پیش‌بینی تابع جریان برای محرک‌های درون ماشین سانتریفیوژ با استفاده از روش DSMC

یوسفی نسب، صادق *[(۱)]- صفدری، سید جابر[(۱)]- کریمی ثابت، جواد [(۱)]- ملاح، محمد حسن [(۱)]- امینی، الهام [(۲)]- قربانپور، علی اصغر [(۱)]- خواجه نوری، مسعود [(۲)]

[۱]سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته ای

[۲]سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت فناوری های پیشرفته ایران

چکیده

گاز درون روتور یک ماشین سانتریفیوژ به دلیل اعمال نیروی گریز از مرکز در کنار دیواره روتور چرخان متراکم می‌گردد و ناحیه چگال و مولکولی درون روتور را تشکیل می‌دهد. به دلیل حضور محرک‌های حرارتی و مکانیکی، علاوه بر جدایش شعاعی می‌توان به یک حرکت محوری و در نتیجه یک جداسازی محوری درون روتور دست یافت. محرک‌های اختلاف دمای کپ‌ها، اختلاف دمای دیواره، اسکوپ و خوراک موجب شکل گرفتن این جریان محوری می‌گردند. پیش بینی دقیق تابع جریان هر یک از آن‌ها می‌تواند باعث دستیابی به ماکزیمم مقدار جداسازی ایزوتوپی در ماشین گردد. در این مقاله با اعمال هر یک از محرک‌ها درون روتور، تابع جریان شکل گرفته با استفاده از روش شبیه سازی مستقیم مونت کارلو (DSMC) پیش بینی و بررسی می‌گردد.

کلمات کلیدی: ماشین سانتریفیوژ، DSMC، محرک‌های حرارتی و مکانیکی، تابع جریان

۱-مقدمه

دیدگاهی که همزمان با پیشرفت سیستم‌های محاسباتی توسعه پیدا کرد دیدگاه لاگرانژی از جمله روش DSMC می‌باشد که با توجه به انتخاب ذرات نماینده، توانایی شبیه‌سازی سیستم‌های با تعداد زیاد مولکول را دارا است. در واقع معادله بولتزمن به طور کلی تمامی رژیم‌های جریان را در بر می‌گیرد و معادلات ناویراستوکس نیز از آن قابل استخراج می‌باشند. ولی حل معادلات بولتزمن بسیار مشکل می‌باشد. به همین دلیل روش DSMC توسط بیرد ارائه گردید[1] . در این روش به جای حل معادلات بولتزمن، از مفهوم فیزیکی به کار رفته در استخراج معادلات بولتزمن استفاده می‌گردد. روش DSMC با انتخاب تعداد مناسب شبکه و بازه‌زمانی و همچنین تعداد ذرات شبیه سازی بالا با حل معادلات بولتزمن برابری می‌کند. اساس ایده DSMC برای جریان گاز، از طریق یک روش احتمالاتی در مکانیزم‌های برخورد می‌باشد. در روش DSMC برای یک بازه‌زمانی که کوچکتر از میانگین زمان برخورد می‌باشد، هر ذره می‌تواند با ذرات متعددی عمل برخورد را انجام دهد. در انتها کمیت‌های ماکروسکوپیک از قبیل سرعت متوسط و دما بعد از نمونه‌گیری از شبکه‌بندی‌های صورت گرفته و میانگین‌گیری از آن‌ها قابل محاسبه می‌باشند. سابارامایر نیز در سال ۱۹۷۸ به بررسی اثر هر یک از محرک‌های درون

ماشین سانتریفیوژ با استفاده از روش حل عددی معادلات بقاء پرداخت و اثر هر یک از محرک‌ها را به طور جداگانه بررسی کرد[2] . رابلین نیز در سال ۲۰۰۱ به شبیه‌سازی ناحیه مولکولی یک ماشین سانتریفیوژ با استفاده از روش DSMC پرداخت و مقادیر سرعت شعاعی و سرعت محوری در ناحیه تزریق خوراک را مورد بررسی قرار داد[3] . جی آنگ نیز در سال ۲۰۱۰ با استفاده از کوپل روش DSMC و CFD به شبیه سازی رفتار گاز در کل ماشین سانتریفیوژ پرداخت به گونه‌ای که از روش DSMC برای ناحیه رقیق و از روش CFD برای شبیه سازی جریان رفت و برگشتی کنار دیواره روتور استفاده کرد [4] . پرادهان و کوماران در سال ۲۰۱۱ به شبیه سازی کل یک ماشین سانتریفیوژ با روشDSMC و اونساگر همگن پرداختند و اثر اعمال گرادیان حرارتی ۱ درجه بر روی دیواره را با هر دو روش مورد بررسی قرار دادند و به نتایج مشابهی دست یافتند. همچنین شار جرمی محوری درون یک روتور با وجود محرک خوراک را با استفاده از روش DSMC مورد بررسی قرار دادند در حالیکه برداشت گاز فقط به صورت چاه جرمی در بالا و پایین روتور لحاظ گردید و اثر چشمه و چاه مومنتمی اسکوپ در شبیه‌سازی آن‌ها لحاظ نشد [5]. شی-زینگ در سال ۲۰۱۱ به شبیه‌سازی اثر خوراک ورودی به یک ماشین سانتریفیوژ با استفاده از روش DSMC پرداخت. او نشان داد که خوراک یک نقش اساسی برای جریان رفت و برگشتی درون یک ماشین سانتریفیوژ دارد. همچنین نشان داد که سرعت خوراک ورودی تاثیر بسزایی بر دانسیته، فشار و سرعت گاز شکل گرفته درون یک ماشین سانتریفیوژ دارد[6] . همچنین جی‌آنگ و همکارانش به شبیه سازی اثر خوراک روی میدان جریان درون یک سانتریفیوژ گازی با روش DSMC پرداختند و نشان دادند که بیشترین سرعت شعاعی در یک ماشین سانتریفیوژ مرتبط با سرعت خوراک می‌باشد و همچنین نرخ خوراک تاثیر چشمگیری روی توزیع سرعت محوری (شار جرمی محوری) درون یک ماشین سانتریفیوژ دارد[7] . در این مقاله اثر هر یک از این محرک‌ها با استفاده از روش DSMC برای مشاهده اثر بهتر گاز در ناحیه مولکولی ماشین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روش DSMC

DSMC یک روش شبیه‌سازی سیالاتی از دیدگاه لاگرانژی می‌باشد که در آن تعداد زیادی مولکول‌های شبیه‌سازی شده به طور همزمان دنبال می‌گردند و علاوه بر برخورد مولکول با سطح، روابط برخوردهای بین مولکولی نیز محاسبه می‌شوند. در این روش (پس از سلول بندی کل حجم فضای نمونه) ذرات به طور یکنواخت و احتمالاتی با استفاده از روابط زیر در محیط شبیه‌سازی قرار می‌گیرند[1]:

$$r_{x,y,z} = Random \times r_{xmax,ymax,zmax} \qquad (۱)$$

با استفاده از توزیع ماکسولین، ذرات داخل هر سلول سرعت‌های اولیه‌ای متناظر با دمای اولیه خود با استفاده از رابطه (۲) می‌گیرند:

$$v_{x,y,z} = \sqrt{RT} \times Random\ Normal \quad (۲)$$

که در رابطه فوق R ثابت جهانی گازها، $xmax, ymax, zmax$ ابعاد محیط شبیه‌سازی، T دمای اولیه گازها و $Random\ Normal$ توزیع گوسینی از تولید اعداد تصادفی می‌باشد. پس از مقداردهی اولیه موقعیت و سرعت، ذرات مسافت $v_{x,y,z}dt$ را پیشروی می‌کنند و سپس برای برخورد با یکدیگر و برخورد با دیواره‌ها بررسی می‌شوند. در مرحله برخورد ذرات با یکدیگر ذرات به صورت الاستیک و غیر الاستیک با یکدیگر برخورد می کنند و بر اساس مدل‌های مختلفی که برای برخورد ذرات با یکدیگر وجود دارد مقادیر سرعت و موقعیت ذرات بعد از برخوردشان با یکدیگر تعیین می گردد. ماکزیمم تعداد برخورد در یک سلول اگر دو نوع مولکول از نوع p و q وجود داشته باشند از رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد که به آن تکنیک NTC [۱] گفته می‌شود:[1]

$$\sigma_T = \pi \mathrm{d}_{eff}{}^2 \quad (۳)$$

$$P_{Sel} = \frac{N_P \bar{N}_q F_N \{(\sigma_T c_r)_{max}\}_{pq} \Delta t}{2V_C} \quad (۴)$$

از بین این تعداد ماکزیمم برخورد در یک بازه زمانی برای یک سلول، ذرات به شرط ارضا کردن شرط زیر با یکدیگر در داخل یک زیرسلول برخورد می‌کنند:

$$\frac{(\sigma_T c_r)}{\{(\sigma_T c_r)_{max}\}_{pq}} > Random \quad (۵)$$

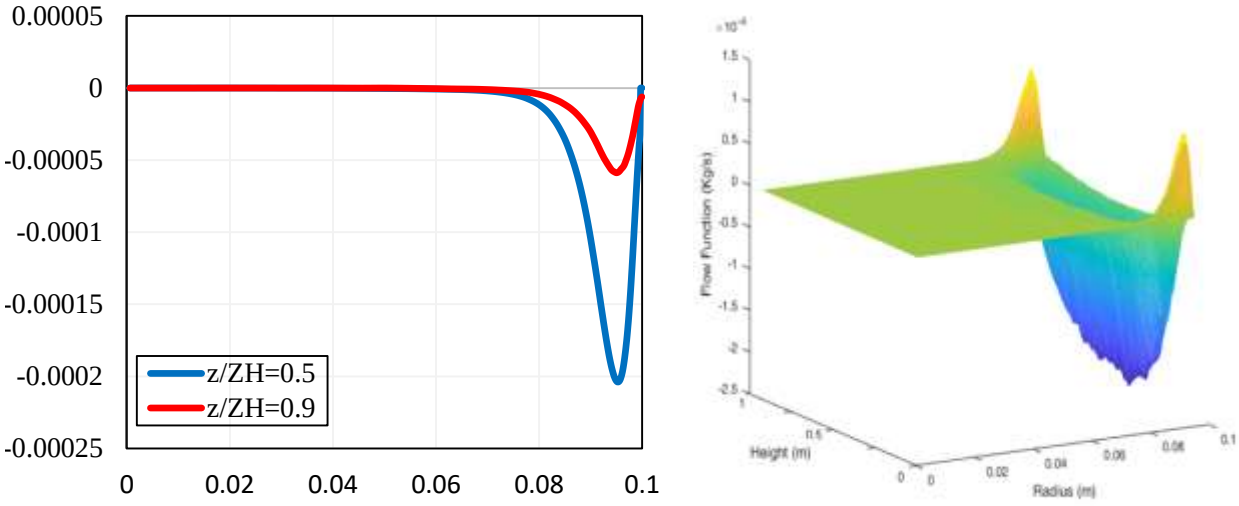
$Random$ توزیع یکنواختی از اعداد تصادفی می باشد. در مرحله انعکاس ذرات از دیواره‌ها نیز بر اساس انتخاب نوع مدل برخورد، مقادیر سرعت و موقعیت ذرات بعد از برخورد تعیین می‌گردد. بر اساس نوع مسئله و شرایط شبیه سازی شرط مرزی انتخابی نیز تغییر می‌کند. در انتها نیز بر اساس میانگین‌گیری از کمیت سرعت مولکول درون هر شبکه، کمیت های ماکروسکوپیک قابل استخراج می‌باشند. در انتها تابع جریان شکل گرفته درون روتور با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$F = \int_0^R \rho v_z r' dr' \quad (۶)$$

۳-نتایج

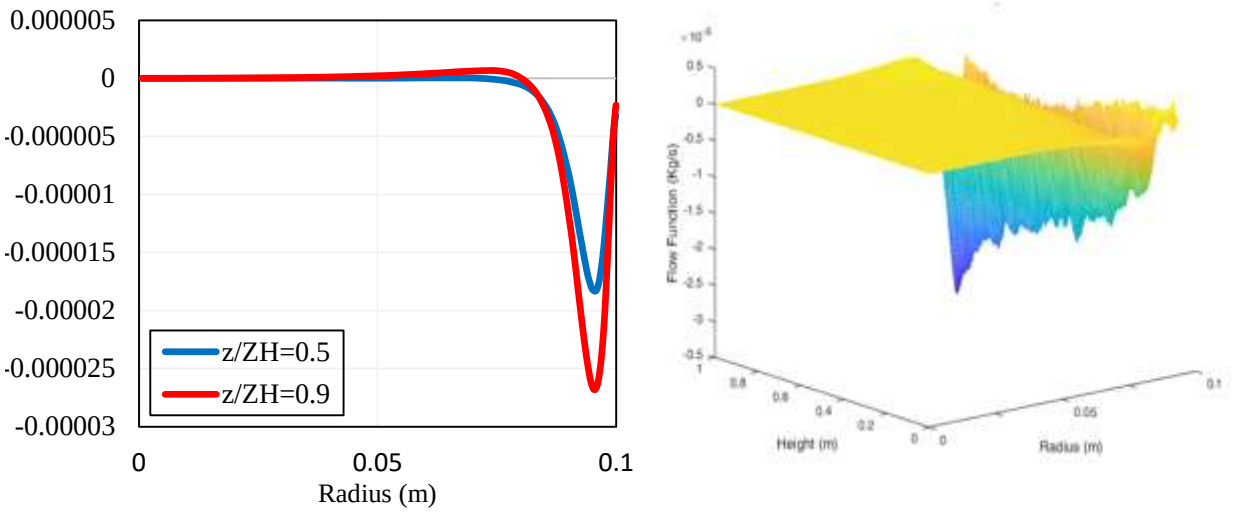
[۱] No-Time Counter

در این قسمت شبیه سازی رفتار گاز با استفاده از روش DSMC برای اعمال هر یک از محرک های درون ماشین صورت گرفته است و مقدار تابع جریان متناظر با هر یک استخراج گردیده است. در ابتدا در صورت اعمال محرک حرارتی گرادیان خطی ۲۰ درجه بر روی یک روتور با ابعاد ۲۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر انجام گرفت. در شکل (۱) کانتور تابع جریان حاصل از شبیه سازی نشان داده شده است. همانطوری که در شکل مشاهده می گردد در صورت اعمال یک گرادیان خطی ۲۰ درجه بر روی دیواره روتور ماکزیمم مقدار تابع جریان در وسط روتور شکل خواهد گرفت. عنوان افقی و عمودی تمامی شکل‌های سمت چپ به ترتیب بیانگر شعاع و تابع جریان شکل گرفته درون روتور می‌باشد.



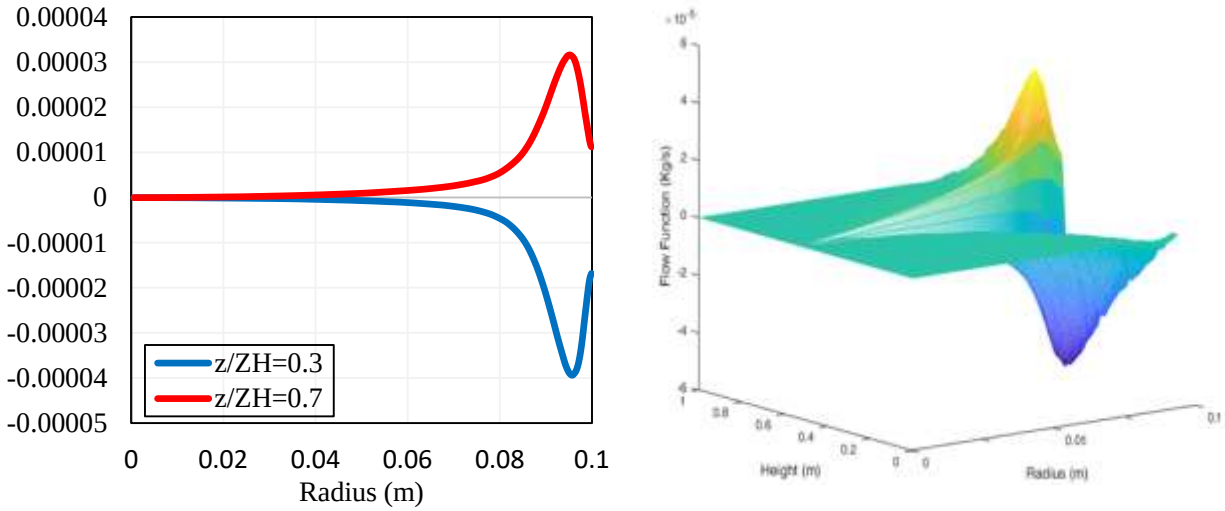
شکل ۱. تابع جریان برای اعمال گرادیان خطی روی دیواره

در صورتی که محرک گرادیان خطی بر روی دیواره حذف گردد و فقط از محرک حرارتی اختلاف دمای کپ‌ها استفاده گردد تابع جریان آن به صورت شکل (۲) می‌باشد. مقدار دمای کپ بالایی روتور برابر با ۳۲۰ و کپ پایین آن ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. همانطوری که می‌توان مشاهده کرد در صورت اعمال تنها محرک کپ به روتور، ماکزیمم تابع جریان در کنار کپ گرمتر شکل می‌گیرد و تا رسیدن به کپ سرد از مقدار آن کاسته می‌گردد.



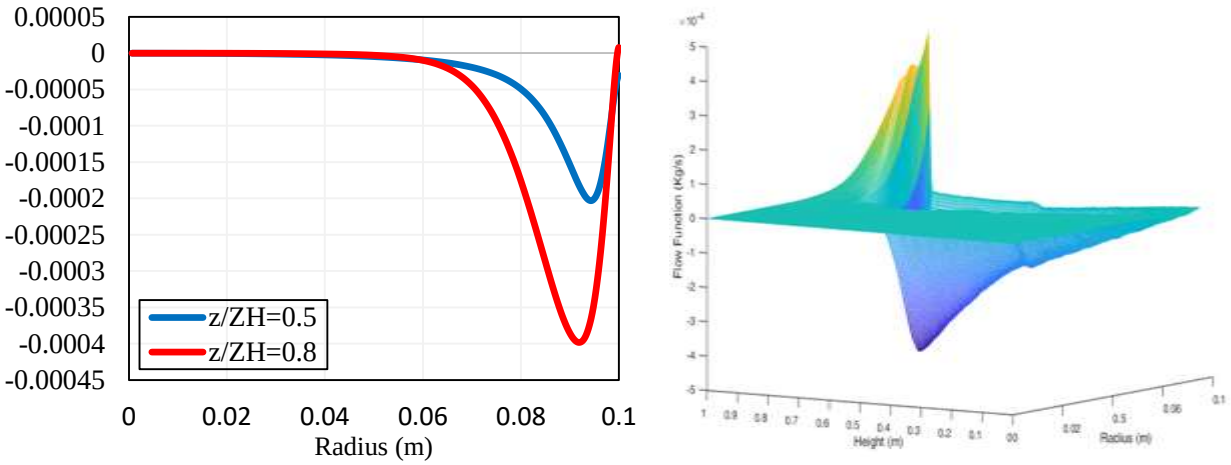
شکل ۲. تابع جریان برای اعمال اختلاف دمای کپ‌ها

محرک خوراک یکی دیگر از محرک‌های تاثیر گذار در ایجاد جریان محوری درون روتور می‌باشد. با اعمال یک خوراک درون روتور، جریان بعد از برخورد با روتور به دو ناحیه بالایی و پایینی و مختلف الجهت تبدیل می‌گردد. به عبارتی گاز پس از تزریق درون روتور، به دو جریان رفت و برگشتی متقارن و مختلف‌الجهت تقسیم می‌شود. در شکل (۳) تابع جریان به دست آمده از محرک خوراک نشان داده شده است.



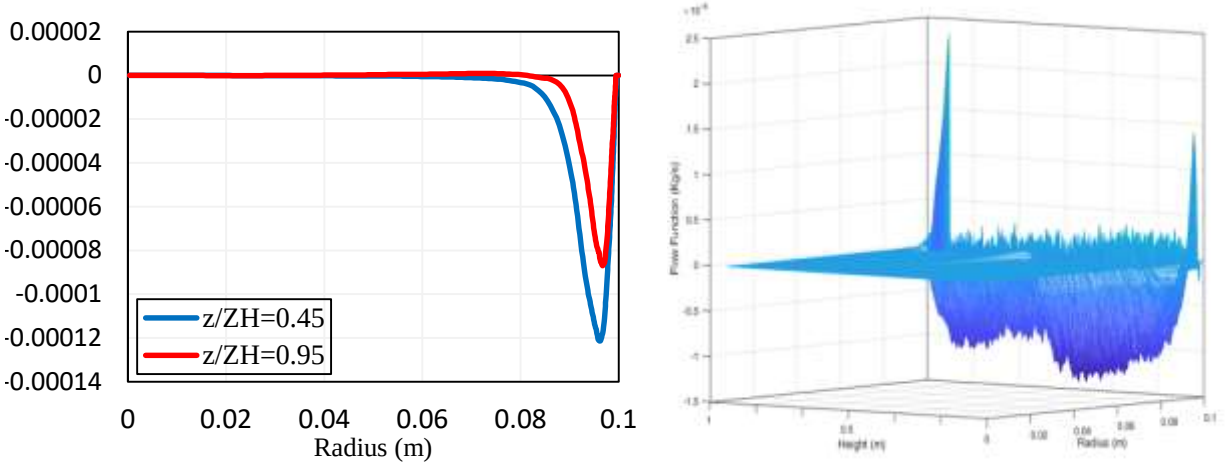
شکل ۳. تابع جریان برای اعمال محرک خوراک

محرک بعدی مورد مطالعه محرک اسکوپ می‌باشد. محرک مکانیکی اسکوپ نقش مهمی در ایجاد جریان محوری درون روتور ایفا می‌کند. به دلیل هندسه خمیده اسکوپ، برای شبیه سازی اثر دقیق آن نیاز به یک شبیه‌سازی سه بعدی می‌باشد. برای یک شبیه سازی دو بعدی از آن می‌توان با اعمال یک نیروی درگ معادل با نیروی درگ ایجاد شده توسط اسکوپ، اثر آن را بر ایجاد جریان محوری درون روتور لحاظ کرد. در شکل (٤) اثر لحاظ کردن اسکوپ در شبیه سازی نشان داده شده است. همچنین در صورت اعمال محرک مکانیکی اسکوپ، ماکزیمم تابع جریان در کنار اسکوپ شکل خواهد گرفت و دو جریان مختلف الجهت در قسمت بالا و پایین اسکوپ شکل می‌گیرد که نشان دهنده دو جریان متفاوت در قسمت بالا و پایین اسکوپ می‌باشد.



شکل ٤. تابع جریان برای اعمال محرک اسکوپ

تاکنون اثر هر یک از محرک‌ها به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (٥) اثر تمامی محرک‌ها به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. در صورتی که اثر محرک‌های حرارتی و مکانیکی به طور همزمان به شبیه سازی اعمال گردد. در این صورت به دلیل ادغام اثر هر یک از محرک ها در یکدیگر شکل‌گیری ماکزیمم تابع جریان تغییر می‌کند و در مرکز و کنار اسکوپ بیشترین مقدار را به خود می‌گیرد.



شکل ۲. تابع جریان برای اعمال تمامی محرک‌ها

٤-نتیجه‌گیری

با توجه به این که ایجاد یک جریان محوری درون روتور ماشین سانتریفیوژ برای افزایش میزان غنی‌سازی دارای اهمیت بالایی می‌باشد. در این مقاله به شبیه‌سازی اثر هر یک از محرک‌های این جریان با استفاده از روش بر پایه مولکولی DSMC پرداخته شد و تاثیر هر یک از محرک‌های حرارتی و مکانیکی بر مقدار تابع جریان شکل گرفته درون روتور مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصله از شبیه سازی، در صورت محرک حرارتی گرادیان دمایی دیواره، ماکزیمم تابع جریان در میانه‌های روتور شکل می‌گیرد. همچنین بر اساس اعمال محرک‌های حرارتی کپ گرم و اسکوپ، ماکزیمم مقدار تابع جریان در نزدیکی محرک شکل می‌گیرد. با اعمال محرک خوراک به تنهایی، جریان درون روتور به دو قسمت یکسان و مختلف الجهت تقسیم می‌گردد. در انتها با اعمال تمامی محرک‌ها بر روی ماشین به طور همزمان، ماکزیمم مقدار تابع جریان در کنار محرک مکانیکی اسکوپ و همچنین قسمت مرکزی روتور شکل خواهد گرفت.

٥- مراجع

[۱] G. Bird, The DSMC method, The University of Sydney, 2013 .

[۲] S. J.P“ ,Comput. Methods App ”,.*Mech. Eng* ,۱۵ جلد ,pp. 259-273, 1978 .

[۳] R. P و .D. F“ ,.Direct Monte Carlo simulation in a gas centrifuge ”,*InAIP Conference Proceedings* ,pp. 169-173, 2001 .

[۴] H. L., J. D.J و .Y. C.T" ,.Simulation of overall flow in gas centrifuge considering feed jet ",*INIS ,* 2010 .

[۵] P. S و .K. V" ,.The generalized Onsager model for the secondary flow in a high-speed rotating cylinder ",*Fluid Mech* ,۶۸۶ جلد ,.pp. 140-142, 2011 .

[۶] J. D و .Z. S" ,.DSMC simulation of feed jet flow in gas centrifuge ",*INIS* ,2011 .

[۷] H. L., J. D.J و .Y. C.T" ,.DSMC simulation of feed influence on a gas centrifuge flow field ",*INIS ,* 2011 .