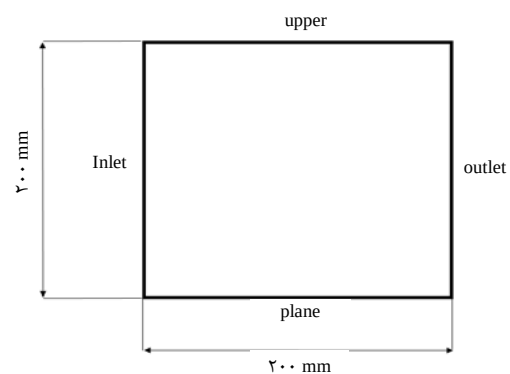
علاوه بر این، با بررسی نتایج مشخص گردید که به‌کارگیری فلوئنت نیز منجر به نتایج مشابهی با ICDB و مطالعه شن‌چان خواهد شد و بنابراین از آن می‌توان به‌عنوان یک مرجع برای بررسی و مقایسه نتایج سایر مطالعات استفاده کرد. از این‌رو در قسمت بعد نتایج حلگر ICDB با نتایج حاصل از فلوئنت مقایسه شده و دقت و صحت حلگر مذکور برای شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور قابل بررسی می‌باشد.



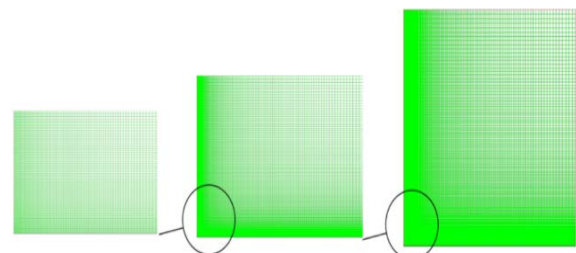
شکل ۴. مقایسه کانتورهای فشار حلگر ICDB، فلوئنت و مطالعه شن‌چان [۱۷].



شکل ۱. شبکه‌بندی ساختار یافته روی دامنه سیال در صفحه تخت.



شکل ۲. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی بر روی صفحه تخت.



شکل ۳. شبکه‌بندی ساختار یافته روی دامنه سیال در صفحه تخت.

۳.۳ نتایج اعتبارسنجی حلگر

برای بررسی اعتبارسنجی حلگر، نتایج به‌دست آمده از حلگر ICDB با نتایج مربوط به نرم‌افزار تجاری فلوئنت و مطالعه شن‌چان [۱۷] مقایسه می‌شود. مطالعه شن‌چان با استفاده از حلگر بر مبنای چگالی در این فوم و نرم‌افزار تجاری Fastran [۲۳] انجام شده است. کانتورهای فشار و دما در مطالعه حاضر با نتایج شن‌چان در شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه شده است. همچنین نتایج به‌دست آمده حلگر ICDB و فلوئنت در مطالعه حاضر مقایسه شده است. توزیع فشار و دمای به‌دست آمده از حل ICDB، فلوئنت و مطالعه شن‌چان بر روی



۴. تشریح مسئله حاضر

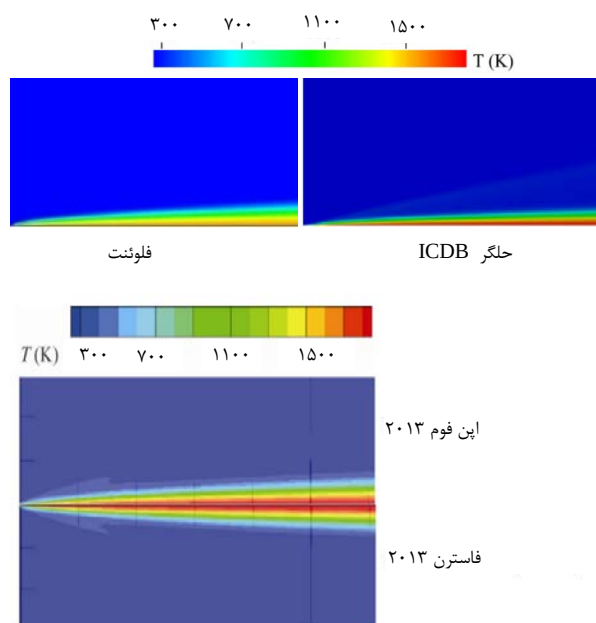
مسئله حاضر شبیه‌سازی جریان گاز هگزافلوراید اورانیوم درون یک سانتریفیوژ مدل با شعاع ۹۰ mm و ارتفاع ۱۱۰۰ mm است که به صورت یک قطاع ۴ درجه در حالت متقارن محوری در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه به دلیل بهبود حل مسئله از شبکه‌بندی ساختاریافته استفاده می‌گردد. نحوه شبکه‌بندی بدین ترتیب انجام شده است که در موقعیت‌هایی که تغییرات شدیدی در خصوصیات جریان رخ می‌دهد، از سلول‌های ریزتر استفاده می‌گردد. با توجه به این نکته، در کنار دیواره و کپ‌های بالا و پایین، اسکوپ، بفل و ورود خوراک از سلول‌های ریزتری استفاده شده است. در شکل ۸ هندسه و شبکه‌بندی در نمای I-Z نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، ابعاد سلول‌ها با نزدیک شدن به سمت دیواره ریزتر شده است. برای نمایش بهتر، شبکه‌بندی نواحی اطراف بفل، ورود خوراک و اسکوپ پسماند با ابعاد بزرگ‌تری نشان داده شده است.

پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی سانتریفیوژ برای گاز هگزافلوراید اورانیوم در جدول ۱ ارائه شده است.

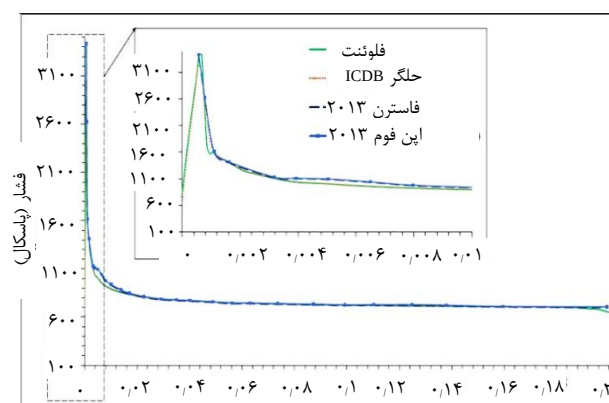
شرایط اولیه برای میدان سرعت صفر، برای دما ۳۱۰ K و برای فشار ۱۵۰ Pa در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه حالت گاز ایده‌آل و دما و فشار اولیه در نظر گرفته شده، جرم اولیه درون روتور ۰/۶ g محاسبه می‌گردد. شرایط مرزی دما برای کپ بالا ۳۲۰ K، کپ پایین ۳۰۰ K، محور ۳۱۰ K و برای دیواره روتور به صورت گرادیان خطی از ۳۰۰ K تا ۳۲۰ K اعمال شده است. شرایط مرزی سرعت برای دیواره‌های دوار برابر با ۵۶۵ m.s^{-1} ، برای اسکوپ پسماند و محصول با اختلاف ۳۰ درصد نسبت به سرعت چرخشی گاز، اعمال شده است. دبی خوراک برابر با ۲۰ mg.s^{-1} و جریان خروجی از اسکوپ‌ها با کات ۰/۴۵ اعمال شده است. معادلات حاکم بر گاز به صورت پایا و در حالت متقارن محوری در نظر گرفته شده است. فرضیات در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر عبارتند از در نظر گرفتن سیال گازی به عنوان گاز کامل، ثابت در نظر گرفتن ویسکوزیته، هدایت گرمایی و گرمای ویژه گاز و همچنین ناچیز در نظر گرفتن شتاب گرانش در برابر شتاب گریز از مرکز ماشین. همچنین جریان به صورت آرام فرض شده است. با حل همزمان معادلات پایستگی جرم، پایستگی تکانه، پایستگی انرژی و معادله حالت گاز ایده‌آل توزیع خصوصیات جریان از قبیل فشار، دما و سرعت در تمام دامنه حل به دست آمده است.

۱.۴ نتایج

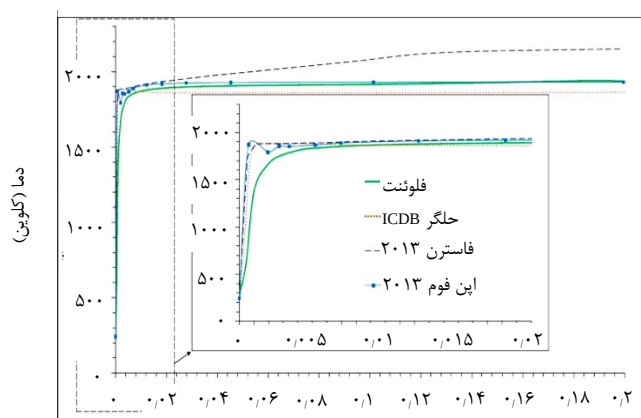
با اعمال شرایط مرزی و تنظیمات حلگر توزیع متغیرهای جریان درون روتور به دست می‌آید. در شکل ۹ کانتور فشار درون روتور نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌



شکل ۵. مقایسه کانتورهای دما حلگر ICDB، فلونت و مطالعه شن‌چان [۱۷].



شکل ۶. مقایسه تغییرات فشار در امتداد صفحه تخت با مطالعه شن‌چان [۱۷].



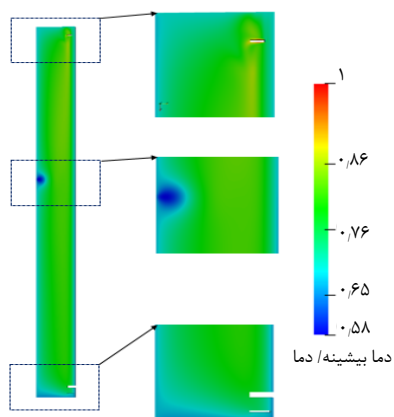
شکل ۷. مقایسه تغییرات دما در امتداد صفحه تخت با مطالعه شن‌چان [۱۷].



در شکل ۱۰ کانتور دما درون روتور نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، دما در نزدیک اسکوپ پسماند افزایش یافته است. مشخص است هنگامی که اسکوپ با سرعت صفر در معرض جریان با سرعت زاویه‌ای ω قرار می‌گیرد، با برخورد جریان چرخشی به اسکوپ، انرژی مکانیکی به انرژی درونی تبدیل شده که باعث افزایش دما شده است. دمای افزایش یافته به حدود 370 K می‌رسد. مشاهده می‌شود که دمای جریان اطراف خوراک کاهش یافته است. هنگام ورود گاز از مجرای ورود خوراک به درون روتور به دلیل منبسط شدن گاز، دمای آن کاهش می‌یابد که این کاهش دما قابل مشاهده می‌باشد. در شکل ۱۱ کانتور سرعت شعاعی درون روتور سانتیفریوژ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اکثر نقاط روتور جریان شعاعی وجود ندارد. با توجه به شکل ۱۱ مشخص است که در محل ورود خوراک که گاز به داخل روتور وارد شده و منبسط گردیده، سرعت شعاعی به بیشینه مقدار خود که برابر با 180 m.s^{-1} است، می‌رسد.

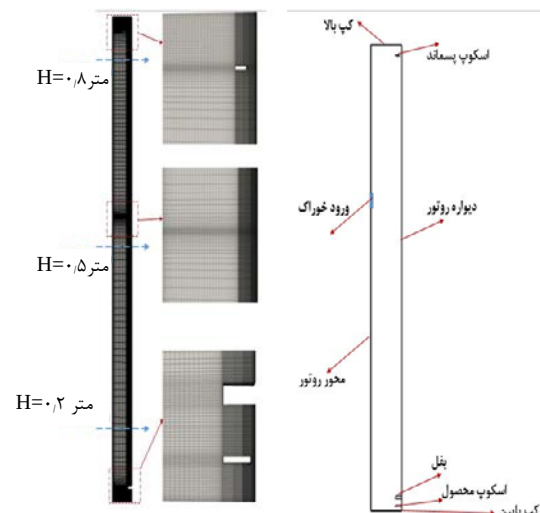
۱.۱.۴ مقایسه نتایج حلگر ICDB با فلونت

نتایج به‌دست آمده از حلگر ICDB با نتایج حاصل از نرم‌افزار فلونت در شرایط مرزی و هندسی یکسان نیز انجام شده است. تفاوت دو روش در این است که حل عددی فلونت براساس روش حجم محدود، حلگر بر پایه چگالی و با استفاده از روش رو (roe) گسسته‌سازی و حل معادلات انجام شده است؛ در صورتی که حل عددی حاضر با استفاده از نرم‌افزار اپن‌فوم بر اساس روش حجم محدود، حلگر بر پایه چگالی و با استفاده از روش AUSM⁺ up گسسته‌سازی و حل معادلات انجام شده است. تمامی پارامترهای شبیه‌سازی، شرایط مرزی و شرایط اولیه در دو روش مطابق جدول ۱ به‌صورت مشابه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰. کانتور نسبت دما اطراف بفل، ورود خوراک و اسکوپ پسماند.

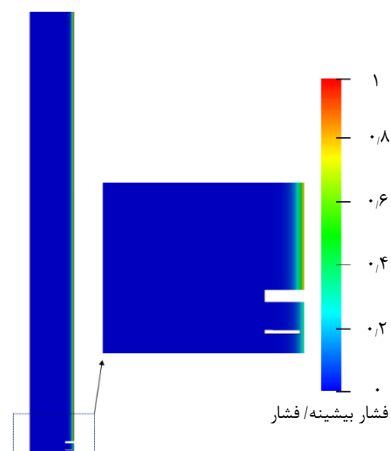
گردد، جرم زیادی از گاز هگزا فلوراید اورانیوم در کنار دیواره روتور جمع شده و فشار دیواره نسبت به محور به‌شدت افزایش یافته است به‌طوری‌که فشار در کنار دیواره به 2800 Pa می‌رسد. همچنین وجود بفل درون روتور علاوه بر جدا کردن اثر اسکوپ بر جریان محوری، باعث کاهش فشار در زیر بفل شده است که این نسبت فشار در حدود ۳ برابر می‌باشد. لازم به ذکر است اعداد با بیشینه فشار به‌دست آمده نرمال شده‌اند.



شکل ۸. هندسه و شبکه‌بندی مسئله در نمای I-Z.

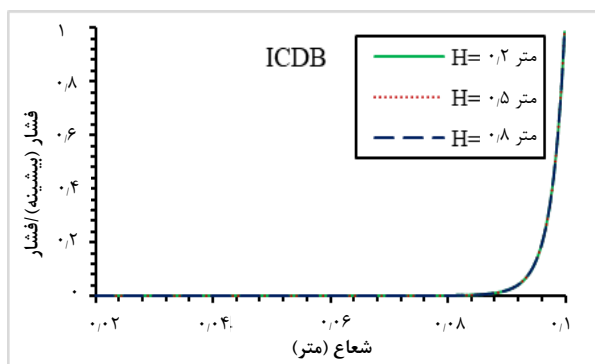
جدول ۱. پارامترهای گاز هگزا فلوراید اورانیوم

پارامتر	مقدار
جرم مولکولی گاز (M)	352 (g/mol)
ضریب گرمای ویژه (C_p)	378 (j/kg.K)
نسبت گرمای ویژه ($\gamma = \frac{C_p}{C_v}$)	1.06
ضریب هدایت گرمایی (k)	0.0071 (W/m.K)
ویسکوزیته (μ)	0.000018 (pa.sec)

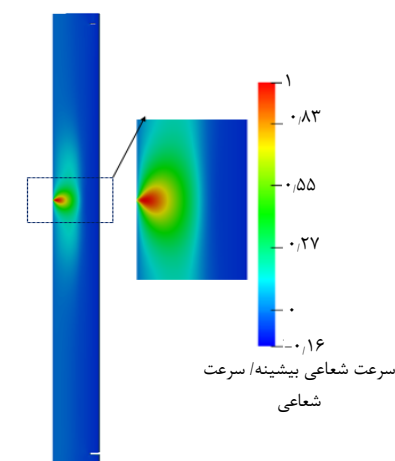


شکل ۹. کانتور نسبت فشار درون روتور سانتیفریوژ و اطراف بفل.

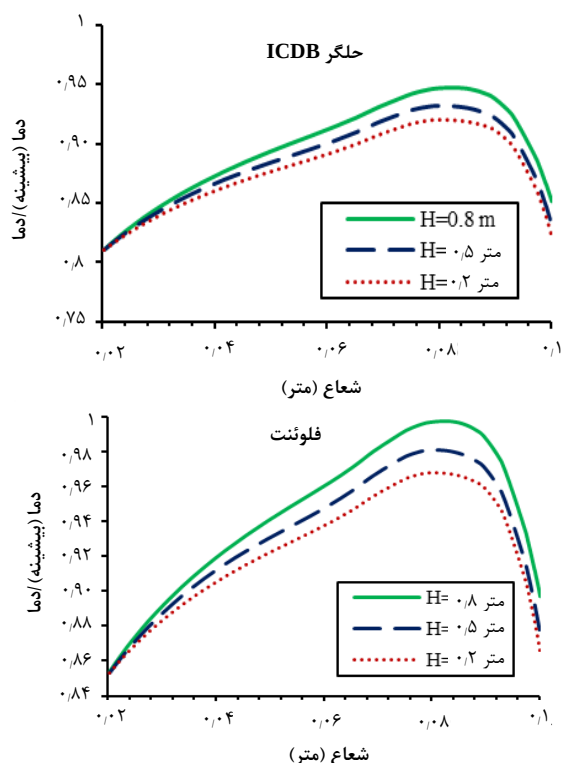




شکل ۱۲. توزیع فشار در راستای شعاعی برای حلگر ICDB و فلوئنت.



شکل ۱۱. کانتور سرعت شعاعی اطراف ورود خوراک



شکل ۱۳. مقایسه توزیع دما در راستای شعاعی برای حلگر ICDB و فلوئنت.

وجود دو اکسترمم متوالی از شعاع ۰/۰۷ m تا دیواره روتور حاکی از ایجاد دو جریان چرخشی درون روتور می‌باشد که دلیل آن وجود محرک دمایی کپ‌ها، گرادیان دمایی دیواره و محرک مکانیکی اسکوپ می‌باشد. در این حالت کپ بالا گرم‌تر و کپ پایین، کپ سردتر می‌باشد و دیواره دارای گرادیان دمایی خطی بین این دو دما فرض شده است. گاز در تماس با کپ پایین سرد شده و در نتیجه چگالی آن افزایش می‌یابد و به دلیل وجود شتاب گریز از مرکز بسیار زیاد ناشی از دوران روتور، به سمت دیواره کشیده می‌شود. در کپ بالا اتفاقی برعکس رخ داده و گاز سبک‌تر به سمت مرکز روتور رانده می‌شود. در دیواره‌ی روتور نیز (که با افزایش ارتفاع دما افزایش می‌یابد) مولکول‌های گاز نزدیک‌تر به کپ بالا به دلیل در تماس بودن با

در شکل ۱۲ نمودار تغییرات فشار در راستای شعاعی در سه مقطع پایین ($Z=0.2$ m)، مقطع میانی ($Z=0.5$ m) و مقطع بالایی ($Z=0.8$ m) درون روتور رسم شده است. همان‌طور که مشخص است، فشار به صورت نمایی افزایش یافته است. تغییرات فشار روی دیواره روتور در راستای ارتفاع اندکی دارد و مقدار این اختلاف فشار در راستای ارتفاع ۱۰۰ Pa می‌باشد. مقایسه نمودارهای به دست آمده از دو روش حاکی از تطابق خوب نتایج با یکدیگر است. در شکل ۱۳ نمودار تغییرات دما در راستای شعاعی در سه مقطع درون روتور رسم شده است. با توجه به اینکه دمای کپ بالا ۳۲۰ K و دمای کپ پایین ۳۰۰ K می‌باشد و گرادیان خطی دما روی دیواره وجود دارد، بنابراین مشخص است که در $r=0.1$ m با افزایش ارتفاع دما افزایش یابد. علاوه بر این در شعاع ۰/۰۷ تا ۰/۰۹ متر دما افزایش یافته است. از علل افزایش دما درون روتور می‌توان به فرایند تراکم‌پذیری و اتلافات ویسکوز در لایه‌های گاز اشاره کرد. با مقایسه نمودارهای به دست آمده از دو روش، دقت و صحت نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته با حلگر ICDB در مقایسه با شبیه‌سازی انجام گرفته با فلوئنت مشخص و قابل قبول می‌باشد. دماهای به دست آمده با بیشینه دمای به دست آمده نرمال شده‌اند.

در شکل ۱۴ نمودارهای توزیع شار جرمی محوری ($\rho U A$) برحسب شعاع در سه مقطع طولی مختلف ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به دلیل اینکه مقادیر شار جرمی محوری در ناحیه مرکزی روتور ثابت و نزدیک به صفر می‌باشد، برای نمایش بهتر، نمودارها از شعاع ۰/۰۷ m رسم شده‌اند.



۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از حلگر توسعه‌یافته ICDB در این فوم، شبیه‌سازی جریان گاز هگزافلوراید اورانیوم با در نظر گرفتن همه عوامل محرک (گرادیان دمای دیواره، اختلاف دمای کپ‌ها، ورود و خروج گاز و محرک مکانیکی اسکوپ) انجام شد. با اعمال محرک‌ها، جریان محوری درون روتور ایجاد می‌شود که پارامتری تأثیرگذار در بررسی عملکرد جداسازی سانتریفیوژ خواهد بود. هدف از این مطالعه بررسی صحت و اعتبارسنجی حلگر ICDB برای شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور می‌باشد. با توجه به اینکه داده‌های تجربی برای مقادیر خصوصیات جریان درون روتور وجود ندارد و با امکانات امروزی این مقادیر درون روتور قابل اندازه‌گیری نیستند، بنابراین امکان مقایسه با داده‌های تجربی مسیر نمی‌باشد. بنابراین برای اعتبارسنجی این حلگر، ابتدا جریان هایپرسونیک هوا بر روی یک صفحه تخت با حلگر ICDB و همچنین نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی شد و اطلاعات آن، یا هدف مقایسه و اعتبارسنجی بهتر، با نتایج به‌دست آمده از مطالعات شش‌چان مقایسه شد. سپس برای بررسی توانایی‌های این حلگر برای شبیه‌سازی جریان گاز هگزافلوراید اورانیوم، روتور مدلی با شرایط هندسی و مرزی مشابه در این فوم و فلوئنت در نظر گرفته شد. با مقایسه نتایج مشخص گردید حلگر ICDB در مقایسه با فلوئنت از اعتبار کافی برخوردار است. بنابراین از این حلگر در شبیه‌سازی جریان گاز هگزافلوراید اورانیوم درون روتور می‌توان استفاده کرد. با توجه به قابلیت‌های موجود در نرم‌افزار این فوم (حل ناحیه مولکولی با روش DSMC)، استفاده از این نرم‌افزار کمک قابل توجهی به تحلیل رفتار گاز درون کل روتور سانتریفیوژ خواهد کرد.

تشکر و قدردانی

این مطالعه با حمایت‌های فنی و مالی شرکت فناوری‌های پیشرفته سازمان انرژی اتمی ایران انجام گرفته است. در این‌جا لازم است از استاد ارجمند جناب آقای دکتر صفدری و جناب آقای دکتر ملاح به خاطر حمایت‌های مذکور تشکر و قدردانی نمایم.

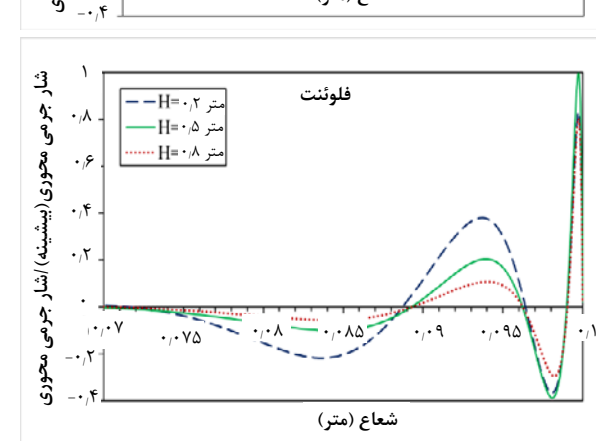
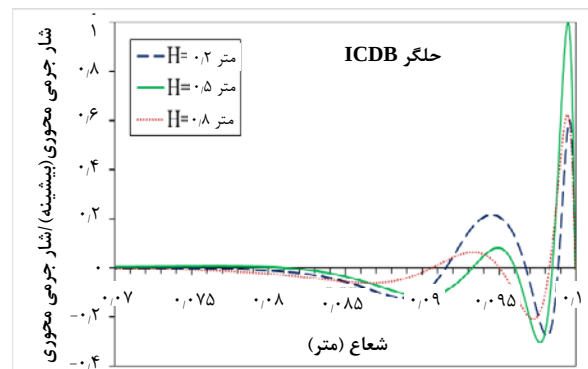
مراجع

1. 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).
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*, 40, 2139 (2005).
3. D. R. Olander, *The Theory of Uranium Enrichment by the Gas Centrifuge*, *Progress in Nuclear Energy*, 8, 1 (1981).

دمای بیش‌تر، به سمت مرکز روتور کشانده شده و جای خالی آن‌ها توسط مولکول‌های زیرین (نزدیک به دیواره) پر می‌شود. از این‌رو جهت چرخش در نزدیک دیواره به سمت بالا و در سمت مرکز روتور، گاز به سمت پایین حرکت می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، نتایج شبیه‌سازی با دو روش مذکور نشان می‌دهد که مقادیر به‌دست آمده برای شار جرمی محوری اختلاف زیادی با یکدیگر ندارد.

این نکته قابل ذکر است برای ارایه نتایج حاصل، مطالعه استقلال از شبکه برای دو شبیه‌سازی با فلوئنت و این فوم انجام شده و سائز سلول در کنار دیواره برابر با $1 \mu\text{m}$ انتخاب گردیده است.

چنان‌که مشاهده شد، مقایسه نتایج شبیه‌سازی جریان گاز هگزافلوراید اورانیوم درون روتور سانتریفیوژ با دو روش حل عددی با این فوم و فلوئنت نشان داد که علی‌رغم متفاوت بودن روش گسسته‌سازی در آن‌ها، نتایج به یکدیگر نزدیک بوده و روش مطالعه حاضر با این فوم از دقت خوبی برخوردار است. هم‌چنین ذکر این نکته ضروری است که نرم‌افزار این فوم علاوه بر متن‌باز بودن و رایگان بودن، قابلیت حل ناحیه مولکولی و توسعه حلگر را دارا می‌باشد؛ در حالی‌که در نرم‌افزار فلوئنت این قابلیت وجود نداشته و نمی‌توان آن را توسعه داد. از این‌رو با اعتبارسنجی و اثبات صحت حلگر توسعه‌یافته حاضر در این فوم، گامی مهم برای شبیه‌سازی جریان گاز هگزافلوراید اورانیوم در کل روتور و شبیه‌سازی نواحی مولکولی درون روتور برداشته شده است.



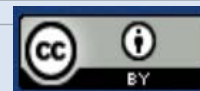
شکل ۱۴. تغییرات شار جرمی محوری در راستای شعاعی برای حلگر ICDB و فلوئنت.



4. J. Brouwers, *On Compressible Flow in a Gas Centrifuge and its Effect on the Maximum Separative Power*, [Nuclear Technology](#). **39**, (1978).
5. P. Migliorini, PhD. thesis, [University of Virginia](#), 2013.
6. T. Nakayama and W. Takuji, *Numerical Analysis of Separative Power of Isotope Centrifuges*, [Journal of Nuclear Science and Technology](#). **11**, 495 (1974).
7. T. Kai, *Basic Characteristics of Centrifuges, (III) Analysis of Fluid Flow in Centrifuges*, [Journal of Nuclear Science and Technology](#). **14**, 267 (1976).
8. T. Takuji, *Numerical Analysis of Separative Power of Isotope Centrifuges, (II)*, [Journal of Nuclear Science and Technology](#). **14**, 901 (1977).
9. L. Cloutman, *Numerical simulation of the countercurrent in a gas centrifuge*, [Los Alamos National Laborator](#). **8972** (1983).
10. D. Jiang and S. Zeng, in: *International Conference on Nuclear Engineering*, (Miami, Florida, USA, 2006).
11. P. Omnes, *Numerical and physical comparisons of two models of a gas centrifuge*, [Computers & Fluids](#). **36**, 1028 (2007).
12. S. Bogovalov, and et al., *Verification of numerical codes for modeling of the flow and isotope separation in gas centrifuges*, [Computers & Fluids](#). **86**, 177 (2013).
13. S. Chen, S. Feng Xiao and X. Xinlin, *Analysis on capabilities of density-based solvers within OpenFOAM to distinguish aerothermal variables in diffusion boundary layer*, [Chinese Journal of Aeronautics](#). **26**, 1370 (2013).
14. J. Karimi Sabet, and et al., *Simulation to determine the concentration profile for a three-component gas of a gas centrifuge machine under total reflux flow conditions by using the DSMC method*, [Journal of Nuclear Science and Technology](#), (2019) (In Persian).
15. S. Yousefi nasab, and et al., *Investigation Gas Behavior Inside a Gas Centrifuge Using DSMC Code Developed And dsmcFOAM Solver*, [Journal of Nuclear Science and Technology](#), (2019) (In Persian).
16. V. Ghazanfari, and et al., *OpenFoam application for numerical simulation of thermal drive effect on gas flow in a gas centrifuge for total reflux*, [Journal of Nuclear Science and Technology](#), (2019) (In Persian).
17. S. Chun, S. Fengxian and X. Xinlin, *Analysis on capabilities of density-based solvers within OpenFOAM to distinguish aerothermal variables in diffusion boundary layer*, [Chinese Journal of Aeronautics](#). **26**, 1370 (2013).
18. J. Blazek, *Computational Fluid Dynamic Principle And Application*, ([Elsevier](#), 2001).
19. S. Ye, W. Yang and X. Xu, in: *Computing Machinery*, ([Wuhan](#), China, 2017).
20. 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).
21. K. Kitamura and A. Hashimoto, *Reduced dissipation AUSM-family fluxes: HR-SLAU2 and HR-AUSM+-up for high resolution unsteady flow simulations*, [Computers & Fluids](#). **126**, 41 (2016).
22. M. Liou, *A sequel to AUSM, PartII:AUSM+-up for all speeds*, [Journal of Computational Physics](#). **214**, 137 (2006).
23. E. Bloesch, and et al., *Development and validation of transonic flutter prediction methodology using CFD-FASTRAN*, [AIAA](#). 2006 (2007).

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 حسین عسکری، محمد مهدی شادمان (۱۴۰۱)، شبیه‌سازی جریان گاز هگزافلوراید اورانیوم درون روتور در حالت متقارن محوری با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم، ۹۹، ۹۶-۱۰۵

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.1.11.4

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1354.html

