

(علمی-پژوهشی)

شبیه‌سازی خواص آیرودینامیکی جریان گاز رقیق بر روی پنل ماهوره به روش DSMC

در این پژوهش، نحوه شبیه‌سازی جریان گاز رقیق بر روی یک صفحه تخت و محاسبه خواص آیرودینامیکی توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو یا دی اس ام سی - این فوم بررسی شده است. یکی از روش‌های کارآمد در شبیه‌سازی جریان گاز رقیق در شرایط بسیار غیرتعادلی، روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو یا دی اس ام سی می‌باشد که گاز به صورت ذره در نظر گرفته می‌شود. در این بررسی با استفاده از نرم‌افزار دی اس ام سی - این فوم نتایج حاصل از یک صفحه تخت در زاویه حمله صفر استخراج شده، با نتایج موجود اعتبارسنجی نموده که میزان خطا کمتر از ۱۵ درصد می‌باشد. در ادامه به عنوان نوآوری این پژوهش، به بررسی جریان بر روی صفحه عمودی و محاسبه نیروهای آیرودینامیکی و همچنین اثر زوایای مختلف صفحه تخت بر روی پنل ماهواره پرداخته شده است. نشان داده شده است که ضریب درگ در حالت صفحه عمودی ۱۰ برابر صفحه تخت می‌باشد. روش و نرم‌افزار معرفی شده در این پژوهش روشی قدرتمند در شبیه‌سازی‌های مختلف در شرایط گاز رقیق است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو، نرم‌افزار دی اس ام سی-این فوم، گاز رقیق، صفحه تخت، خواص آیرودینامیکی

سعید اسکندری^{۱*}، رامین ذاکری^{۱**} و
علی سررشته‌داری^{۱***}

۱- دانشکده مکانیک-هوافضا، دانشگاه صنعتی
شاهرود، شاهرود، ایران، کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱

* دانشجوی کارشناس ارشد

** استادیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

r_zakeri@shahroodut.ac.ir

*** استادیار

Simulation of Aerodynamic Properties of Rarefied Gas Flow on Satellite Panel by DSMC Method

In this research, the method of simulating the rarefied gas flow on a flat plate and calculating aerodynamic properties have been investigated using direct simulation Monte Carlo or DSMC-Open Foam Software. One of the most efficient methods for simulating rarefied gas flow in nonequilibrium conditions is the direct simulation Monte Carlo or DSMC simulation method, in which the gas is considered as a particle. In this study, using DSMC-OpenFoam software, the results obtained from a flat plate at zero angle of attack are validated with the available results, with the accuracy of less than 15% error. In the following as an innovation, the flow on the vertical plane and the calculation of aerodynamic forces as well as the effect of different angles of the flat plane on the satellite panel are investigated. It has been shown that the drag coefficient in the vertical plane mode is 10 times that of the horizon flat plane. The method and software introduced in this research is a powerful method for various simulations of drag on satellites under rarefied gas condition.

Keywords: Direct Simulation Monte Carlo, DSMC Software-Open Foam, Rarefied Gas, Flat Plate, Aerodynamic Properties

S. Eskandari^{1*}, R. Zakeri^{1**} and A.
Sarreshtedari^{1***}

1- Department of Mechanical and
Aerospace, Engineering, Shahrood
University of Technology, Postal
Code: 361995161, Shahrood, IRAN

* M.Sc. Student

** Assistant Professor (Corresponding
Author): Email:

r_zakeri@shahroodut.ac.ir

*** Assistant Professor

۱- فهرست علائم و اختصارات

c	سرعت مولکولی
c_r	سرعت نسبی مولکولی
F	نیروی خارجی در واحد جرم
f	تابع توزیع سرعت کلاس C
f_I	تابع توزیع سرعت کلاس C1
f^*	تابع توزیع سرعت پس از برخورد کلاس C
f_1^*	تابع توزیع سرعت پس از برخورد کلاس C1
n	مقدار چگالی
r	برداری فضای فیزیکی
t	زمان
$\sigma d\Omega$	سطح مقطع دیفرانسیلی
dc_1	تغییرات سرعت مولکولی کلاس C1
Direct Simulation Monte Carlo	شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو
Variable Hard Sphere	کره سخت متغییر

۲- مقدمه

یکی از چالش‌های موجود در طراحی و ساخت ماهواره و میکروماهواره‌ها، نحوه محاسبه نیروی پسا در شرایط گاز رقیق است. در چنین پدیده‌هایی، برخورد بین مولکولی تعیین کننده رفتار ماکروسکوپی کمیت‌های اصلی گاز می‌باشد و برای شبیه‌سازی آنها نیاز به روشی متفاوت نسبت به روش‌های کلاسیک می‌باشد. روش‌های کلاسیک همانند معادلات ناویر-استوکس با فرض پیوستگی سیال به دست آمده و در محیط رقیق یا غیرتعادلی برقرار نیستند. جهت برطرف شدن فرض نادرست پیوستگی سیال در شرایط گاز رقیق و غیرتعادلی، در روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو برخلاف روش‌های مرسوم سیالات مبنی برحل معادلات اویلر یا ناویر استوکس، حلی سازگار با معادلات بولتزمن (در دو گام مستقل شامل حرکت ذرات و برخورد ذرات) ارائه شده است [۱-۲]. این عدم پیوستگی با عدد نادسن بیان می‌شود که نسبت مسیر آزاد مولکول‌ها به شاخص طولی می‌باشد. برای رژیم‌های جریان تقسیم‌بندی‌های مختلفی بر مبنای عدد نادسن ارائه شده است که بر اساس یکی از رایج‌ترین آنها عدد نادسن پایین یا کمتر از ۰/۱ به عنوان رژیم جریان پیوسته، مابین ۰/۱ و ۱۰ رژیم گذرا و نهایتاً بالاتر از این مقدار رژیم جریان

آزاد مولکولی نامیده می‌شود. در ارتفاعات بالا چگالی کم است به طوری که در مولکول‌ها و اتم‌های جریان اطراف ماهواره برخورد بسیار کمی وجود دارد. این رژیم جریان رقیق است که می‌تواند با استفاده از روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو محاسبه شود و در همگرایی با راه‌حل‌های معادله بولتزمن است [۳].

روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو یک روش مبتنی بر ذرات تصادفی برای شبیه‌سازی مشکلات جریان گاز رقیق است. این روش توسط بیرد^۲ در دهه ۱۹۶۰ آغاز شد و از آن زمان به یکی از روش‌های پذیرفته شده برای حل جریان‌های گاز در رژیم عددی ناتعادلی نادن تبدیل شده است [۴]. تجزیه و تحلیل نیروهای آیرودینامیکی قسمت‌های ارتفاع زیاد از یک مسیر ورود مافوق صوت به طور معمول با استفاده از روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو انجام می‌شود. از جمله اعتبارسنجی اجسام بازگشتی می‌توان به تحقیقات بوید اشاره نمود که نتایج حاصل از کد عددی با نتایج موجود از پرتاب فضاپیماهای مرکوری، جمینی و آپولو آورده شده است [۵، ۶]. موضوع ضرایب پسا در گازهای رقیق در زمینه پرواز در ارتفاع بالا برای اولین بار در سال ۱۹۵۰ توسط شامبرگ^۳ مطرح شد. او این فرض را کرد که سرعت فضاپیما به مراتب از سرعت حرارتی مولکول‌های جوی بیشتر است و ضرایب پسا را برای چندین شکل اساسی محاسبه کرد [۷]. سنتن یک مدل ضریب پسا تحلیلی مبتنی بر فیزیک ساخت که به فرض جریان هایپرترمال نیازی ندارد. فرمول‌های سنتن برای ضرایب پسا اجازه می‌دهد تا یک ضریب لحاظ شده متغیر (دمای بازتاب) کار را بسیار سازگار کند و در واقع، معادلات هنوز هم به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸-۱۰]. مشخص شده است که در ارتفاعات معین در مدار نزدیک زمین، مولکول‌ها روی سطح ماهواره به هم چسبیده یا جذب می‌شوند. این می‌تواند باعث شود نوع بازتاب تغییر کند که بر روی ضریب پسا اثر می‌گذارد. داده‌ها برای این کار از انواع حسگرهای متصل به ماهواره‌ها، از جمله شتاب‌سنج و طیف‌سنج جرمی جمع‌آوری می‌شود. از این داده‌ها، محاسبات دقیق‌تر از مدل سنتن برای محاسبه ضریب پسا تولید شده است [۱۱-۱۲]. داده‌های محاسبه شده از شتاب‌سنج در داخل ماهواره در کنار شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو مقایسه می‌شوند. داده‌های محاسبات حاصل از شبیه‌سازی در ۱ درصد

^۲ Bird

^۳ Schamberg

^۱ Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)

معادله بولتزمن برای یک گاز رقیق ساده [۱۷] به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(nf) + c \cdot \frac{\partial}{\partial r}(nf) + F \cdot \frac{\partial}{\partial c}(nf) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{4\pi} n^2 (f^* f_1^* - f f_1) c_r \sigma d\Omega dc_1 \end{aligned} \quad (1)$$

جمله اول نرخ تغییر تعداد مولکول‌ها را بیان می‌کند. جمله دوم تغییر در تعداد مولکول‌ها در اثر حرکت مولکولی و جمله سوم تغییر در تعداد مولکول‌ها در اثر یک میدان نیروی خارجی می‌باشد. اساس روش شبیه‌سازی مستقیم مونت‌کارلو، شبیه‌سازی جریان بر مبنای حلی سازگار با معادله بولتزمن پایه‌گذاری شده است. سمت راست معادله بولتزمن اصطلاحاً ترم برخورد نامیده می‌شود، تغییر در وضعیت مولکول‌ها ناشی از برخورد مولکولی را توصیف می‌کند و منبع مشکلات در یافتن راه حل است و سمت چپ معادله بولتزمن مربوط به حرکت ذرات است. الگوریتم شامل دو قسمت اصلی حرکت و برخورد ذرات است که جدا از هم بررسی می‌شوند. توجه شود در این روش فرض حرکت ذرات مطابق با شرط اولیه گذاشته می‌شود که جهت سرعت در راستای افقی و عمودی و مقدار آن مشخص است. در صورت برخورد تغییر در جهت و مقدار سرعت لحاظ می‌شود. این روش جریان‌های رقیق دو و سه بعدی را می‌تواند مدل کند. در ابتدا، شرایط اولیه ذرات مشخص شده و توزیع ذرات در سلول‌ها انجام می‌شود. در ادامه، حرکت ذرات در گام زمانی مشخص انجام شده و شرایط مرزی اعمال می‌شود. در این بررسی بدلیل گرمای سطح برخورد دیفیوژن مد نظر بوده است که خیلی متفاوت با برخورد آینه ای نمی‌باشد ولی دقیقتر است. سپس، برخورد ذرات اعمال شده و موقعیت هر ذره دقیقاً مشخص می‌گردد. در ادامه، احتمال برخورد بررسی شده و در صورت پذیرش، سرعت‌های بعد از برخورد محاسبه می‌شود. پس از آن تعدادی از ذرات که برای محاسبه کمیت‌های جریان مناسب‌اند نمونه‌گیری شده و خروجی‌های لازم استخراج می‌شوند. حال ذرات موقعیت‌ها و سرعت‌های جدیدی پیدا کرده و با شرایط جدید حلقه تکرار شده تا زمانی که معیار بیشترین تکرار ارضا شود. فلوجارت روش شبیه‌سازی مستقیم مونت‌کارلو بر اساس روش بولتزمن در شکل ۱ ارائه شده است [۱۱، ۱۴].

۴- نتایج عددی

در این بخش به بررسی و ارزیابی نتایج بدست آمده از کد دی اس ام سی فوم می‌پردازیم. حلگر دی اس ام سی فوم توانایی انجام شبیه‌سازی حالت گذرا و حالت پایدار را دارد. برای محاسبات

از داده‌های تجربی محاسبه شده از ماهواره قرار دارند. مهتا و همکاران با اجرای شبیه‌سازی‌ها بر روی اشکال اساسی، به محاسبه ضریب پسا پرداختند. این اشکال شامل یک کره، یک صفحه صاف و تعدادی استوانه مختلف است [۱۳]. نرم‌افزارهای مختلفی از جمله نرم‌افزار DSMC3D(DS3V) برد جهت انجام شبیه‌سازی‌ها برای محاسبه ضرایب پسا بر روی اجسام در مدار و ماهواره‌ها استفاده شده است و به‌عنوان یک نرم‌افزار گسترده در جامعه دینامیک رقیق مشاهده می‌شود [۱۴].

دی اس ام سی فوم حلگر شبیه‌سازی مستقیم مونت‌کارلو برای دینامیک گاز رقیق در چارچوب نرم‌افزار اپن فوم و به‌صورت شیء‌گرا (زبان ++C) پیاده‌سازی شده است. حلگر دی اس ام سی فوم جهت حل جریان‌های مافوق صوت واکنش‌پذیر و بدون واکنش در هندسه‌های ساده و پیچیده استفاده می‌شود [۱۵]. به‌دلیل نواقصی که در روش‌های مذکور وجود دارد از جمله نیاز به پارامترهای تجربی در روش‌های وابسته به اطلاعات میکروسکوپی، عدم دقت کافی در روش‌های وابسته به اطلاعات میکروسکوپی، محاسبه نیروی پسا به روش شبیه‌سازی مستقیم مونت‌کارلو جهت افزایش عمر مداری ماهواره، دلنستن زمان خروج ماهواره از مدار و جایگزین کردن ماهواره جدید تحقیق حاضر انجام شده است. در این مقاله ابتدا هندسه یک صفحه تخت بررسی و اعتبارسنجی شده است و در ادامه به عنوان نوآوری به بررسی جریان بر روی یک صفحه عمودی، زاویه‌دار و محاسبه ضرایب آبرودینامیکی (نیروی درگ) آن پرداخته شده است.

۳- روش عددی

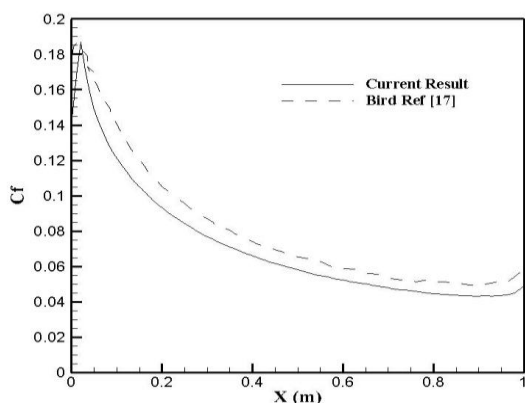
معادله بولتزمن جریان در همه رژیم‌ها، پیوسته، انتقالی و مولکولی آزاد را توصیف می‌کند. بر اساس بقاء تعداد مولکول‌ها در یک المان حجمی و در یک المان فضای سرعتی تعریف شده است که به‌دلیل اتفاقی بودن رفتار گازها می‌توان از این تابع توزیع سرعت برای توزیع چگالی مولکول‌ها استفاده نمود. این یک معادله انتگرالی دیفرانسیلی است که توسط بولتزمن در سال ۱۸۷۲ پیشنهاد شده است. موارد محدود این معادله، توصیف پیوسته را ارائه می‌دهد که معمولاً بر اساس معادلات اوپلر یا ناویر استوکس است [۱۶].

۱ Mehta

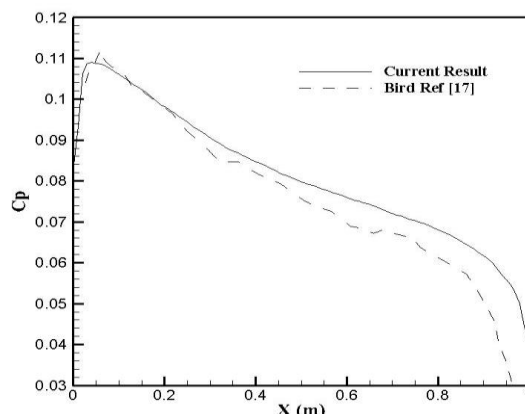
۲ dsmcFoam

(علمی-پژوهشی)
سعید اسکندری، رامین ذاکری و علی سررشته‌داری

مقایسه شده است. هر دو روندی یکسان را پیش‌بینی می‌کنند. در ابتدا به علت شوک و برخورد با سطح شاهد افزایشی در ضرایب می‌باشیم. همان‌طور که انتظار می‌رود با فاصله گرفتن از شوک این دو پارامتر کاسته شده است. درصد خطای ضریب اصطکاکی حدود ۵ درصد و درصد خطای ضریب فشاری حدود ۱۴ درصد می‌باشد. در نهایت با جمع ضریب فشاری و ضریب اصطکاکی میزان ضریب پسا ۰/۱۵۳ محاسبه شد.



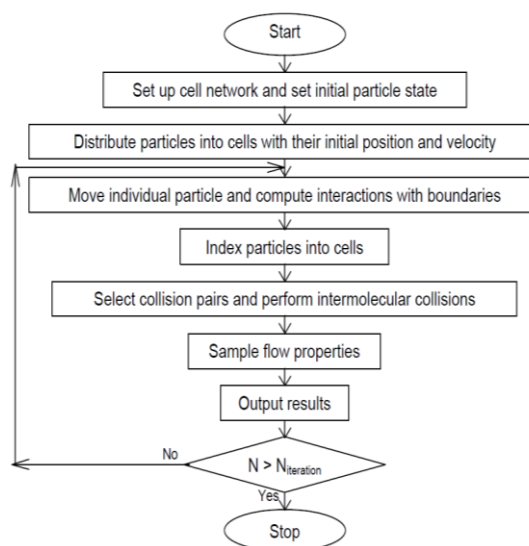
شکل (۲): نتایج نمودار ضریب اصطکاک بر طول صفحه و مقایسه با نتایج برد.



شکل (۳): نتایج نمودار ضریب فشار بر طول صفحه و مقایسه با نتایج برد.

تعدادی از عوامل کلیدی وجود دارد که می‌تواند مسیر مداری ماهواره را تحت تأثیر قرار دهد. یکی از این عوامل ضریب پسا است که توسط ماهواره تجربه می‌شود. در حالی که کاهش ضریب پسا می‌تواند باعث افزایش دوره مداری ماهواره شود، افزایش ضریب پسا می‌تواند عمر مداری آن را کاهش دهد و اجازه دهد ماهواره با سرعت بیشتری نسبت به حالت معمول از مدار خارج شود. بنابراین، ضروری است که به محاسبه ضریب پسا بپردازیم. در این پژوهش به بررسی جریان بر روی یک صفحه عمودی می‌پردازیم. جهت رسیدن به نتایج واقعی در شرایط ماهواره، ارتفاع ۱۵۰ کیلومتری از زمین را مدنظر قرار دادیم که مدار لئو می‌باشد. اکثر ماهواره‌ها

حالت پایدار، تمام خصوصیات گاز در یک دوره زمانی طولانی و در نتیجه اندازه نمونه به‌اندازه کافی بزرگ اندازه‌گیری می‌شود که به‌طور مؤثر پراکندگی آماری را کاهش می‌دهد. جریان یکنواخت بر روی صفحه تخت در نظر گرفته شده است. شبکه مستطیلی با تعداد ۱۰۰ سلول در جهت x و ۶۰ سلول در جهت y مشخص شده است. تعداد مولکول‌های شبیه‌سازی شده در این بررسی $10^{16} \times 175$ عدد می‌باشد. گاز مورد بررسی نیتروژن از نوع کره سخت متغییر با قطر مرجع ۱۰-۴/۱۷e و ویسکوزیته (w) ۰,۷۴ در دمای مرجع ۲۷۳ کلوین می‌باشد. تمام فعل و انفعالات گاز و سطح به صورت بازتاب‌های پخش شده مدل می‌شوند. مشخصات ورودی جریان یکنواخت بر روی صفحه تخت در جدول ۱ آورده شده است.



شکل (۱): الگوریتم روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو.

جدول (۱): خلاصه تحقیقات بررسی شده در این پژوهش.

شبکه یکنواخت	$1 \times 0.6m$
چگالی تعدادی	3×10^{16}
سرعت جریان	۱۴۱۲/۵m/s
گام زمانی	4×10^{-6}
دمای جریان	۳۰۰k
دمای سطح	۵۰۰k
عدد نادسن	۰/۱۴۳

شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب تغییرات ضریب اصطکاک و فشار را نشان می‌دهند. نتایج این‌فوم با نتایج برد مرجع [۱۷]

(علمی-پژوهشی)

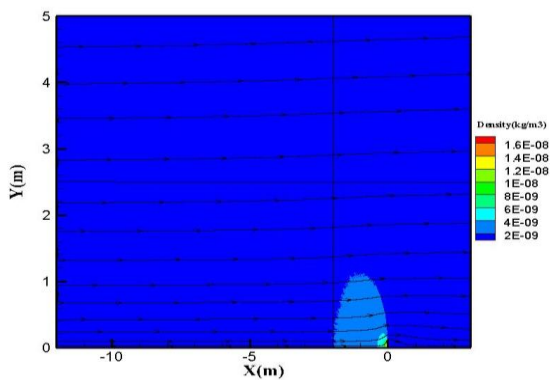
شبیه‌سازی خواص آیرودینامیکی جریان گاز رقیق بر روی پنل ماهواره به روش DSMC

در سیالات ایجاد می‌شود. شکل ۹ نمودار ضریب اصطکاک را شاهد هستیم که میزان ضریب اصطکاک به طور طبیعی افزایش پیدا کرده است. در ادامه با جمع ضریب فشاری و ضریب اصطکاکی ضریب پسا به دست می‌آید که مقدار آن ۱/۵۳ می‌باشد. محاسبه نیروی پسا باعث خواهد شد که بدانیم یک ماهواره تا چه مدت در مدار خود باقی می‌ماند که این امر موجب افزایش عمر مداری ماهواره با ایجاد یک نیروی پیشران، زمان‌بندی جهت خروج ماهواره از مدار خود و غیره خواهد شد.

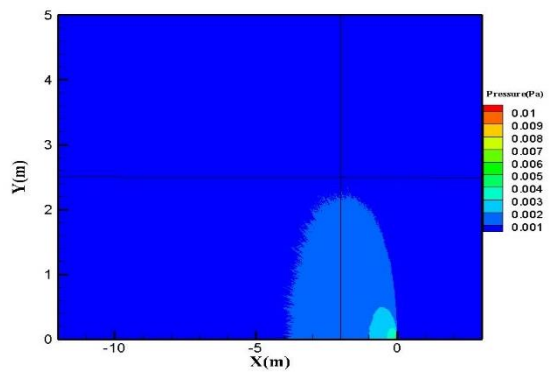
در مدار لثو قرار دارند. در این ارتفاع شرایط جریان تغییر کرده و عدد نادسن افزایش قابل توجهی می‌یابد [۱۸]. کد دو بعدی بر صفحه با طول ضلع ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. مشخصات ورودی جریان یکنواخت بر روی صفحه عمودی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۲): مشخصات ورودی جریان یکنواخت بر روی صفحه عمودی.

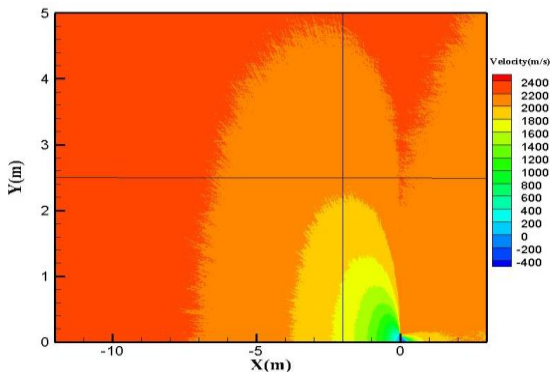
چگالی تعدادی	$3/124 \times 10^{-16}$
سرعت جریان	m/s ۲۴۰۰
فشار	mb $4/5422 \times 10^{-6}$
دمای جریان	۶۳۴K
دمای سطح	۳۰۰ k
عدد نادسن	۳۳۰



شکل (۴): کانتور چگالی بر طول صفحه.



شکل (۵): کانتور فشار بر طول صفحه.



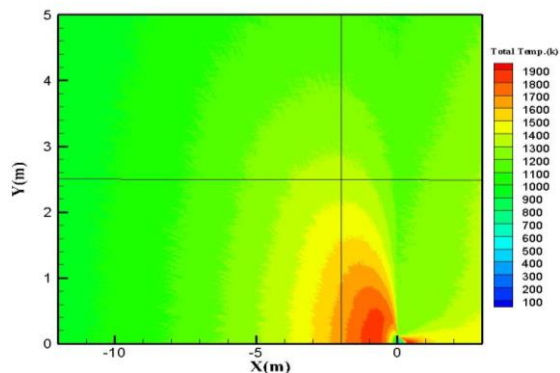
شکل (۶): کانتور سرعت بر طول صفحه.

در ادامه نتایج به ترتیب کانتورهای چگالی، فشار، سرعت و دمای کلی با نرم‌افزار این‌فوم به دست آمده‌اند و در نرم‌افزار تک‌پلات رسم شده‌اند. در شکل ۴ افزایش چگالی به علت برخورد ذرات با صفحه در جلوی جسم مشاهده می‌شود که منجر به ایجاد شوک در جلوی صفحه شده است که در ادامه این روند کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل ۵ انتظار می‌رود به دلیل شوکی که در جلوی صفحه شاهد هستیم، افزایش چشمگیر فشار نتیجه شده است که با فاصله گرفتن از شوک کاهش شدید فشار حاصل شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با فاصله گرفتن از شوک عظیمی که در مقابل صفحه عمودی ایجاد شده، منحنی جریان به سمت افزایش سرعت پیش خواهد رفت. در نزدیکی صفحه به علت تماس ذرات با سطح از سرعت آن کاسته می‌شود. در شکل ۷ کانتور دمای کلی مشاهده می‌شود که در ابتدا صفحه به علت برخورد شدید مولکول‌ها شاهد افزایش دما و ایجاد یک شوک بسیار بزرگ می‌باشیم که با فاصله گرفتن از جسم دما کاهش می‌یابد.

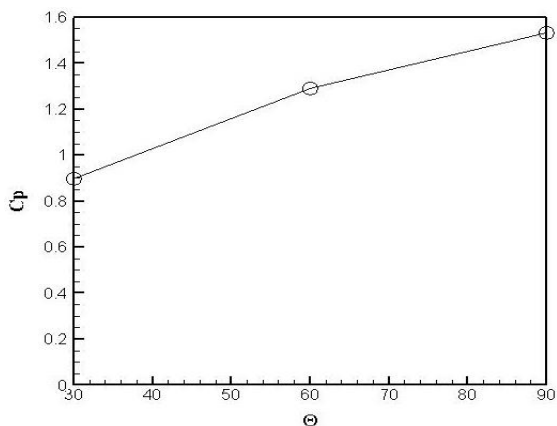
شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب تغییرات ضریب فشار و اصطکاک را نشان می‌دهند. زمانی که جریان با صفحه برخورد می‌کند پسای فشاری به وجود می‌آید. این نیرو بر اثر اختلاف فشار در دو طرف جلو و عقب صفحه به وجود می‌آید. فشار بالادست صفحه به طور مشهودی بزرگتر از فشار دنباله تشکیل شده در پشت صفحه است. در شکل ۸ ابتدا به علت ایجاد شوک بزرگ شاهد افزایشی در ضریب فشار می‌باشیم. در ادامه همان‌طور که انتظار می‌رود ضریب فشار کاهش می‌یابد. جریان عبوری در طول سطح صفحه، یک نیروی اصطکاکی روی آن تولید می‌کند. این اصطکاک به دلیل وجود چسبندگی و لزجت

(علمی-پژوهشی)
سعید اسکندری، رامین ذاکری و علی سررشته‌داری

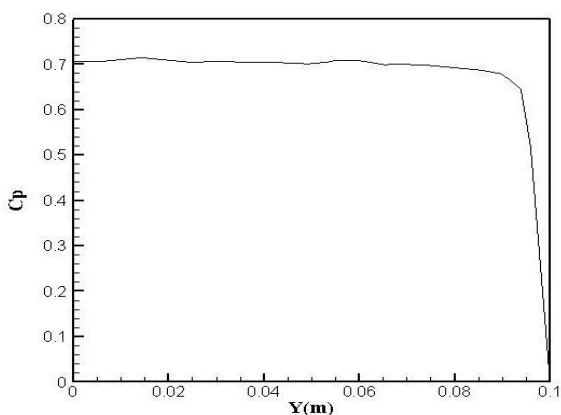
شاهد افزایش ضریب پسا می‌باشیم. در صفحه تخت در زاویه صفر درجه بیشترین سهم از ضرایب به ضریب اصطکاکی مربوط می‌شود و هرچه زاویه صفحه افزایش یابد سهم ضریب اصطکاکی کاهش می‌یابد. ضریب فشاری برعکس ضریب اصطکاکی عمل می‌کند به این صورت که بیشترین سهم ضریب فشاری به صفحه عمودی مربوط می‌شود به علت عدم تعادل بین فشار سطح جلو و پشت که منجر به تولید نیروی پسا می‌شود.



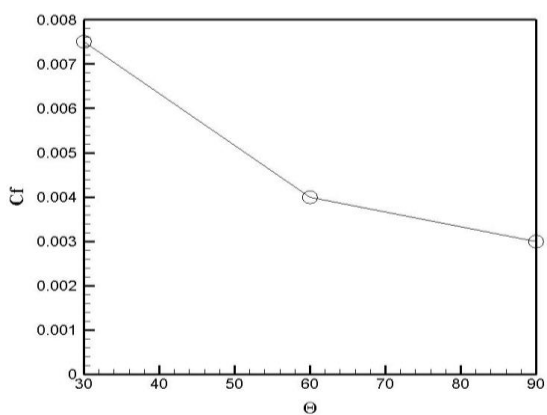
شکل (۷): کانتور دما بر طول صفحه.



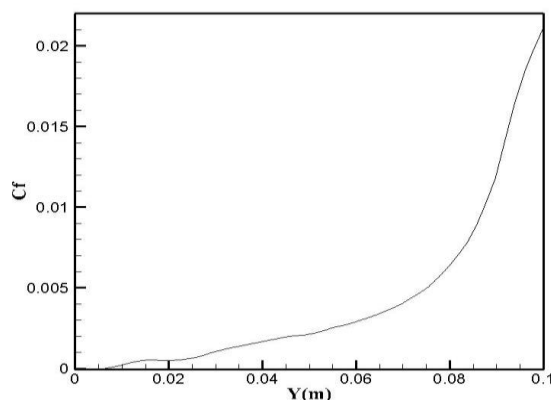
شکل (۱۰): نمودار ضریب فشاری در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰.



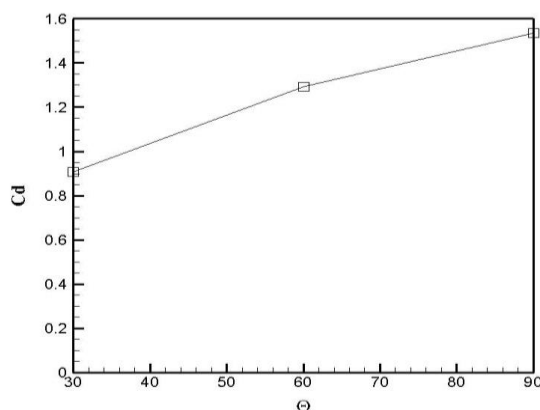
شکل (۸): نمودار ضریب فشاری بر طول صفحه.



شکل (۱۱): نمودار ضریب اصطکاکی در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰.



شکل (۹): نمودار ضریب اصطکاکی بر طول صفحه.



شکل (۱۲): نمودار ضریب پسا در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰.

در ادامه این پژوهش جهت توسعه نتایج به بررسی ضرایب فشار، اصطکاکی و پسا در زوایای نصب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ می‌پردازیم. شکل ۱۰ نمودار ضریب فشاری را در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش زاویه شاهد افزایش ضریب فشاری می‌باشیم. شکل ۱۱ نمودار ضریب اصطکاکی در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ می‌باشد. هر چه زاویه صفحه افزایش پیدا کند ضریب اصطکاکی کاهش می‌یابد. در نهایت با در نظر گرفتن مجموع ضریب فشاری و اصطکاکی، ضریب پسا به دست می‌آید. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش زاویه صفحه

(علمی-پژوهشی)

شبیه‌سازی خواص آیرودینامیکی جریان گاز رقیق بر روی پنل ماهواره به روش DSMC

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی یک صفحه تخت در شرایط جریان گاز رقیق در سرعت $1412/5$ متر بر ثانیه توسط نرم افزار دی اس ام سی - اپن فوم ارائه شد و نتایج با نتایج برد مقایسه و اعتبارسنجی شد که میزان خطا کمتر از ۱۵ درصد بود. جهت توسعه نتایج، صفحه عمودی در مقابل جریان مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و نیروهای آیرودینامیکی وارد بر چنین صفحه‌ای در شرایط حضور ماهواره در مدار لئو محاسبه شد. برای اولین بار نشان داده شد که در شرایط گاز بسیار رقیق در ارتفاع ۱۵۰

کیلومتری، با چگالی $9-2/074e$ کیلوگرم بر متر مکعب و سرعت جریان ۲۴۰۰ متر بر ثانیه مقدار ضریب پسا $1/53$ وارد بر صفحه ۱۰ سانتیمتری وارد می‌شود. نیروی درگ نیز در زوایای مختلف پنل نیز محاسبه شد. نرم‌افزار توسعه یافته شده قابلیت اجرا برای هر نوع هندسه‌ای جهت محاسبه نیروهای آیرودینامیکی وارد بر ماهواره را دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که نرم افزار فوق، قابلیت شبیه‌سازی جریان گاز رقیق در سرعت‌های بالا را به خوبی داراست.

۶- مراجع

- [1] I. D. Boyd, "Computation of atmospheric entry flow about a Leonid meteoroid," *Earth, Moon, and Planets*, vol. 82, pp. 93-108, 1998.
- [2] R. Zakeri, R. Kamali-Moghadam, and M. Mani, "Modified Collision Energy, a New Chemical Model in the DSMC Algorithm," *Journal of Heat Transfer*, vol. 141, 2019.
- [3] A. J. Lofthouse, "Nonequilibrium hypersonic aerothermodynamics using the direct simulation Monte Carlo and Navier-Stokes models," Michigan Univ Ann Arbor 2008.
- [4] G. Bird, "Shock-wave structure in a rigid sphere gas," in *Proceedings of the 4th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, New York, 1965*, 1965, pp. 216-222.
- [5] J. N. Moss, "Direct simulation Monte Carlo simulations of ballute aerothermodynamics under hypersonic rarefied conditions," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 44, pp. 289-298, 2007.
- [6] I. D. Boyd, "Vectorization of a Monte Carlo simulation scheme for nonequilibrium gas dynamics," *Journal of Computational Physics*, vol. 96, pp. 411-427, 1991.
- [7] R. F. Probstein, "Shock wave and flow field development in hypersonic re-entry," *ARS Journal*, vol. 31, pp. 185-194, 1961.
- [8] M. F. Storz, B. R. Bowman, M. J. I. Branson, S. J. Casali, and W. K. Tobiska, "High accuracy satellite drag model (HASDM)," *Advances in Space Research*, vol. 36, pp. 2497-2505, 2005.
- [9] E. Doornbos, M. Förster, B. Fritsche, T. van Helleputte, J. van den IJssel, G. Koppenwallner, *et al.*, "Air density models derived from multi-satellite drag observations," in *Proceedings of ESAs Second Swarm International Science Meeting. Potsdam. 24, 2009.*
- [10] K. Moe, M. M. Moe, and S. D. Wallace, "Improved satellite drag coefficient calculations from orbital measurements of energy accommodation," *Journal of spacecraft and rockets*, vol. 35, pp. 266-272, 1998.
- [11] P. M. Mehta, C. A. McLaughlin, and E. K. Sutton, "Drag coefficient modeling for grace using Direct Simulation Monte Carlo," *Advances in Space Research*, vol. 52, pp. 2035-2051, 2013.
- [12] E. M. Gaposchkin, "Calculation of satellite drag coefficients," MASSACHUSETTS INST OF TECH LEXINGTON LINCOLN LAB 1994.
- [13] P. M. Mehta, A. Walker, C. A. McLaughlin, and J. Koller, "Comparing physical drag coefficients computed using different gas-surface interaction models," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 51, pp. 873-883, 2014.
- [14] "G.A.B. Consulting Pty Ltd "The DS3V Program User's Guide." Version 2.5, 2006.."
- [15] T. Scanlon, E. Roohi, C. White, M. Darbandi, and J. Reese, "An open source, parallel DSMC code for rarefied gas flows in arbitrary geometries," *Computers & Fluids*, vol. 39, pp. 2078-2089, 2010.
- [16] C. Cercignani, *Rarefied gas dynamics: from basic concepts to actual calculations* vol. 21: Cambridge university press, 2000.
- [17] G. A. Bird, "Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows," *Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows*, 1994.
- [18] J. Bullard, "Satellite Drag Analysis using Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)," 2018.