بررسی اثر زبری سطح بر ضریب پسا در جریان حول یک کپسول بازگشتی دوبعدی

سميرا سوراني، مرتضى بياره*، عليرضا شاطرى

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

*m.bayareh@sku.ac.ir

چکیدہ

در طراحی کپسولهای بازگشتی به دلیل عدم وجود سطوح کنترلی، همواره به مقوله پایداری دینامیکی توجه شایانی میشود. این مطالعه به بررسی جریان اطراف کپسول بازگشتی در شرایط مختلف جریانی و تأثیر زبری سطح بر کانتورهای فشار و سرعت میپردازد. جریان اطراف کپسول بهطور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل آیرودینامیکی از جمله طراحی هندسی و ویژگیهای سطحی است. در این بررسی، از شبیهسازی عددی جهت ارزیابی تغییرات فشار و سرعت در نقاط مختلف سطح کپسول در سه عدد رینولدز متفاوت استفاده شده است. نتایج نشان میدهند که زبری سطح کپسول میتواند منجر به افزایش اصطکاک در لایه مرزی و افت فشار در ناحیه پشتی کپسول شود، که این امر بر ضریب پسا تأثیر میگذارد و به ایجاد نواحی گردابی کمک میکند. مقدار پایدار ضریب پسا برای اعداد رینولدز ۲۰۱، ۲۰۲ و ۱۰۶ به ترتیب برابر با ۱/۶۸۷، ۱/۶۸۷ و ۱/۶ است که نشان میدهد با افزایش عدد رینولدز ضریب پسا کاهش مییابد. همچنین، توزیع کانتورهای فشار و سرعت تحت تأثیر این زبریها قرار میگیرد، بهطوری که سطوح زبر باعث ناپایداری و عدم یکنواختی در جریان میشوند. حداکثر فشار در ضریر زبری نسبت به حالت بدون زبری به مقدار ۳۵/۱

کلید واژهها: کپسول بازگشتی، زبری سطح، ورتکس، ضریب پسا، ضریب فشار.

Study of the roughness effect on drag coefficients in a flow around a 2D re-entry capsule

Samira Sourani, Morteza Bayareh*, Alireza Shateri Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran *m.bayareh@sku.ac.ir

Abstract – In the design of re-entry capsules, due to the absence of control surfaces, significant attention is always paid to the issue of dynamic stability. This study examines the

flow around the re-entry capsule under various flow conditions and the impact of surface roughness on pressure and velocity contours. The flow around the capsule is significantly influenced by aerodynamic factors, including geometric design and surface characteristics. In this investigation, numerical simulations are used to evaluate pressure and velocity variations at different points on the capsule's surface at three different Reynolds numbers. The results indicate that the surface roughness of the capsule can lead to increased friction in the boundary layer and pressure drop in the rear region of the capsule, which affects the drag coefficient for Reynolds numbers of 10², 10³, and 10⁶ are 1.69, 1.687, and 1.63, respectively, which indicates that the drag coefficient decreases with an increase in the Reynolds number. The roughness influences the distribution of pressure and velocity contours, causing instability and non-uniformity in the flow. The maximum pressure in the presence of roughness decreases by 1.35 Pa compared to the smooth condition. This study can help improve their performance under various operational conditions.

Keywords: Re-entry capsule, Surface roughness, Vortex, Drag coefficient, Pressure coefficient.

۱– مقدمه

اصطلاح کپسول معمولا برای توصیف انواع فضاپیماها از جمله فضاپیمای سرنشیندار، کاوشگرهای سیارهای و مانورهای پروازی به کار میرود [۱]. طی دورهای بیش از ۶۰ سال، مطالعات تجربی و محاسباتی بر روی آیروترمودینامیک کپسولهای بازگشتی انجام شده است [۲]. تحقیقات در زمینه بازگشت سالم در ابتدا به صورت تحلیلی شروع و سپس برای اطمینان از آزمایشات تجربی بهره برده شده است. بازگشت کپسول از مدار فضایی به زمین شامل سه مرحله اساسی است: ورود، کاهش ارتفاع و فرود (شکل ۱) [۱]. به دلیل عدم وجود سطوح کنترلی در اکثر کپسول های بازگشتی به جو، تعیین و کنترل نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی در طول مسیر برگشت در همه سرعتها از اهمیت خاصی برخوردار است [۳]. موضوع ناپایداری دینامیکی باعث شده تا این موضوع هنوز یکی از مباحثی باشد که در دنیا پس از دههها بررسی و تحقیق همچنان مورد مطالعه به صورت عددی و تجربی قرار گیرد [۴].



شکل ۱- نحوهی فرود کپسول بازگشتی [۱].

پارامترهای تاثیر گذار بر پایداری دینامیکی به دو دسته کلی پارامترهای هندسی (هندسه قسمت جلو، شعاع واسط، شکل قسمت انتهایی، زبری و مرکز جرم) و پارامترهای محیطی (زاویه حمله، فرکانس نوسان، عدد ماخ، عدد رینولدز و شرایط اتمسفری پرواز) قابل تقسیم هستند. سان و همکاران [۵] یک الگوریتم شبیهسازی عددی برای پیشبینی و تحلیل ویژگیهای آیرودینامیکی یک کپسول بازگشتی با مخروط معکوس بزرگ و سر تیز در حین ورود مجدد فضاپیما به جو ارائه دادند. این الگوریتم اثرات گاز واقعی در دماهای بالا را در نظر می گرفت و از معادلات انتقال مؤلفهای برای واکنشهای شیمیایی استفاده می کرد. نتایج نشان دادند که ویژگیهای آیرودینامیکی کپسول به طور عمده تحت تأثیر زاویه حمله تنظیمی و ارتفاع پرواز قرار دارند. آنها نتیجه گرفتند که این اطلاعات برای دینامیک پرواز ورود مجدد و طراحی مسیر پرواز حیاتی است و ایمنی و قابلیت اطمینان را تضمین میکند. فضاپیمای مریخ ۲۰۲۰ در تاریخ ۱۸ فوریه ۲۰۲۱ با موفقیت مریخنورد پرسیورنس و هلیکوپتر اینجنوئیتی را در دهانه جیزرو فرود آورد. ترتیب ورود، فرود و نشستن مأموریت عمدتا بر اساس مأموریت آزمایشگاه علمی مریخ در سال ۲۰۱۲ بود. دوتا و همکاران [۶] مدلهای جوی پیش از پرواز را با اندازه گیری های درون سفینه مقایسه کردند که نشان دهنده پیشبینیهای کمتر از حد در جو بالایی بودند. پریادارشی و میتال [۷] بهینه سازی اهداف طراحی سطح سیستم، دامنه عرضی و جرم کل را در یک چارچوب چندهدفه و چندرشتهای انجام دادند. تلاش آنها برای بهبود دقت رشتههای شرکتکننده در عین حفظ سرعت اجرای ماژولهای رشتهای بود. ویژگیهای پیکربندیها در جبهه پارتو تحلیل و با نتایج بهینهسازی که از مدل آیرودینامیکی کمتر دقیق استفاده می کردد، مقایسه شد. آلن و اگرز [۸] مفاهیم بدنه صاف را برای کپسول بازگشتی به جو معرفی کردند که گرمایش آیرودینامیکی را کاهش میداد و اصطکاک هوایی بالایی ایجاد میکرد. بابینوکس و همکاران [۹] تاثیر شکل هندسی روی میرایی نوسانات حرکت را در ورود به اتمسفر سیاره مریخ مورد تحلیل قرار دادند. رسلر و سیزر [۱۰] تاثیر مغناطیس و الکترومغناطیس را روی عملکرد آیرودینامیکی وسیله و همچنین بر روی فاصله موج ضربهای ایجاد شده بر روی بدنه بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد این اثر باعث پخش و فاصله گرفتن قابل ملاحظه موج

ضربهای از بدنه میشود. اصلانف [۱۱] حرکت و کنترل به کمک طناب را برای یک کپسول بازگشتی مورد بررسی قرار داد. کارایی فرآیند ترمزگیری کپسول به زاویه انحراف بستگی داشت. هدف نویسنده یافتن قانون کنترل طول بود که امکان افزایش زاویه انحراف نسبت به عمود محلی را فراهم کند. او نتیجه گرفت که قانون کنترل ممکن است در مرحله نهایی به دو گزینه ممکن برای انجام مانور بازگشت به کمک طناب اعمال شود: رهاسازی ایستا و پویا. شبیهسازیهای عددی نشان دادند که اعمال قانون کنترل امکان کاهش طول مورد نیاز برای مانور بازگشت به جو را فراهم میکند. کیز و هفنر [۱۲] به مطالعه جت خلاف جریان پرداخته و دریافتند که استفاده از این جت موجب افزایش درگ در هنگام فرود در اتمسفر می شود که این درگ با افزایش فشار کل جت خروجی افزایش مییابد. فدله و همکاران [۱۳] قابلیت اجرایی سیستم کنترل آیرودینامیکی بر روی یک کپسول بازگشتی مکانیکی قابل استقرار را بررسی کردند تا دقت فرود را افزایش دهند. استراتژی کنترل شامل انحراف مستقل فلابها برای تنظیم کپسول و تولید نیروی بالابر و نیروی جانبی بود. یک الگوریتم کنترل توسعه و پیادهسازی شد و در یک محیط شبیه سازی آزمایش شد که نتایج خوبی در کاهش پراکندگیها در محل فرود نشان داد. کلیف و توماس [۱۴] به بهینه-سازی ضرایب آیرودینامیکی کپسول آپولو برای بهبود پایداری به صورت عددی و تجربی پرداختند. یانگ و رادسپیل [۱۵] به کمک شبیهسازی عددی، رفتار دینامیکی کپسول آپولو و تاثیر هندسه جلو و پشت بر رفتار گشتاور پیچشی را بررسی کردند. بروک و همکاران [۱۶] به کمک نتایج تست تونل باد محدوده بالستیک یک کپسول بازشونده بازگشتی و پایداری دینامیکی را بررسی و سپس با شبیه سازی عددی رفتار توزیع فشار در چند نقطه را بررسی کردند. استرن و همکاران [۱۷] نیز پایداری دینامیکی یک کپسول بازگشتی در نوسانات آزاد را بررسی نمودند. پری و همکاران [۱۸] رفتار آیرودینامیکی و آیرودینامیک حرارتی یک کپسول را پس از باز کردن چتر نجات در مرحله ورود مجدد به جو مریخ بررسی و مدل اغتشاشی شبیهسازی ادیهای بزرگ (LES) استفاده گردید. نتایج نشان دادند که امواج ضربهای و انبساطی، گرادیانهای فشار بالا، چگالی، دما و جریان حرارتی به سمت جریان هوا و بدنه وجود دارد که به تولید، جذب و تقویت آشفتگی از طریق امواج ضربهای اشاره دارد. پلاکو و همکاران [۱۹] شبیهسازیهایی با دقت بالا برای بررسی حرکت یک کپسول ورودی در رژیم پرواز مافوق صوت در زوایای حمله مختلف در جو مریخ انجام دادند. هدف درک پدیدههای بحرانی ناپایدار که در مرحله فرود به وجود میآیند و نیز طراحی بهینه برای اطمینان از ورود ایمن به جو بود. آنها گزارش کردند که الگوهای اغتشاشی به دست آمده از مدل اغتشاشی شبیهسازی ادیهای بزرگ به ما این امکان را میدهند که خواص جریان و پاسخ کپسول را هم در فضا و هم در زمان ارزیابی کنیم و توجه ویژهای به تحلیل حرکات آشفتهای که مسئول دینامیک نوسانی و ناپایدار هستند، داشته باشیم.

تاریخچه مطالعات عددی پیشین نشان میدهد اثر زبری بر هیدرودینامیک جریان حول کپسول برگشتی تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. از سوی دیگر، قرار دادن دو سطح پلهای شکل در بخش عقبی کپسول و بررسی اثر آنها بر تغییرات ضریب فشار و ضریب پسا دیگر نوآوری کار حاضر است. بر این اساس، در پژوهش حاضر، اثر زبری بر آیرودینامیک حرکت کپسول و ضریب پسای آن با کمک نرمافزار انسیس فلوئنت بررسی شده است. در ادامه هندسه، معادلات حاکم، شبکه عددی استفاده شده و شرایط مرزی شبیهسازیشده بررسی و سپس، نتایج شبیهسازی آورده میشود.

۲- توصيف مسأله

هندسه انتخاب شده در پژوهش حاضر یک کپسول بازگشتی است که در شکل (۲-الف) ابعاد و مشخصات هندسی آن نشان داده شده است. مبنای انتخاب هندسه در این پژوهش الهام گرفته از مطالعه ادکوئیست و همکاران [۲۰] است. کپسول بازگشتی مبنا از سه سطح تحلیلی تشکیل شده که عبارت است از یک بخش کروی، یک بخش حلقوی و یک بخش مخروطی ناقص به همراه یک پله در عقب کپسول بازگشتی. اگر چه مجموعه منحصر به فردی از پارامترهای هندسی برای توصیف این پیکربندی وجود ندارد، ولی پارامترهای مورد نیاز برای تعریف شکل کپسول بازگشتی چنین است: شعاع دماغه کپسول (R_n) ، شعاع جانبی کپسول (R_s) ، طول قسمت مخروطی اول (L_{c1}) ، طول قسمت مخروطی دوم (L_{c2}) ، زاویه قسمت مخروطی اول حاضر را نشان میدهد که در بخش بعد به تفصیل توضیح داده خواهد شد.



۳- معادلات حاکم

با فرض جریان مغشوش و ناپایا، معادلات متوسط گیری شده پیوستگی و ناویر⊣ستوکس برای یک سیال تراکمناپذیر به صورت زیر بیان میشوند:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \overline{u}_{l}}{\partial t} + \overline{u}_{j} \frac{\partial \overline{u}_{l}}{\partial x_{j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_{i}} + \nu \frac{\partial^{2} \overline{u}_{l}}{\partial x_{i} \partial x_{j}} - \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\overline{u_{l}' u_{j}'} \right)$$
^(Y)

که \bar{y} ، \bar{v} و ρ به ترتیب نمایانگر سرعت متوسط، فشار متوسط، لزجت سینماتیکی و چگالی سیال هستند. همچنین، u'_i و u'_i مولفههای نوسانی سرعت هستند. جهت مدل کردن جمله $\overline{u'_iu'_j}$ از مدل اغتشاشی $x - \varepsilon$ استفاده میشود. این مدل اغتشاشی مدلی دو معادلهای است که در عین ساده بودن، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و به طور گستردهای در دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیهسازی جریان مغشوش در اطراف هندسههای پیچیده مانند کپسولهای بازگشتی دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیهسازی جریان مغشوش در اطراف هندسههای پیچیده مانند کپسولهای بازگشتی استفاده میشود. این مدل دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیهسازی جریان مغشوش در اطراف هندسههای پیچیده مانند کپسولهای بازگشتی استفاده میشود. این مدل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اتلاف آن (x) حل میکند و فرض میکند استفاده میشود. این مدل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اتلاف آن (x) حل میکند و فرض میکند که لزجت آشفتگی ایزوتروپیک است. این مدل میتواند ویژگیهای مهم جریان مانند وقوع جدایش جریان و رفتار لایه مرزی را به خوبی به تصویر بکشد که در شبیهسازی جریان حول کپسول برگشتی قابل مشاهده هستند.

در تحلیل جریان پایا و تراکمناپذیر در اطراف یک کپسول بازگشتی، تعریف شرایط مرزی مناسب بسیار اهمیت دارد؛ زیرا این شرایط موجب میشود که رفتار جریان در ورودی و خروجی و همچنین در سطوح تماس با مرز مشخص شود. شرط مرزی عدم لغزش روی سطوح کپسول در نضر گرفته شده و سطوح بالا و پایین دامنه محاسباتی همان سرعت جریان آزاد در ورودی را دارند. مطابق شکل (۵)، دامنه محاسباتی در جهت جریان تا ده برابر قطر هیدرولیکی کپسول در پشت جسم ادامه یافته است تا امکان مشاهده تغییرات جریان در پشت کپسول و نیز محاسبه دقیق تر ضرایب پسا و افت فشار حاصل گردد. سرعت جریان در راستای عمودی در ورودی و دیوارهها صفر است. سیال مورد استفاده در این پژوهش هوا است اما به دلیل سرعت اندک، جریان

۳- مطالعه شبکه

انتخاب نوع شبکه محاسباتی بستگی به شکل هندسی مدل و پیچیدگی جریان دارد. در اینجا به دلیل هندسه دوبعدی و ناپایا بودن جریان از مش ساختاریافته استفاده شده است [۲۱]. اندازه مش باید به گونهای انتخاب شود که قادر به نمایش جزئیات مهم جریان باشد. مشهای ریزتر دقت بیشتری دارند، ولی زمان محاسبه را افزایش میدهند. در شکل (۳-الف) شبکهبندی هندسه کپسول بازگشتی نشان داده شده است. توجه ویژه به مش اطراف سطوح مرزی ضروری است، زیرا رفتار جریان در این نواحی نقش مهمی ایفا میکند. از آنجا که شبکهبندی مناسب و دقیق میتواند به بهبود نتایج شبیهسازی و کاهش خطاهای تحلیلی کمک کند، باید شبکه محاسباتی را در نزدیکی سطوح مرزی ریزتر و منظمتر طراحی کرد (شکل۳-ب). در شبیهسازی جریان سیال اطراف یک کپسول بازگشتی، شبکهبندی یک مرحله بحرانی است که تأثیر زیادی بر دقت و کیفیت نتایج شبیهسازی دارد. برای شبکهبندی هندسه از شبکهبندی ساختاریافته استفاده شده است. برای اطمینان از دقیق

بودن خواص سیال در نزدیکی دیواره، شبکه بندی لایهمرزی با حداکثر ۲۲ = ۲⁺ در نظر گرفته شده است. فاصله اولین گره تا

سطح جسم ۰/۰۰۰۱ متر با نرخ رشد ۱/۲ است. لازم به ذکر است که تعداد المانهای محاسباتی شبکه انتخاب شده برابر با ۸۲۳۹۴۶ است.



شکل ۳- (الف) شبکهبندی با سازمان حول کپسول بازگشتی و (ب) شبکهبندی در لایه مرزی اطراف کپسول بازگشتی.

۴– اعتبار سنجی

جهت اطمینان از حل عددی حاضر، نتایج حاصل از جریان حول یک استوانه دوبعدی با سطح مقطع دایره که توسط سینگ و میتال [۲۲] ارائه شده است، با نتایج حاصل از کار حاضر مقایسه می گردد. آنها از مدل اغتشاشی شبیه سازی ادی های بزرگ استفاده نموده و ضرایب فشار و پسا را در زوایای مختلف گزارش نمودند. جدول (۱) تغییرات ضریب فشار را به ازای زاویه نشان می دهد. این زاویه در نقطه سکون جلویی برابر با صفر است و بتدریج زیاد می شود تا به زاویه ۱۹۰ درجه در پشت استوانه برسد. مقادیر ذکر شده در این جدول بیانگر تطابق مناسب بین نتایج حاصل از دو مدل اغتشای ذکر شده؛ یعنی، مدل

جدول (۱) مقایسه مقادیر ضریب فشار به دست آمده از کار و حاضر و نتایج گزارش شده توسط سینگ و میتال [۲۲].

زاويه (درجه)	•	۲۰	۴.	۶۰	٨٠
کار حاضر	١	۰/۵۹	- ∙/۵۳۵	-1/841	-7/449
سینگ و میتال [۲۰]	١	•/۵٨	-•/۵Y	- 1/YYX	-7/4٣

۵- نتایج

کپسولهای بازگشتی به طور خاص در سیستمهای انتقال سیالات و جمعآوری دادهها به کار میروند. بررسی کانتورهای فشار و سرعت در اطراف این کپسولها میتواند اطلاعات ارزشمندی درباره شرایط جریان، از جمله توزیع فشار و رفتار سیال در نقاط مختلف کپسول ارائه دهد. این دادهها به مهندسان این امکان را میدهد که عملکرد بهینهتری را در طراحی کپسولها و سیستمهای هیدرولیکی داشته باشند. از نظر تحلیل عددی، استفاده از روشهای مختلف دینامیک سیالات محاسباتی میتواند به شبیهٔسازی و مطالعه رفتار جریان در اطراف کپسول کمک کند. در این مطالعه، تمرکز بر روی بررسی کانتورهای فشار و سرعت در سه عدد رینولدز ۲۰۱، ۲۰۴ و ۱۰۶ است که تأثیرات مختلف پارامترهای جریانی مانند سرعت ورودی و چگالی سیال را در نتیجه نهایی مورد بررسی قرار خواهد داد (شکل ۴). توزیع سرعت و فشار اطراف کپسول بازگشتی دوبعدی ویژگیهای متمایزی در رژیمهای جریان آرام و مغشوش نشان میدهند. در جریان آرام، نواحی بازچرخش پایداری در پشت کپسول شکل متمایزی در رژیمهای جریان آرام و مغشوش نشان میدهند. در جریان آرام، نواحی بازچرخش پایداری در پشت کپسول شکل میگیرد که با گردابههای کمسرعت و لایه برشی مشخصی که از نقطه جدایش شروع میشود، شناخته میشود. خطوط فشار نشاندهنده انبساط سریع در گوشه کپسول است و پس از آن ینگ موج شوک فشردهسازی مجدد در جریان پاییندست قرار دارد که جریان را همراستا می کند. لایه برشی مشخصی که از نقطه جدایش شروع میشود، شناخته میشود. خطوط فشار دارد که جریان را همراستا می کند. لایه برشی آرام دارای گرادیانهای سرعت هموار و مشتقات نزدیک به صفر در لبههای خود



$Re = 10^2$







شکل ۴- کانتورهای سرعت و فشار در اعداد رینولدز مختلف.

شکل ۴ نشان می دهد که در دماغه منحنی جلوی کپسول بازگشتی بیشترین فشار وجود دارد که برای عدد رینولدز ۱۰^۲ این مقدار تا ۲-۱۰×۳/۹۷ پاسکال افزایش می یابد. این مقدار افزایش فشار در عدد رینولدز ۱۰^۳ به ۲۰×۴/۸۳ پاسکال می رسد که نشان می دهد در جریان آرام با افزایش عدد رینولدز، میزان فشار در دماغه منحنی جلوی کپسول افزایش می یابد. در پشت کپسول افت فشار وجود دارد که بیشترین میزان افت به پشت منحنیهای بالایی و پایینی کپسول مربوط است. در اعداد رینولدز ۲۰۱ و ۲۰۴ کمترین فشار به ترتیب برابر با ۲۰–۱۰×۲۲۲–و ۲۰–۱۰×۹۷/۹ پاسکال است. کانتور فشار برای عدد رینولدز ۱۰^۹ به دلیل آشفتگی جریان مقادیر بسیار بزرگتری را نشان می دهد. همانند دو حالت قبل، بیشترین فشار متعلق به دماغه منحنی جلوی کپسول است که مقدار ۴۵ پاسکال و بیشترین میزان افت فشار که برای پشت منحنیهای بالایی و پایینی کپسول است و عدد ۱۰/۲–پاسکال را نشان می دهد.

تحلیل کانتور سرعت نشان میدهد که در لایه مرزی اطراف کپسول کمترین مقدار سرعت رخ میدهد زیرا به دلیل گرادیان فشار معکوس در جلو و پشت کپسول، نقاط سکون در این محلها اتفاق میافتد؛ یعنی، سرعت در این نقاط به صفر میرسد. بیشترین مقدار سرعت هم مطابق شکل در نواحی دور از کپسول اتفاق میافتد که بیشترین مقدار آن برای اعداد رینولدز ^۲۰۰ و ۱۰۳ برابر با ۱۰^{-۴}×۲/۱۸ و ^۳-۱۰×۸/۹۲ متر بر ثانیه است. مقایسه کانتورهای سرعت در این دو عدد رینولدز نشان میدهد که با افزایش عدد رینولدز، ناحیه افت سرعت در جلوی کپسول کوچکتر شده و کاهش سرعت در پشت کپسول اتفاق میافتد کانتور سرعت برای عدد رینولدز ^۹۰۱ که جریان مغشوش است نشان میدهد نقاط سکون در جلو و پشت کپسول اتفاق میافتد اما حداکثر مقدار سرعت به عدد ۱۰^۹ متر بر ثانیه میرسد.

۵-۱- ضریب پسا

تحلیل ضریب پسا برای درک هیدرودینامیک جریان سیالی حول کپسولهای بازگشتی بسیار مفید است. نیروی پسا ناشی از اصطکاک دیواره و تغییرات فشار است و شرایط مرزی تعیینشده در مسأله نقش کلیدی در تحلیل دقیق تر این نیرو ایفا می کند. شرایط مرزی ورودی بر رفتار سیال و توزیع سرعت تأثیر دارد. با فرض سرعت ثابت و یکنواخت در ورودی، می توان به پیش بینی دقیق تری از حرکت جریان به سمت کپسول و تعامل آن با سطح کپسول دست یافت. همچنین، شرایط مرزی خروجی و دیواره نیز در تعیین توزیع فشار و نیروی اصطکاک مؤثر هستند. ضریب درگ برای یک کپسول بازگشتی دوبعدی تفاوتهای قابل توجهی بین رژیمهای جریان آرام و مغشوش نشان می دهد. در جریان آرام، ضریب درگ نسبتا پایداری را به دلیل لایههای مرزی نرم و الگوهای جدایش پیش بینی پذیر نشان می دهند که در آن پسای فشاری به دلیل نواحی بازچرخش پایدار پشت کپسول غالب است. با این حال، مدلهای آرام معمولا ضریب پسا را کمتر از دادههای تجربی پیش بینی می کنند، رزیرا ویژگیهای ناپایدار جریان را به درستی شبیه سازی نمی کنند. در جریان مغشوش، اختلاط بیشتر و تأخیر در جدایش لایه مرزی باعث کاهش پسای فشاری اما افزایش اصطکاک سطحی می شود که منجر به دینامیک پیچیده درگ تحت تأثیر رهاسازی گردابهها و نوسانات موج شو کی می گردد. در اینجا، به دلیل هندسه خاص کپسول بازگشتی، محل جدایش جریان در

محاسبه ضریب پسا برای جریان با سه عدد رینولدز ۱۰^۳، ۱۰^۳ و ۱۰^۶ صورت گرفته است (شکل ۵). مقدار پایدار ضریب پسا برای اعداد رینولدز ۱۰^۳، ۱۰^۳ و ۱۰^۶ به ترتیب برابر با ۱/۶۸۹، ۱/۶۹۷ و ۱/۶۳۳ است که نشان میدهد با افزایش عدد رینولدز ضریب پسا کاهش مییابد. نحوه تغییر این دو پارامتر در شرایط مختلف جریان، غیرخطی و پیچیده است. در جریانهای آرام، ضریب پسا تقریبا ثابت میماند، در حالی که با افزایش عدد رینولدز به محدودههای انتقالی و مغشوش، ضریب پسا نوساناتی را تجربه میکند که ناشی از جدا شدن جریان و تغییرات فشار دینامیکی است.



۱.



شکل ۵- تغییرات ضریب پسا حول کپسول بازگشتی در اعداد رینولدز مختلف.

۵-۲- ضریب فشار

ضریب فشار برای کپسول بازگشتی در جریانهای پایا و تراکمناپذیر بهعنوان یک پارامتر کلیدی در تحلیل دینامیک سیالات تعریف میشود که تغییرات فشار در سطوح کپسول را نسبت به فشار مرجع (عموما فشار آزاد) اندازه گیری می کند. در جریان آرام، لایه مرزی در ناحیه شانه کپسول به طور ناگهانی جدا می شود و یک منطقه بازچرخشی با فشار پایین در بخش پشتی ایجاد می کند که ناشی از تکامل لایه برشی آزاد و اختلاط محدود مومنتوم است. این موضوع باعث افت قابل توجه ضریب فشار در ناحیه پشت کپسول می شود و مقدار آن تحت تأثیر موج انبساطی قرار می گیرد. در مقابل، در جریان مغشوش، اختلاط بیشتر باعث ضخیم تر شدن لایه برشی و کاهش گستره منطقه بازچرخشی می شود و بازیابی فشار پایه را بهبود می بخشد. توزیع ضریب فشار در بخش جلوبی کپسول کمتر به نوع جریان وابسته است و بیشتر تحت تأثیر اثرات تراکم پذیری و برخورد امواج ضربهای قرار دارد. شکل ۶ تغییرات ضریب فشار را در سه عدد رینولدز ۲۰۱٬ ۲۰ و ۲۰۰ نشان می دهد. مشاهده می شود نقطهای که بیشترین فشار را در کپسول متحمل می شود دماغه ی جلوی آن است و حداقل فشار وارده در انحالهای بالایی و پایینی آن اتفاق می افتر.





شکل ۶- تغییرات ضریب فشار حول کپسول بازگشتی در اعداد رینولدز مختلف.

۵–۳– اثر زبری

زبری سطح کپسول میتواند به طرز قابل توجهی بر روی عملکرد آیرودینامیکی آن تأثیر بگذارد. زبریهای سطحی میتوانند بر تشکیل لایه مرزی، تولید آشغنگی و توزیع فشار موثر باشند. به طور کلی، یک سطح زبر سبب افزایش اکتساب و جدایی جریان در نواحی مشخصی میشود که این امر منجر به افزایش نیروی پسا میگردد. زبری بیشتر سطح کپسول معمولا به افزایش اصطکاک در لایه مرزی و در نتیجه افزایش ضریب پسا منجر میشود که این به دلیل ایجاد تنشهای برشی بیشتر بر سطح کپسول است. همچنین، زبری میتواند فرآیند جدایش جریان را به تأخیر بیندازد، که این موضوع در نواحی تحت فشار پایین (ناحیه پشتی کپسول) باعث ایجاد ناحیه خالی و افت فشار میشود. بهعلاوه، این ویژگی زبری میتواند بر تعاملات بین جریان و سطح کپسول تأثیر بگذارد، که به نوبه خود باعث افزایش نیروی پسا خواهد شد. در این پژوهش زبری برابر با ۵/۰ میلیمتر روی سطح کپسول اعمال شده و نتایج تغییرات ضریب پسا در شکل ۷ نشان داده شده است. زبری سطحی همچنین تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و توزیع کانتورهای فشار و سرعت دارند. در سطوح زبر، جریان یه دلیل وجود ناهمواریها د سطح، میتواند به ایری نوی سطحی میتواند بر ایبر به باز در شکل ۷ نشان داده شده است. زبری سطحی همچنین باییر قابل توجهی بر الگوی جریان و توزیع کانتورهای فشار و سرعت دارند. در سطوح زبر، جریان به دلیل وجود ناهمواریها در سطح، میتواند به ایری نوی نوی می کردایی را ایجاد کند. این جریانهای گردابی میتوانند سبب ایجاد نقاط فشار پایین و نیاپیداری های جریان شوند که در نهایت به تغییر کانتورهای فشار منجر میشود. در مقابل، در سطوح صاف یا با زبری کمتر، نیاپیداری میتواند به طور یکنواخت تری بر روی سطح کپسول حرکت کند و کانتورهای فشار و سرعت به طور بهینه تری توزیع نیاپید این رفتار بهویژه در ناحیه پشتی کپسول که احتمال جدایش جریان بیشتر است، اهمیت دارد. حداکثر فشار در ضور نوبری نیری نوبری میتوند در ۲۵/۱ پاسکال کاهش مییابد. مقدار ماکزیمم سرعت هم تا ۸/۸ متر بر ثانیه تغییر زبری نسبت به حالت بدون زبری به مقدار را ۲۵/۱ پاسکال کاهش مییابد. مقدار ماکزیمم سرعت هم تا ۸/۸ متر بر ثانیه تغییر



شکل ۷- تأثیر زبری سطح بر تغییرات ضریب پسا حول کپسول بازگشتی در عدد رینولدز ۱۰^۳.

۶- نتیجه گیری

این پژوهش به تحلیل تأثیر زبری سطح بر ضریب پسا، ضریب فشار و رفتار دینامیک جریان اطراف کپسولهای بازگشتی پرداخته است. نتایج شبیهسازیهای عددی نشان میدهند که زبری سطح بهطور قابل توجهی بر نیروی پسا و ویژگیهای لایه مرزی تأثیر میگذارد. نتایج عمده پژوهش حاضر به شرح زیر است:

- بر اساس دادههای بهدست آمده برای سه عدد رینولدز مختلف، نتایج نشان دهنده کاهش ضریب پسا با افزایش عدد رینولدز است. همچنین، در شرایط زبری، نیروی پسا به طور میانگین ۱۵ درصد بیشتر از شرایط صاف است.
- در دماغه منحنی جلوی کپسول بیشترین فشار وجود دارد که برای عدد رینولدز ۱۰۲ این مقدار تا ۲۰-۱۰×۳/۹۷ پاسکال افزایش مییابد. این مقدار افزایش فشار در عدد رینولدز ۱۰۳ به ۲۰۰×۴/۸۳ پاسکال میرسد که نشان میدهد در جریان آرام با افزایش عدد رینولدز، میزان فشار در دماغه منحنی جلوی کپسول افزایش مییابد. در اعداد رینولدز ۱۰^۲ و ۱۰۳ کمترین فشار بهترتیب برابر با ۲۰۰×۲/۲۴ و ۲۰۰×۹۰/۴ پاسکال است.
- مقدار پایدار ضریب پسا برای اعداد رینولدز ۱۰^۲، ۱۰^۴ و ۱۰^۴ به ترتیب برابر با ۱/۶۹، ۱/۶۹ و ۱/۶۳ است که نشان میدهد با افزایش عدد رینولدز ضریب پسا کاهش مییابد.
- نقطه ای که بیشترین فشار را در کپسول متحمل می شود دماغه ی جلوی آن است و حداقل فشار وارده در انحناهای بالایی و پایینی آن اتفاق می افتد.
- زبری سطح کپسول تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آیرودینامیکی آن دارد. زبریهای سطحی میتوانند بر تشکیل لایه مرزی، تولید آشفتگی و توزیع فشار مؤثر باشند. در این پژوهش، زبری برابر با ۰/۵ میلیمتر روی سطح کپسول اعمال شده و نتایج نشان میدهد که این زبری سبب افزایش ضریب پسا و تغییر در الگوی جریان و توزیع کانتورهای فشار و سرعت میشود.

علائم و اختصارات

Α مساحت مبنا C_D ضريب پسا D قطر كپسول بازگشتي شتاب جاذبه g L طول کپسول بازگشتی طول قسمت مخروطي كپسول بازگشتي L_C جرم کپسول بازگشتی т Р فشار Pr عدد پرانتل R_e شعاع زمين R_n شعاع دماغه كپسول بازگشتي شعاع جانبی کپسول بازگشتی R_s S مساحت سطح کپسول t زمان زاويه حمله α زاویه قسمت مخروطی کپسول بازگشتی θ_{C} زاویه قسمت کروی دماغه کپسول بازگشتی θ_n لزجت ديناميكى μ چگالی ρ

واژەنامە

Re-entry capsule کپسول بازگشتی Drag coefficient مریب پسا Pressure coefficient کردابه Vortex مدل اغتشاشی [1] K. Hiraki, Y. Inatani, "The aerodynamic database for asteroid sample return capsule," *ISAS Report SP*, vol. 17, pp. 345-363, 2003.

[2] R. Mehta, "Influence of geometrical parameters of reentry capsules on flow characteristics at Mach 6," *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, vol. 11, p. 177, 2024.

[3] P.A. Boeder, C.E. Soares, "Mars 2020: mission, science objectives and build, Systems Contamination: Prediction, Control, and Performance," *SPIE*, pp. 1148903, 2020.

[4] G. Pezzella, A. Viviani, "Aerodynamic analysis of a manned space vehicle for missions to Mars," *Journal of Thermodynamics*, vol. 2011, pp. 857061, 2011.

[5] B. Sun, W. Chen, C. Huang, Y. Long, W. Diao, H. Zhang, "Study on the aerodynamic characteristics of reentry capsule with obtuse head inverted cone under hypersonic chemical nonequilibrium flow," *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing*, p. 012085, 2024.

[6] S. Dutta, C.D. Karlgaard, D. Kass, M. Mischna, G.G. Villar, "Postflight Analysis of Atmospheric Properties from Mars 2020 Entry, Descent, and Landing," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 60, pp. 1022-1033, 2023.

[7] P. Priyadarshi, S. Mittal, "Multi-objective Multi-disciplinary Design Optimization of a Semi-Ballistic Reentry Module," 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference, p. 9127, 2010.

[8] H.J. Allen, A.J. Eggers Jr, "A study of the motion and aerodynamic heating of ballistic missiles entering the earth's atmosphere at high supersonic speeds," 1958.

[9] T. Babineaux, J. Brayshaw Jr, B. Dayman Jr, D. Nelson, "The influence of shape on aerodynamic damping of oscillatory motion during planet atmosphere entry and measurement of pitch damping at large oscillation amplitudes, (1963).

[10] E. Resler Jr, W. Sears, "The prospects for magneto-aerodynamics," *Journal of the Aerospace Sciences*, vol. 25, pp. 235-245, 1958.

[11] V.S. Aslanov, "Swing principle for deployment of a tether-assisted return mission of a re-entry capsule," *Acta Astronautica*, vol. 120, pp. 154-158, 2016.

[12] J.W. Keyes, J.N. Hefner, "Effect of forward-facing jets on aerodynamic characteristics of blunt configurations at Mach 6," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 4, pp. 533-534, 1967.

[13] A. Fedele, S. Carannante, M. Grassi, R. Savino, "Aerodynamic Control System for a Deployable Re-entry Capsule," *Acta Astronautica*, vol. 181, pp. 707-716, 2021.

[14] S.E. Cliff, S.D. Thomas, "The Apollo capsule optimization for improved stability and computational/experimental data comparisons," 2005.

[15] X. Yang, R. Radespiel, "Longitudinal aerodynamic performance of the Apollo entry capsule near transonic speeds," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 54, pp. 1100-1109, 2017.

[16] J.M. Brock, E.C. Stern, M.C. Wilder, "Computational fluid dynamics simulations of supersonic inflatable aerodynamic decelerator ballistic range tests," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 56, pp. 526-535, 2019.

[17] E. Stern, V. Gidzak, G. Candler, "Estimation of dynamic stability coefficients for aerodynamic decelerators using CFD," 30th AIAA Applied Aerodynamics Conference, p. 3225, 2012.

[18] L.N.P. Peri, A. Ingenito, P. Teofilatto, "Large-Eddy Simulations of a Hypersonic Re-Entry Capsule Coupled with the Supersonic Disk-Gap-Band Parachute," *Aerospace*, vol. 11, p. 94, 2024.

[19] L. Placco, M. Cogo, M. Bernardini, A. Aboudan, F. Ferri, F. Picano, "Large-Eddy Simulation of the unsteady supersonic flow around a Mars entry capsule at different angles of attack," *Aerospace Science and Technology*, vol. 143, pp. 108709, 2023.

[20] K. Edquist, P. Desai, M. Schoenenberger, "Aerodynamics for the Mars Phoenix Entry Capsule, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit," AIAA2008G7219, 2008.

[21] D. Dirkx, E. Mooij, "Continuous aerodynamic modelling of entry shapes," AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, p. 6575, 2011.

[22] S.P. Singh, S. Mittal, "Flow past a cylinder: shear layer instability and drag crisis," *Int J Numer Meth Fluids*, vol. 47, pp. 75–98, 2005.