



شبیه‌سازی جریان گاز اطراف اسکوپ در یک روتور سانتریفیوژ با مدل دوبعدی ($r-\theta$) با استفاده از روش مستقیم مونت کارلو

ولی‌اله غضنفری^۱، علی اصغر قربانپور خمسه^۱، محمدمهدی شادمان^{۱*}، سید جابر صفدری^۱، محمد حسین عسکری^۲
۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران- ایران
۲. شرکت فن‌آوری‌های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۵۴۳۱، تهران- ایران

*Email: mshademan@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۲۷

چکیده

یکی از عوامل محرک برای ایجاد جریان محوری درون روتور سانتریفیوژ به منظور افزایش عملکرد جداسازی، اسکوپ است. با توجه به فرار گرفتن اسکوپ در معرض جریان گاز با ماخ بالا، جریان دچار شوک شده و گرادین‌های شدیدی در جریان اتفاق خواهد افتاد. در این پژوهش جریان گاز در اطراف اسکوپ در حالت دوبعدی ($r-\theta$) به روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو (DSMC) با استفاده از حل‌گر dsmcFoam در فواصل مختلف اسکوپ از دیواره شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش فاصله اسکوپ از دیواره روتور و کاهش زاویه برخورد جریان گاز با اسکوپ، سبب کاهش بیشینه دما و نیروی درگ می‌شود. به‌عنوان نمونه برای روتوری با شعاع ۱۰۰ میلی‌متر که جریان کنار دیواره آن به ماخ ۶/۵ می‌رسد افزایش فاصله اسکوپ از دیواره به میزان ۳۱ درصد (از ۸ به ۱۰/۵ میلی‌متر) به ازای فشار دیواره ۳۸۰۰ پاسکال در زاویه برخورد ۸۵ درجه، سبب کاهش بیشینه دما به میزان ۱/۳ درصد (از ۵۹۶ به ۵۸۸ کلوین) و کاهش نیروی درگ به میزان ۴۹/۴ درصد (۲۴۱۲ به ۱۲۲۱ دین) می‌شود. کاهش زاویه برخورد گاز با اسکوپ به میزان ۱۱/۸ درصد (از ۸۵ درجه به ۷۵ درجه) به ازای فشار دیواره ۳۸۰۰ پاسکال در فاصله اسکوپ از دیواره برابر با ۱۰/۵ میلی‌متر سبب کاهش بیشینه دما به میزان ۶/۸ درصد (از ۵۸۸ به ۵۴۸ کلوین) و کاهش نیروی درگ به میزان ۵۰/۳ درصد (۱۵۵۲ به ۷۷۱ دین) می‌شود.

کلیدواژه‌ها: روتور سانتریفیوژ، اسکوپ، شبیه‌سازی، روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو، حل‌گر

Simulation of gas flow around the scoop in a two-dimensional ($r-\theta$) centrifugal rotor using the direct Monte Carlo method

V. Ghazanfari¹, A.A. Ghorbanpour Khamseh¹, M. Shademan^{1*}, J. Safdari¹, M.H. Askari²

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box:11365-8486, Tehran-Iran
2. Advanced Technologies Company of Iran, AEOI, P.O. Box: 14399-55431, Tehran - Iran

Research Article

Received 15.6.2021, Accepted 18.9.2021

Abstract

One of the driving factors for creating axial flow inside the gas centrifuge rotor to increase the separation performance is the scoop. Due to the exposure of the scoop to the high Mach gas flow, the flow will be shocked, and strong gradients will occur in the flow. In this research, the gas flow around the scoop in a two-dimensional state ($r-\theta$) is simulated by the Direct Simulation Monte Carlo method (DSMC) using the dsmcFoam solver at different distances of the scoop from the rotor wall. The results show that increasing the distance of the scoop from the rotor wall and decreasing the contact angle of the gas flow with the scoop reduces the maximum temperature and drag force. For instance, increasing the distance of the scoop from the wall by 31% (from 8 to 10.5 mm) in 3800 Pa wall pressure and 85° contact angle, causing a maximum temperature decrease of 1.3% (from 596 to 588 K) and also the drag force is reduced by 49.4% (2412 to 1221 dyn). Furthermore, reducing the angle of the gas flow with the scoop by 11.8% (from 85° to 75°) in 3800 Pa wall pressure and at the distance of the scoop from the wall equal to 10.5 mm causes a maximum temperature decrease of 6.8% (from 588 To 548 K) and the drag force is reduced by 50.3% (1552 to 771 dyn).

Keywords: Centrifuge rotor, Scoop, Simulation, Direct Simulation Monte Carlo method, Solver, dsmcFoam



۱. مقدمه

در نظر گرفته می‌شود بنابراین از نظر هندسی لوله اسکوپ در این مدل به صورت یک دیسک مدل می‌شود تا تغییرات در جهت زاویه‌ای صفر باشد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در حالت متقارن محوری اسکوپ به صورت یک دیسک مدل می‌شود که نسبت به حالت واقعی اختلاف دارد. برای برطرف کردن این اختلاف، نیروی درگی که به واسطه وجود اسکوپ در حالت سه بعدی در جریان ایجاد می‌شود، با نیروی برشی اعمال شده بر سطح پایین دیسک در حالت متقارن محوری معادل در نظر گرفته می‌شود [۴].

$$F_D = F_{\tau_w} \quad (1)$$

نیروی درگ در حالت واقعی به دلیل اختلاف فشاری است که به واسطه وجود اسکوپ در مقابل جریان ایجاد می‌شود. برای اعمال اثر نیروی درگ ناشی از برخورد جریان با اسکوپ، سرعت زاویه‌ای متناسب با همان نیروی درگ در حالت متقارن محوری به دیسک اعمال می‌گردد تا سرعت زاویه‌ای تعیین شده، اختلاف بین نیروی درگ دیسک و حالت واقعی اسکوپ را جبران نماید [۵].

با توجه به سرعت دورانی بالای روتور سانتریفیوژ و ایجاد جریان‌های مافوق صوت در کنار دیواره روتور، هنگام برخورد گاز با اسکوپ ساکن، تغییرات شدید در خصوصیات جریان به صورت شوک ایجاد می‌شود. تغییرات شدید در خصوصیات جریان باعث عدم برقراری فرض پیوستگی و عدم اعتبار معادلات ناویراستوکس در این ناحیه خواهد شد [۶]. برقراری فرض پیوستگی جریان با توجه به عدد نادسن به‌عنوان یک پارامتر شکست ارزیابی می‌گردد. عدد نادسن، عددی بدون بعد است که بر اساس طول محلی گرادیان خصوصیات جریان (دانسیته، سرعت و دما) تعریف می‌شود [۷]:

$$\text{Kn}_{\text{GLL}\Phi} = \frac{\lambda}{\Phi} |\nabla\Phi| = \lambda \times \left[\max \left(\frac{|\nabla\rho|}{\rho}, \frac{|\nabla V|}{V}, \frac{|\nabla T|}{T} \right) \right] > 0.5 \quad (2)$$

در این رابطه، T دما، ρ چگالی و V اندازه سرعت، $|\mathbf{V}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ و λ میانگین پویش آزاد محلی با استفاده از مدل VHS محاسبه می‌شود [۷، ۸]. مطابق با عدد نادسن، جریان‌ها می‌توانند بر اساس رژیم آن‌ها به رژیم جریان پیوسته ($\text{Kn} < 0.1$)، رژیم جریان لغزشی ($0.1 < \text{Kn} < 10$)، رژیم جریان گذرا ($10 < \text{Kn} < 100$) و رژیم جریان مولکول‌های آزاد ($\text{Kn} > 100$) تقسیم‌بندی شوند [۹، ۱۰].

استفاده از ماشین سانتریفیوژ در جداسازی ایزوتوپ‌ها بسیار رایج است. این امر به این دلیل است که خواص شیمیایی ایزوتوپ‌ها یکسان است و جداسازی آن‌ها بر اساس خواص شیمیایی ممکن نیست. نیروی گریز از مرکز در ماشین سانتریفیوژ باعث می‌شود ایزوتوپ با جرم مولکولی سنگین‌تر در کنار دیواره و ایزوتوپ با جرم مولکولی کم‌تر نزدیک به مرکز دوران تجمع یابد. البته برای جداسازی ایزوتوپ‌ها، علاوه بر جدایش شعاعی به جدایش محوری یا جدایش ثانویه نیز نیاز است. این جریان محوری سبب افزایش میزان جدایش (نسبت به حالتی که فقط جدایش شعاعی وجود دارد) می‌شود. بنابراین بررسی رفتار جریان محوری از اهمیت زیادی برخوردار است [۱، ۲]. بدین منظور نیاز است تا از عوامل محرک جریان استفاده شود. این عوامل شامل محرک‌های دمایی، محرک‌های مکانیکی و عامل ورود خوراک می‌باشند. عوامل محرک دمایی شامل گرادیان دمای دیواره روتور و نیز اختلاف دمای کپ‌ها با گاز درون روتور و عوامل محرک مکانیکی شامل وجود اسکوپ است [۱-۳].

با توجه به تأثیر اسکوپ به‌عنوان محرک مکانیکی برای ایجاد جریان محوری و عملکرد جداسازی، شبیه‌سازی آن از اهمیت خاصی برخوردار است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که اسکوپ به دو طریق محرک محسوب می‌شود. مورد اول، هنگامی که گاز با سر و بدنه اسکوپ برخورد می‌کند در اثر اصطکاک گاز اطراف آن گرم شده و اسکوپ همانند یک محرک دمایی عمل می‌کند. مورد دوم، وقتی گاز دوار (دارای سرعت زاویه‌ای) با اسکوپ برخورد می‌کند شوکی اتفاق می‌افتد که باعث بالا رفتن دما و فشار شده که مجدداً باعث حرکت شعاعی و محوری می‌شود [۳].

شوکی که در اثر برخورد با اسکوپ اتفاق می‌افتد به عوامل مختلفی مانند فشار، سرعت برخورد گاز با اسکوپ، هندسه اسکوپ، فاصله اسکوپ از دیواره، موجدی گاز درون روتور و ... بستگی دارد که در پژوهش حاضر با ثابت در نظر گرفتن شرایط عملیاتی درون روتور، تغییرات هندسه اسکوپ و فاصله آن از دیواره روتور بررسی شده است. فاصله یکی از مهم‌ترین پارامترها برای شبیه‌سازی جریان درون روتور سانتریفیوژ برای جداسازی ایزوتوپ‌ها تعیین نیروی درگ اسکوپ است [۱-۳].

با توجه به پیچیدگی‌های هندسی و زمان بسیار زیاد محاسباتی روتور سانتریفیوژ به صورت سه بعدی، از مدل‌های متقارن محوری استفاده می‌شود. در مدل متقارن محوری به دلیل این‌که تغییرات خصوصیات جریان در جهت زاویه‌ای صفر



۲. مدل‌سازی

در روش DSMC جریان گاز در سطح مولکولی بررسی می‌گردد و با استفاده از سرعت ذرات، خصوصیات ماکروسکوپی جریان شامل دما، فشار و سرعت به دست می‌آید. برای به دست آوردن این خصوصیات مفاهیم و اصول روش DSMC به صورت زیر شرح داده می‌شود.

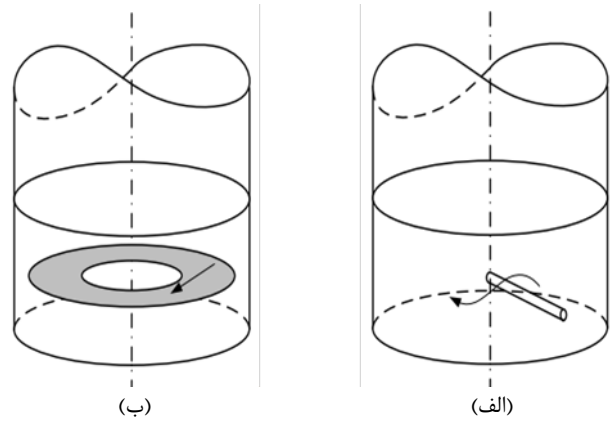
۱.۲ توصیف معادله بولتزمن

توزیع آماری در سیال به وسیله معادله بولتزمن در سال ۱۸۶۰ میلادی توسط لودویگ بولتزمن ارائه شد. در واقع معادله بولتزمن یک معادله آماری از حرکت و برخورد ذرات است که در واقعیت خصوصیات میکروسکوپی مولکول‌ها را بررسی می‌کند. به بیان دیگر انتقال ریزمقیاس حرارتی/سیالاتی در رژیم‌های کامل عدد نادسن توسط معادله بولتزمن به دست می‌آید. معادله بولتزمن تکامل یک تابع توزیع سرعت توسط انتقال مولکولی می‌باشد و برخوردهای دوتایی بین مولکولی را توصیف می‌کند. این فرض برخوردهای بین مولکولی دوتایی یک محدودیت کلیدی در ایجاد فرمول‌بندی بولتزمن است که آن را فقط برای گازهای رقیق قابل اجرا می‌سازد. این معادله، یک معادله بسیار مهم در علم فیزیک و دینامیک سیالات می‌باشد. اساس این معادله از روی دانسیته ذرات نشأت می‌گیرد و یک عامل محرکه‌ای برای توابع توزیع سرعت می‌باشد [۱۲].

تحلیل جریان‌های گاز رقیق از طریق دنبال نمودن مولکول‌ها به روش لاگرانژی می‌باشد. در واقع با بالا بودن عدد نادسن، فرض پیوستگی گاز از بین می‌رود و صحت و اعتبار معادلات ناویر استوکس مورد تأیید نمی‌باشد. معادله حاکم برای توصیف جریان گاز رقیق در سطح مولکولی، معادله بولتزمن است. در واقع، این معادله بیان‌گر نرخ تغییر تابع توزیع ذره نسبت به مکان، سرعت و زمان است به طوری که برای به دست آوردن آن هیچ‌گونه فرض پیوستگی به کار نرفته است. معادله بولتزمن به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial f}{\partial t}(\vec{r}, \vec{v}_1, t) + \vec{v}_1 \cdot \nabla r f(\vec{r}, \vec{v}_1, t) + \frac{F}{m} \nabla v f(\vec{r}, \vec{v}_1, t) = \int d^3 v_r \int d\sigma (\Omega^r) \cdot [f_1' f_r' - f f_r] |\vec{v}_r - \vec{v}_1| \quad (۳)$$

که در این رابطه، \vec{V} سرعت مولکولی، \vec{F} نیروهای خارجی بر واحد جرم، v_r سرعت نسبی مولکول‌ها نسبت به یکدیگر و σ سطح مقطع دیفرانسیلی برخورد می‌باشد. در این معادله، تابع توزیع ذره متغیر وابسته و مکان، زمان و سرعت متغیرهای



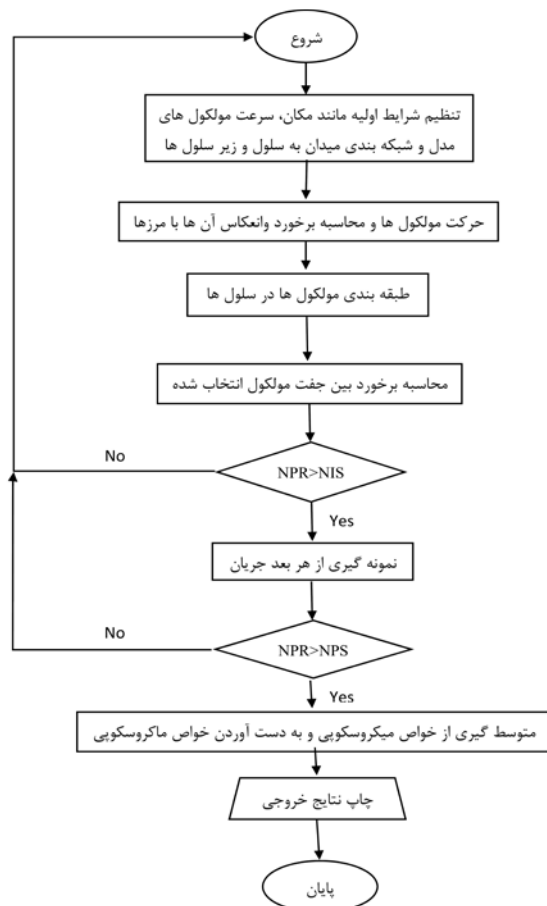
شکل ۱. حرکت جریان اطراف لوله اسکوپ در حالت واقعی (الف)، حرکت گاز در راستای دیسک افقی مدل شده در محل اسکوپ (ب) [۴].

روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو (DSMC) یکی از عملی‌ترین روش‌ها برای شبیه‌سازی جریان گازهای رقیق می‌باشد. اگرچه روش DSMC در ناحیه پیوسته معتبر است اما برای جریان‌هایی که عدد نادسن آن‌ها مقدار کمی دارد به علت زیاد شدن هزینه محاسباتی، استفاده از این روش غیرعملی می‌گردد؛ در حالت کلی، می‌توان گفت هزینه محاسباتی روش DSMC با نسبت Kn^{-4} افزایش می‌یابد [۷، ۱۱].

با توجه به شرایط حاکم بر فیزیک مسأله حاضر و وجود گرادیان‌های شدید اطراف اسکوپ ساکن، در این پژوهش از شبیه‌سازی به روش DSMC استفاده می‌شود. از سوی دیگر، در مدل‌های متقارن محوری، اثرات اسکوپ در جهت زاویه‌ای قابل مشاهده نخواهد بود [۳، ۵] و شبیه‌سازی در این حالت با فرضیاتی برای مدل کردن اسکوپ همراه خواهد بود؛ بنابراین، ضروری است اثرات اسکوپ در جهت زاویه‌ای ارزیابی می‌شود. با این وجود، برای بررسی دقیق و کامل جریان اطراف اسکوپ نیاز به شبیه‌سازی سه بعدی وجود دارد تا با در نظر گرفتن بعد Z بتوان اثر هندسه را به صورت کامل بررسی کرد. با توجه به این‌که شبیه‌سازی سه بعدی از نظر هزینه محاسباتی و پیچیدگی‌های هم‌گرایی بسیار دشوار می‌باشد بنابراین در حال حاضر از بعد Z صرفه نظر شده است.

در این پژوهش، برای اولین بار شبیه‌سازی جریان گاز اطراف یک اسکوپ در یک روتور سانتریفیوژ با مدل دوبعدی $(r-\theta)$ با استفاده از روش مستقیم مونت کارلو انجام می‌گیرد. این اسکوپ، به عنوان محرک در جریان درون روتور عمل می‌نماید، به طوری که با محاسبه نیروی درگ به دست آمده از پژوهش حاضر، می‌توان تغییرات سرعت متناظر با این نیروی درگ را در حالت متقارن محوری ایجاد کرد و شبیه‌سازی مربوط به حل جریان در حالت متقارن محوری را بهبود بخشید.





شکل ۲. الگوریتم کلی روش DSMC.

در پژوهش حاضر، با استفاده از حل‌گر dsmcFoam در نرم‌افزار OpenFOAM و مدل کروی سخت برای مدل‌سازی برخورد ذرات با یکدیگر و مدل دیفیوز برای مدل‌سازی برخورد ذرات با دیواره استفاده شد. سیستم کامپیوتری استفاده شده دارای ۶ هسته محاسباتی با پردازنده از نوع Intel با سرعت ۳٫۶ GHz می‌باشد به طوری که زمان تقریبی اجرای هر مدل برای رسیدن به هم‌گرایی ۱۴۰ ساعت است.

۳.۲ شرایط مرزی و مدل استفاده شده

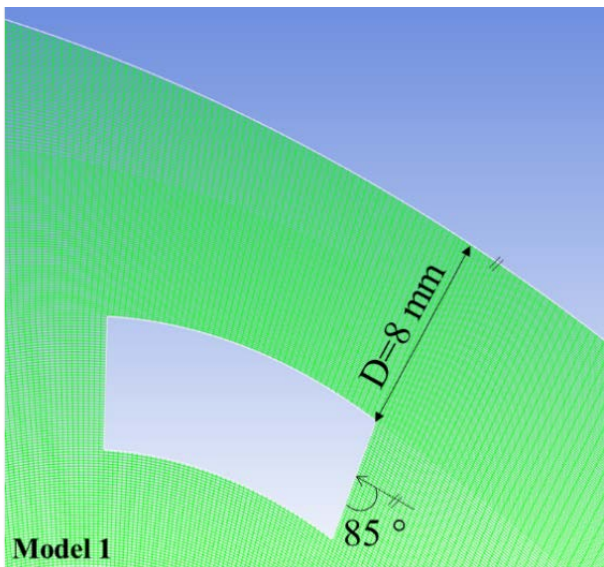
در این قسمت شبیه‌سازی جریان گاز اطراف یک اسکوپ ثابت در یک روتور سانتریفیوژ با مدل دوبعدی ($r-\theta$) با استفاده از روش مستقیم مونت‌کارلو انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است از بعد Z در شبیه‌سازی‌های حاضر صرفه‌نظر شده است. همچنین تنها قسمتی از اسکوپ که در ناحیه پر فشار قرار گرفته شبیه‌سازی شده است؛ با انجام این کار از بازگشت جریان در جهت زاویه‌ای جلوگیری شده است و قسمتی از اسکوپ که دارای بیشترین اثر بر مقدار نیروی درگ است در نظر گرفته شده است.

مستقل هستند. در رابطه (۳) اولین عبارت نرخ تغییرات تعداد مولکول‌های نوع \bar{C}_i در فضای مسیریابی مولکولی است (مولکول‌های قبل از برخورد را می‌توان با مولکول‌های گروه \bar{C}_i و \bar{C}_i^* و مولکول‌های بعد از برخورد را با مولکول‌های گروه \bar{C}_i^* و \bar{C}_i نشان داد). عبارت دوم جابه‌جایی مولکول‌ها در میان یک حجم سیال توسط سرعت مولکولی \bar{v}_i را نشان می‌دهد. عبارت سوم جابه‌جایی مولکول‌ها با سرعت \bar{v}_i بر اثر اعمال نیروی خارجی \bar{F} را نشان می‌دهد و عبارت چهارم انتگرال برخورد دوتایی می‌باشد. عبارت $(-f_i f_j)$ برخورد مولکول‌های نوع \bar{C}_i را با مولکول‌های نوع \bar{C}_j توصیف می‌کند و به عبارت «اتلاف» شناخته می‌شود (که مولکول‌های نوع \bar{C}_i^* و \bar{C}_j^* را ایجاد می‌کنند) و به‌طور مشابه، در برخورد معکوس مولکول‌های نوع \bar{C}_i^* با مولکول‌های نوع \bar{C}_j^* برخورد کرده و مولکول‌های نوع \bar{C}_i و \bar{C}_j را ایجاد می‌کند که با $(f_i f_j)$ نمایش داده می‌شود و به عبارت «بهره» شناخته شده است. مشکلات معادله بولتزمن به‌دلیل غیرخطی بودن و پیچیدگی عبارت‌های انتگرال برخورد و چندبعدی بودن معادله (X, V, t) بروز پیدا می‌کند. روش‌های عددی اخیر که معمولاً پیچیده می‌باشند برای هندسه‌های ساده از قبیل لوله‌ها و کانال‌ها اعمال می‌گردند. روش‌های عددی گوناگونی برای حل معادله بولتزمن ارائه شده‌اند که همگی به دنبال پیدا کردن جمله مناسبی برای مدل کردن جمله برخورد هستند. جدیدترین روش حل عددی به‌کار رفته، روش DSMC می‌باشد که بر اساس اصل جداسازی برخورد و حرکت مولکول‌ها در یک بازه زمانی کوچک‌تر از متوسط زمان برخورد مولکول‌ها، معادله بولتزمن را شبیه‌سازی می‌کند [۱۳].

۲.۲ روش حل DSMC

روش شبیه‌سازی مستقیم مونت‌کارلو اولین بار توسط برد [۱۴] ارائه شد. این روش برای مدل‌سازی جریان‌های گاز رقیق می‌باشد و بر اساس شبیه‌سازی مستقیم فیزیکی عمل می‌کند. در این روش برخورد بین مولکولی و حرکت مولکول‌ها در یک بازه زمانی از هم جدا شده به طوری که این بازه زمانی باید کوچک‌تر از متوسط زمان برخورد مولکول‌ها باشد. سرعت، مختصات مکانی و انرژی درونی هر یک از مولکول‌ها در کامپیوتر ذخیره می‌شود و با حرکت مولکول‌ها در طی زمان عوض می‌شود. در این روش تعداد زیادی از مولکول‌های مدل به‌منظور شبیه‌سازی مولکول‌های واقعی به‌کار می‌روند که تعداد آن‌ها به مراتب کم‌تر از مولکول‌های واقعی است؛ بنابراین هر مولکول مدل، بیان‌گر تعداد زیادی از مولکول‌های واقعی است [۱۵]. الگوریتم کلی استفاده شده برای یک مدل‌سازی مولکولی با روش DSMC به‌صورت شکل ۲ می‌باشد.





شکل ۴. شبکه‌بندی اطراف اسکوپ در مدل اول.

۳. بحث و نتایج

در حال حاضر برای روتوری که جریان کنار دیواره آن به ماخ $Ma = 6.5$ می‌رسد شبیه‌سازی جریان گاز اطراف اسکوپ با استفاده از روش DSMC انجام شده است. به منظور بررسی تأثیر اسکوپ بر جریان، چهار مدل با فواصل مختلف سر اسکوپ از دیواره و هم‌چنین در سه فشار دیواره مختلف ارزیابی شده است. فواصل در نظر گرفته شده اسکوپ از دیواره، برابر ۸، ۹/۵ و ۱۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ زیر کانتورهای فشار و دما در چهار مدل مختلف به‌ازای شرایط عملیاتی یکسان (فشار دیواره برابر با ۲۲۰۰ پاسکال) ارائه شده است.

در شکل‌های ۵ و ۶ خصوصیات جریان مانند دما و فشار به ازای فشار دیواره ۲۲۰۰ پاسکال در نواحی اطراف اسکوپ قابل مشاهده می‌باشد. مشخص گردید بیشینه دمای جریان گاز اطراف اسکوپ در مدل اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب برابر با ۶۸۲، ۶۳۱، ۶۴۳ و ۵۹۱ کلوین به دست آمده است.

در مدل‌سازی حاضر فرض شده است جریان گاز از دهانه اسکوپ خارج نمی‌شود یعنی دهانه اسکوپ بسته بوده که در این حالت باعث ایجاد بیش‌ترین نیروی درگ ممکن می‌شود. هم‌چنین در این حالت، بیش‌ترین افزایش دمای ممکن اطراف اسکوپ رخ می‌دهد؛ در حالی که در حالت واقعی ممکن است دمای جریان اطراف اسکوپ به مقادیر بیشینه به دست آمده نرسد. هم‌چنین، توزیع فشار به دست آمده ناشی از برخورد جریان گاز با اسکوپ در مدل‌های مختلف قابل مشاهده است.

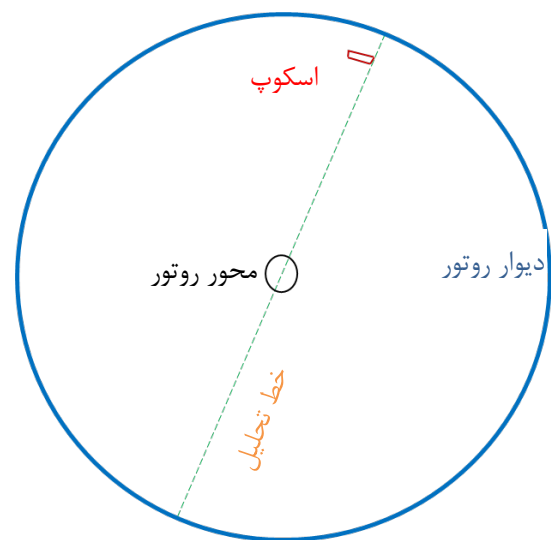
در این شبیه‌سازی برای ترسیم هندسه و شبکه‌بندی از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده است. در شکل ۳ طرح‌واره‌ای از اسکوپ و مرزهای آن در روتور سانتریفیوژ در حالت دوبعدی نشان داده شده است. خط تحلیلی به‌عنوان یک خط فرضی به منظور تحلیل نتایج استفاده خواهد شد.

مدل‌های در نظر گرفته شده در کار حاضر، استوانه‌ای به شعاع ۱۰۰ میلی‌متر است به‌طوری‌که فاصله اسکوپ از دیواره در مدل اول برابر ۸ میلی‌متر با زاویه ۸۵ درجه، در مدل دوم برابر ۹/۵ میلی‌متر با زاویه ۸۵ درجه، در مدل سوم برابر ۱۰/۵ میلی‌متر با زاویه ۷۵ درجه و در مدل چهارم برابر ۱۰/۵ میلی‌متر با زاویه ۷۵ درجه در نظر گرفته شده است. شبکه‌بندی هندسه مدل اول در شکل ۴ ارائه شده است.

در شبکه‌بندی مسأله حاضر از شبکه ساختار یافته استفاده شده است. تعداد سلول‌های شبکه برابر با ۲۰۰ هزار سلول می‌باشد به‌طوری‌که ابعاد سلول‌ها از میانگین طول پویس آزاد مولکول‌ها کوچک‌تر در نظر گرفته شده است به طوری‌که ابعاد سلول‌ها در حد میکرومتر می‌باشد ($\lambda/3 < \text{سایز سلول}$). ضخامت شبکه در بعد Z ، 10^{-5} متر در نظر گرفته شده است.

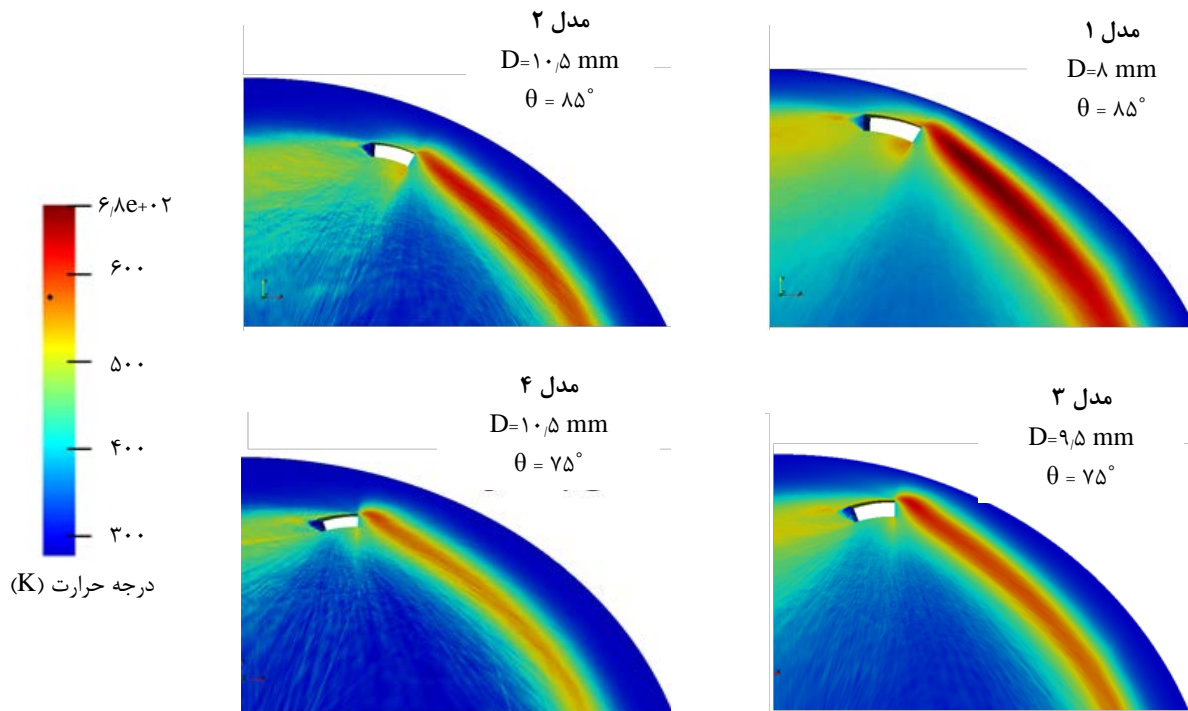
گام زمانی شبیه‌سازی در مقایسه با میانگین زمان برخورد ذرات کوچک‌تر در نظر گرفته شده است و مقدار آن در حد میکروثانیه می‌باشد ($\Delta t < \tau/3$).

با تنظیم شرایط مذکور تعداد ذرات شبیه‌سازی برابر با یک میلیون ذره در نظر گرفته شده است. با توجه به افزایش فشار دیواره، به همان نسبت تعداد ذرات شبیه‌سازی افزایش خواهد یافت.

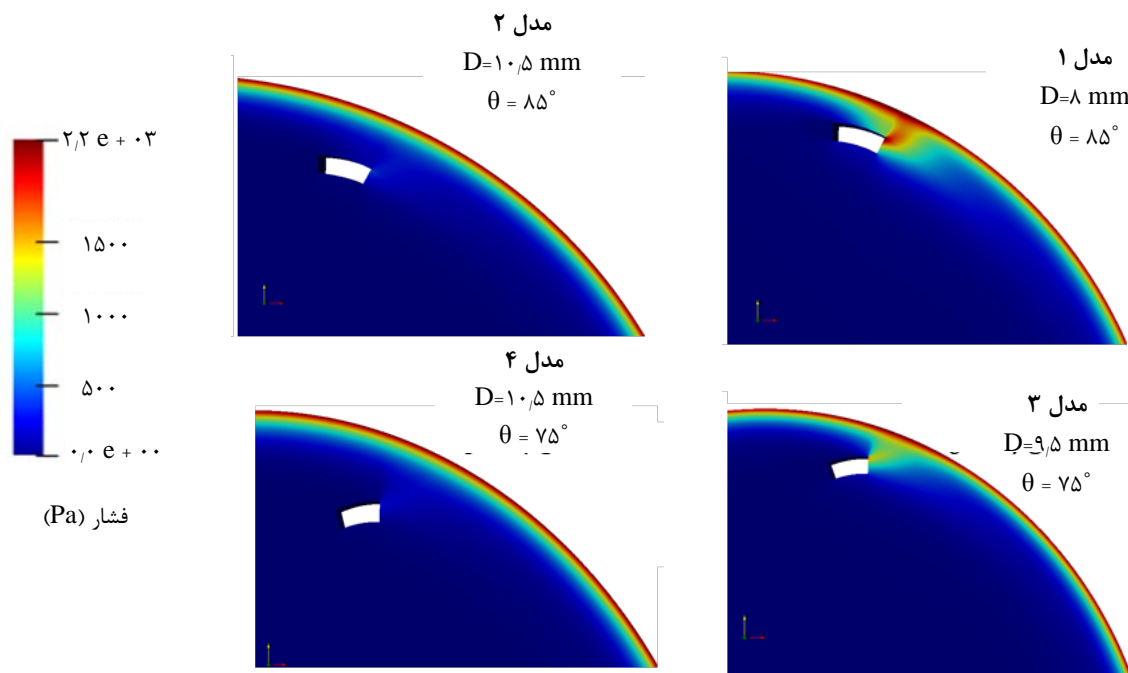


شکل ۳. طرح‌واره‌ای از هندسه و مرزهای اسکوپ در مدل دوبعدی ($r-\theta$).





شکل ۵. کانتور دما برای چهار هندسه متفاوت به ازای فشار دیواره ۲۲۰۰ پاسکال.



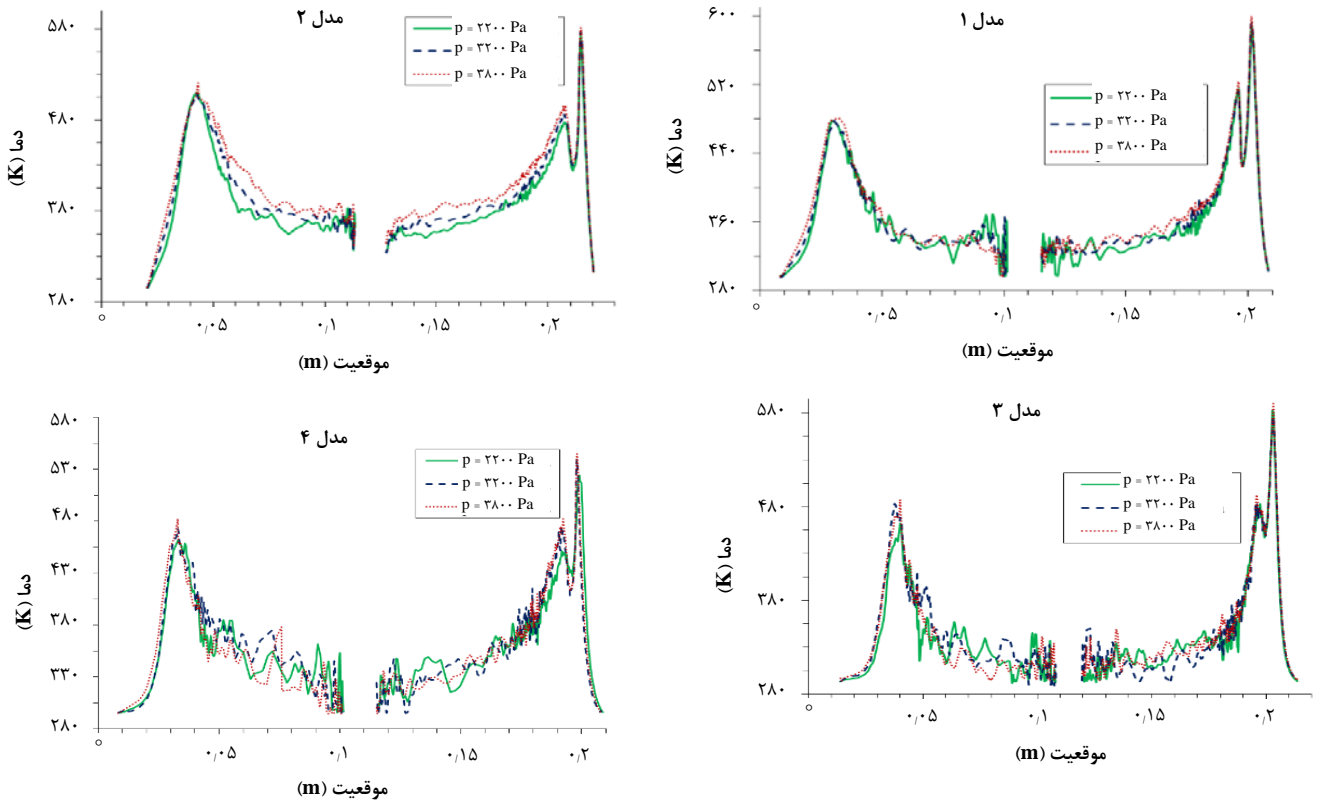
شکل ۶. کانتور فشار برای چهار هندسه متفاوت به ازای فشار دیواره ۲۲۰۰ پاسکال.

برخورد گاز با اسکوپ عامل مهمی برای تغییر خصوصیات جریان می‌باشد به طوری که با تغییر زاویه از ۸۵ به ۷۵ تغییرات خصوصیات جریان کم‌تر شده است.

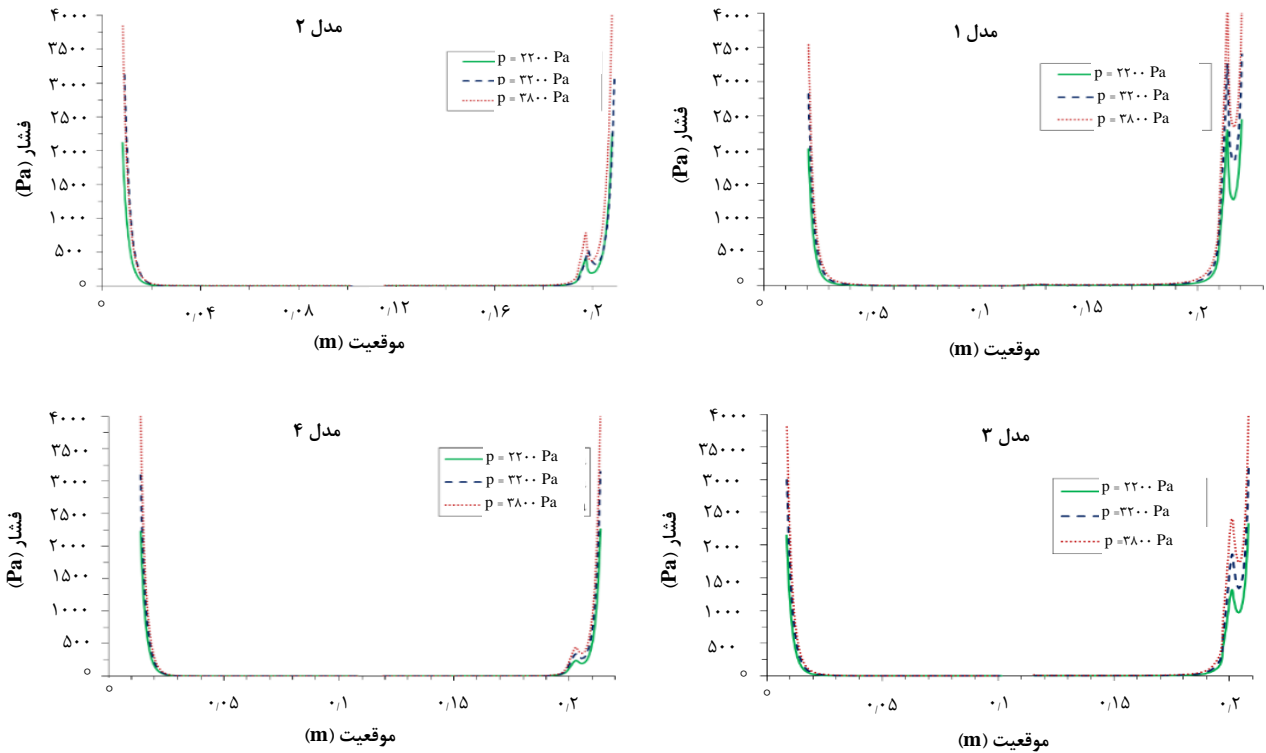
در شکل‌های ۷ و ۸ نمودارهای مربوط به خصوصیات جریان شامل دما و فشار در ۴ مدل مختلف به‌ازای سه فشار دیواره ۲۲۰۰، ۳۲۰۰ و ۳۸۰۰ پاسکال در راستای خط تحلیلی (Analysis Line) ترسیم شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد در مدل اول که فاصله اسکوپ از دیواره نسبت به سایر مدل‌ها کم‌تر است جریان گاز به‌شدت تحت تأثیر برخورد گاز با اسکوپ قرار گرفته است و تغییرات دما و فشار شدیدتر می‌باشد. هم‌چنین با مقایسه مدل سوم و چهارم روند کاهش تغییرات خصوصیات جریان با افزایش فاصله اسکوپ از دیواره اثبات می‌گردد. با مقایسه مدل دوم و چهارم مشخص گردید که علاوه بر فاصله اسکوپ از دیواره، زاویه





شکل ۷. تغییرات دما برای چهار مدل در فشار دیواره‌های مختلف در راستای خط تحلیلی.

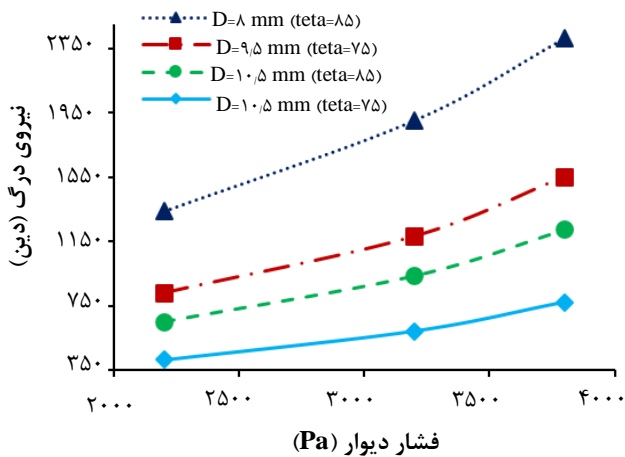


شکل ۸. تغییرات فشار برای چهار مدل در فشار دیواره‌های مختلف در راستای خط تحلیلی.



شکل ۹، نیروی درگ به دست آمده از برخورد جریان با اسکوپ در حالت‌های مختلف فشار دیواره (۲۲۰۰، ۳۲۰۰ و ۳۸۰۰ پاسکال) و به ازای چهار مدل مختلف ارائه شده است. مقدار نیروی درگ از رابطه $F_D = \frac{1}{2} \rho C_D v_{\theta}^2 r$ به دست می‌آید به طوری که C_D ضریب درگ می‌باشد و مقدار آن وابسته به هندسه اسکوپ و ماخ جریان است.

با مشاهده نتایج فوق، مشخص گردید که با افزایش فشار دیواره، نیروی درگ افزایش یافته و هم‌چنین با افزایش فاصله اسکوپ از دیواره نیروی درگ کاهش یافته است. هم‌چنین تأثیر زاویه برخورد جریان گاز با اسکوپ در مقادیر به دست آمده برای نیروی درگ قابل توجه خواهد بود. با توجه به مقادیر به دست آمده بیشینه مقدار نیروی درگ ایجاد شده مربوط به مدل اول در فشار دیواره ۳۸۰۰ پاسکال ایجاد شده و مقدار آن برابر با ۲۴۱۲ دین می‌باشد. هم‌چنین کم‌ترین مقدار نیروی درگ مربوط به مدل چهارم و به ازای فشار دیواره ۲۲۰۰ پاسکال ایجاد شده و مقدار آن برابر با ۴۱۴ دین می‌باشد.



شکل ۹. تغییرات نیروی درگ به ازای فشار دیواره‌های مختلف.

۴. نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی، شبیه‌سازی جریان گاز اطراف یک اسکوپ ثابت در یک روتور سانتریفیوژ با مدل دوبعدی $(r-\theta)$ با استفاده از روش مستقیم مونت کارلو انجام گرفت. در روش DSMC هیچ فرض ساده‌کننده‌ای وجود ندارد و جریان گاز اطراف اسکوپ با استفاده از روش مستقیم مونت کارلو تحلیل می‌گردد. علاوه بر این با توجه به گرادیان‌های شدید خصوصیات جریان در اطراف اسکوپ و عدم پیوستگی جریان در این ناحیه، یکی از دقیق‌ترین روش‌های قابل استفاده، روش DSMC می‌باشد که از قابلیت‌های بالایی برای تحلیل جریان در این رژیم جریان برخوردار است.

با توجه به نمودارهای مربوط به تغییرات فشار و دما در چهار مدل در نظر گرفته شده و ترسیم خصوصیات جریان در امتداد خط L (در راستای سر اسکوپ در هر هندسه)، تمامی نمودارهای مربوط به توزیع خصوصیات جریان به علت وجود اسکوپ از حالت تقارن خارج شده‌اند؛ به عبارت دیگر، سمت راست نمودارها در موقعیت 0.2 متر، به علت برخورد جریان با اسکوپ دچار تغییرات شدیدی در خصوصیات جریان شده است. با مقایسه تمامی نمودارها با یک‌دیگر قابل مشاهده است که هنگامی که سر اسکوپ با دیواره فاصله کم‌تری دارد اثر تغییرات فشار دیواره، بیش‌تر از حالتی است که سر اسکوپ از دیواره فاصله بیش‌تری دارد.

علاوه بر این، با توجه به برخورد جریان در حال چرخش با اسکوپ ساکن و ایجاد شدن شوک در جلوی اسکوپ، در این ناحیه فشار و دما افزایش یافته است.

مطابق شکل‌های بالا، مشخص گردید بیشینه دمای جریان گاز در راستای خط تحلیلی برای چهار مدل، در فشار دیواره برابر با ۳۸۰۰ پاسکال اتفاق می‌افتد و مقادیر بیشینه دما به ترتیب برابر ۵۹۶، ۵۸۱، ۵۸۸ و ۵۴۸ کلوین به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش فشار دیواره، دمای بیشینه کاهش یافته است. علاوه بر این مشخص گردید بیشینه فشار جریان گاز به علت برخورد گاز با سر اسکوپ در راستای خط تحلیلی برای چهار مدل مربوط به فشار دیواره برابر با ۳۸۰۰ پاسکال می‌باشد و مقادیر بیشینه فشار (به جز فشار دیواره) در راستای خط تحلیلی به ترتیب برابر ۴۰۰۰، ۷۸۰، ۲۴۰۰ و ۴۰۰ پاسکال به دست آمده است و با کاهش فشار دیواره، فشار بیشینه کاهش یافته است.

این نکته قابل ذکر است با توجه به ترسیم نمودارها در امتداد خط L ، لزوماً بیشینه دما یا فشار ایجاد شده در اطراف اسکوپ، در امتداد این خط وجود ندارد و ممکن است بیشینه این مقادیر در نقطه‌ای خارج از خط L واقع شده باشد.

برای توضیح نوسانات موجود به‌ویژه در نمودارهای مربوط به دما، به دلیل وجود ناحیه رقیق و عدم پیوستگی جریان در ناحیه مرکزی استوانه، این نوسانات ایجاد می‌شود. برای کاهش این نوسانات می‌توان از شبکه‌بندی ریزتر و یا تعداد ذرات شبیه‌سازی بیش‌تری استفاده کرد که این کار منجر به افزایش هزینه محاسباتی می‌گردد. با توجه به کار تحقیقاتی حاضر که هدف بررسی جریان اطراف اسکوپ می‌باشد و در این ناحیه خصوصیات جریان بدون نوسان قابل مشاهده است، بنابراین نیاز به استفاده از شبکه‌بندی ریزتر وجود ندارد.



موجودی گاز، گرادیان دمای دیواره و نیروی درگ اسکوپ پسماند تعیین می‌شود؛ سپس برای رسیدن به مقدار نیروی درگ تعیین شده نیاز است اسکویی در حالت سه بعدی طراحی شود تا آن مقدار نیروی درگ مورد نیاز را تأمین نماید. با توجه به هزینه محاسباتی بسیار زیاد برای شبیه‌سازی در حالت سه بعدی اسکوپ، پژوهش حاضر مدل‌هایی با هزینه محاسباتی کم‌تر ارائه کرد که در آن مدل‌ها می‌توان نیروی درگ ایجاد شده به وسیله اسکوپ‌های مختلف را تعیین نمود.

مراجع

1. M. Benedict, T.H. Pigford, H.W. Levi, *Nuclear Chemical Engineering*, 2nd ed., McGraw-Hill, (1981).
2. D.R. Olander, *The theory of uranium enrichment by the gas centrifuge*, *Progress in Nuclear Energy*, **8**, 1-33 (1981).
3. V.D. Borman, et al, *The computer simulation of 3-d gas dynamics in a gas*, *Journal of Physics*, 751-760, (2016).
4. Y.N. Zhang, et al, *On the scoop heating effect of a gas centrifuge in numerical simulation*, *Journal of Physics, Conference Series*, (2018).
5. P. Omnes, *Numerical and physical comparisons of two models of a gas centrifuge*, *Computers & Fluids*, **36**, 1028–1039 (2007).
6. A. Bhagat, H. Gijare, N. Dongari, *Modeling of knudsen layer effects in the micro-scale backward-facing step in the slip flow regime*, *Micromachines*, **10**, 118-133, (2019).
7. M. Darbandi, E. Roohi, *Applying a hybrid DSMC/Navier–Stokes frame to explore the effect of splitter catalyst plates in micro/nanopropulsion systems*, *Sensors and Actuators A: Physical*, **189**, 409-419 (2013).
8. C. White, et al, *DsmcFoam+: An OpenFOAM based direct simulation Monte Carlo*, *Computer Physics Communications*, **224**, 22-43 (2018).
9. G.A. Bird, *Molecular Gas Dynamics*, London: Oxford University Press (1976).
10. H. Ya-Ling, T. Wen-Quan, *Multiscale Simulation of heat transfer and fluid flow problem*, *Journal of Heat Transfer*, **134**, 3 (2012).
11. K. Farber, *Development and validation of a coupled Navier–Stokes/DSMC simulation for rarefied gas flow in the production process for OLEDs*, *Applied Mathematics and Computation*, **272**, 648-656 (2016).

هندسه‌های در نظر گرفته شده شامل چهار هندسه با فاصله‌های مختلف از دیواره روتور و زاویه‌های متفاوت برخورد جریان با آن می‌باشد. برای بررسی توزیع خصوصیات جریان اطراف اسکوپ، شبیه‌سازی برای هر هندسه به‌ازای سه فشار دیواره ۲۲۰۰، ۳۲۰۰ و ۳۸۰۰ پاسکال در نظر گرفته شد و توزیع فشار و دما به دست آمد. با مقایسه نتایج مشخص گردید که هر چه فاصله اسکوپ به دیواره روتور کم‌تر باشد تغییرات خصوصیات جریان شدیدتر می‌باشد. به‌عنوان نمونه به ازای فشار دیواره ثابت ۳۸۰۰ پاسکال، برای حالتی که زاویه برخورد گاز با اسکوپ برابر ۸۵ درجه و فاصله اسکوپ از دیواره برابر با ۸ و ۱۰/۵ میلی‌متر باشد، مقادیر بیشینه دما به ترتیب برابر ۵۹۶ و ۵۸۸ کلین و برای حالتی که فاصله اسکوپ از دیواره برابر ۱۰/۵ میلی‌متر و زاویه برخورد از ۸۵ درجه به ۷۵ درجه تغییر یابد بیشینه دما از ۵۸۸ به ۵۴۸ کلین رسیده است. هم‌چنین در حالتی که زاویه برخورد گاز با اسکوپ ثابت و برابر با ۷۵ درجه و فاصله اسکوپ از ۹/۵ میلی‌متر به ۱۰/۵ میلی‌متر تغییر یابد بیشینه دما از ۵۸۱ به ۵۴۸ کلین رسیده است. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که هم فاصله اسکوپ از دیواره روتور و هم زاویه برخورد جریان گاز با اسکوپ اهمیت دارد. برای بررسی بیش‌تر اثر فاصله اسکوپ از دیواره و زاویه برخورد گاز با اسکوپ، نیروی درگ در مدل‌های مختلف محاسبه شد. به‌عنوان نمونه به ازای فشار دیواره ثابت ۳۸۰۰ پاسکال، برای حالتی که زاویه برخورد گاز با اسکوپ برابر ۸۵ درجه و فاصله اسکوپ از دیواره برابر با ۸ و ۱۰/۵ میلی‌متر باشد، مقادیر نیروی درگ به ترتیب برابر ۲۴۱۲ و ۱۲۲۱ دین و برای حالتی که فاصله اسکوپ از دیواره برابر ۱۰/۵ میلی‌متر و زاویه برخورد از ۸۵ درجه به ۷۵ درجه تغییر یابد مقادیر نیروی درگ از ۱۲۲۱ به ۷۷۱ دین رسیده است. هم‌چنین در حالتی که زاویه برخورد گاز با اسکوپ ثابت و برابر با ۷۵ درجه و فاصله اسکوپ از ۹/۵ میلی‌متر به ۱۰/۵ میلی‌متر تغییر یابد مقدار نیروی درگ از ۱۵۵۲ به ۷۷۱ دین رسیده است. مقادیر به‌دست‌آمده نیروی درگ در مدل‌های متفاوت نشان داد که موقعیت و شکل اسکوپ تأثیر زیادی در جریان درون روتور دارد و تعیین مقدار صحیح نیروی درگ عملی در شبیه‌سازی‌های متقارن محوری با استفاده از کار حاضر میسر خواهد شد. به عبارت دیگر، در شبیه‌سازی متقارن محوری ابتدا برای رسیدن به بیشینه مقدار جداسازی در روتور سانتریفیوژ، مقادیر بهینه برای دبی خوراک، فشار دیواره،



12. S. Yousefi-Nasaba, et al, *Determination of momentum accommodation coefficients and velocity distribution function for Noble gas-polymeric surface interactions using molecular dynamics simulation*, *Applied Surface Science*, **493**, 766-778 (2019).
13. M. Khajenoori, et al, *Modeling and simulating of feed flow in a gas centrifuge using the Monte Carlo method to calculate the maximum separation power*, *Journal of Molecular Modeling*, **25**, 333 (2019).
14. G. Bird, *Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows*, *Oxford University Press*, New York: Oxford University Press (1994).
15. J. Zhang, et al, *Particle-based hybrid and multiscale methods for nonequilibrium gas flows*, *Advances in Aerodynamics*, **12**, 1-12, (2019).

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، علی‌اصغر قربانپور خمسه، محمدمهدی شادمان، سید جابر صفدری، محمد حسین عسکری (۱۴۰۲)، شبیه‌سازی جریان گاز اطراف اسکوپ در یک روتور سانتریفیوژ با مدل دوبعدی ($r-\theta$) با استفاده از روش مستقیم مونت‌کارلو، ۱۰۳، ۲۴-۳۳

DOI: 10.24200/NST.2021.898.1608

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1519.html

