

تحلیل آیرودینامیکی یک کپسول بازگشت به جو با در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشی

حمیده منصوری^۱، سحر نوری^۲، سجاد قاسملوی^۳

۱ کارشناس ارشد، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲ استادیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، s_noori@aut.ac.ir

۳ استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۲۰

چکیده

در طراحی پرتابه‌های سرعت بالا، تحلیل آیرودینامیکی و گرمایشی حائز اهمیت است. انتقال حرارت تشعشی، برای کپسول‌هایی که به اتمسفر زمین وارد می‌شوند، به صورت تقریبی بین ۱۰ تا ۴۰ درصد انتقال حرارت کل را تشکیل می‌دهد. بنابراین لحاظ کردن انتقال حرارت تشعشی در محاسبات جریان‌های ماوراء صوت، ضروری است. در این تحقیق، جریان ماوراء صوت آرام سه بعدی با فرض گاز ایده‌آل با ماخ‌های ۳۰ و ۳۲/۸ مورد بررسی قرار گرفته است و برای محاسبه تشعشع، مدل تشعشی دسته‌بندی گسسته انتخاب شده که از معادله انتقال تابشی استفاده می‌کند و با دریافت ضریب جذب، ضریب شکست، دما و طول موج به عنوان ورودی، تشعشع در زوایای فضایی مختلف را محاسبه می‌کند. در نهایت، کانتورهای دما و فشار، در دو حالت با لحاظ انتقال حرارت تشعشع و بدون لحاظ آن مقایسه شده‌اند. طبق نتایج به دست آمده، با اضافه کردن تشعشع به حل، دما به میزان ۲۷ درصد و فشار به میزان ۲ درصد کاهش پیدا می‌کند که به دلیل لحاظ کردن شرط مرزی فشار دور دست است که برای دیواره به عنوان سیستم خنک‌کاری عمل می‌کند. باید توجه داشت که طراحی مکانیزم خنک‌کاری برای دیواره، ضروری و تا چه اندازه در نتایج موثر است که در صورت عدم لحاظ آن، طبق نتایج عددی، خطای قابل‌توجهی به وجود خواهد آمد.

واژگان کلیدی

انتقال حرارت تشعشی، ضریب جذب، طول موج، کپسول، ماورای صوت.

۱. مقدمه

مشتری و دیگر سیارات ادامه پیدا کرده‌اند. خطرناک‌ترین مرحله‌ی بازگشت به زمین، ورود به اتمسفر زمین است و در این وضعیت،

ماموریت‌های کپسول‌های بازگشت به جو، قدیمی‌ترین ماموریت‌های فضایی هستند که از اکتشاف ماه تا سفر به مریخ و

انتقال حرارت تشعشعی برای کپسول‌هایی که به اتمسفر زمین وارد می‌شوند، به صورت تقریبی بین ۱۰ تا ۴۰ درصد انتقال حرارت کل را تشکیل می‌دهد [۱]. به علاوه، کاوشگرها در اتمسفر زمین سرعتی بالای ۱۲ کیلومتر بر ثانیه دارند، بنابراین عدد ماخ آنها غالباً تا ۴۰ هم می‌تواند افزایش یابد [۲]. نتیجه این سرعت‌های ماوراء صوت و ارتفاعات بالا، تغییر در وضعیت جریان در لایه شوک است که باعث افزایش دمای جریان می‌شود. با افزایش شدید دما در پشت موج شوک، انرژی ارتعاشی مولکول‌های اتمسفر افزایش می‌یابد و توانایی گازها در جذب و گسیل تشعشع در لایه‌ی مرزی و لایه شوک افزایش می‌یابد که عامل ایجاد انتقال حرارت تشعشعی شدید در پشت موج شوک و به خصوص نوک دماغه جسم است که می‌تواند باعث آسیب دیدن سیستم حفاظت حرارتی و قطع ارتباطات راداری کپسول بازگشت به جو شود. از آن جایی که انتقال حرارت جابه‌جایی با توان یکم دما و انتقال حرارت تشعشعی با توان چهارم دما رابطه مستقیم دارد، اهمیت نرخ انتقال حرارت تشعشعی در نقطه سکون، می‌تواند از نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی بیشتر شود. بنابراین در صورت عدم لحاظ کردن انتقال حرارت تشعشعی در محاسبات در جریان‌های ماوراء صوت، خطای بزرگی در نتایج به دست آمده، به وجود خواهد آمد [۳]. علاوه بر ماموریت‌های کپسول‌های بازگشت به جو، در بسیاری از وسایل مانند نازل راکت‌ها که در دماهای بالا کار می‌کنند، انتقال حرارت تشعشع نقش مهمی را ایفا می‌کند. در طول سال‌های اخیر، علاوه بر اهمیت تشعشع در بسیاری از وسایل، مطالعه‌ی انتقال انرژی در محیط‌هایی که قابلیت جذب، گسیل و پراکندگی تشعشع را دارند، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. تشعشع در بسیاری از پدیده‌ها از قبیل انفجار هسته‌ای، لایه‌های شوک در جریان ماوراء صوت و سیستم‌های عایق حرارتی دیده می‌شود و در هر یک از این زمینه‌ها مطالعات بسیاری صورت گرفته است. برای مثال، تشعشع گازها بیش از صد سال است که مورد توجه و بررسی دانشمندان قرار گرفته است و یکی از ملاحظات در نظر گرفته شده در این زمینه، جذب تشعشع در اتمسفر زمین است [۴]. همان‌طور که اشاره شد، علی‌رغم کاربرد فراوان تشعشع و اهمیت لحاظ کردن این نوع انتقال حرارت در محاسبات، دو مشکل اساسی وجود دارد. یکی اینکه انرژی‌های جذب و گسیل فقط در مرزهای سیستم اتفاق نمی‌افتد، بلکه در

تمام نقاط محیط، جذب و تشعشع اتفاق می‌افتد و حل دقیق و کامل، نیاز به مشخصات سیستم مانند دما در هر نقطه را دارد.

دومین مشکل این است که تشعشع گاز به شدت به طول موج وابسته است و این در هر بازه‌ی طول موجی متفاوت است [۴]. ناحیه‌ی طول موجی حرارت تشعشعی، شامل ناحیه‌ی فرابنفش^۱، نور مرئی^۲ در بازه طول موجی ۰/۴ تا ۰/۷ میکرومتر و ناحیه‌ی فرورسرخ^۳ می‌شود که تا طول موج ۱۰۰ میکرومتر را در بر می‌گیرد [۵]. بنابراین با توجه به وابستگی تشعشع گاز به طول موج، تشعشع در طول موج‌های خاصی دارای مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌شود. علاوه بر آن، محاسبات انتقال حرارت تشعشعی، پیچیده و غیرخطی است، اما با توجه به اهمیت آن در ماموریت کپسول‌های بازگشت به جو، باید از انواع روش‌های مختلف از قبیل روش‌های عددی و یا تجربی محاسبه شوند. روش‌های تجربی شامل تست‌های پروازی و تونل باد هستند، اما این روش‌ها دارای معایبی از قبیل هزینه بالا هستند و در تمامی شرایط پروازی قابل انجام نیستند [۱]. در آیرودینامیک ماوراء صوت، تاکید بیشتر بر روی روش‌های عددی به عنوان یک روش برای پیش‌بینی محیط‌های ماوراء صوت دما بالا است [۱].

طی سال‌های اخیر محققان زیادی در زمینه‌ی انتقال حرارت تشعشعی اجسام بازگشت به جو، تحقیق و بررسی انجام داده‌اند. در سال ۱۹۶۵، فضاییمای فایبر^۲، با تجهیزات اندازه‌گیری تشعشع به منظور محاسبه انتقال حرارت تشعشعی پرواز کرد. در این شرایط، شدت تشعشع در نقطه سکون و در بازه طول موجی ۰/۲ تا ۴ میکرومتر اندازه‌گیری شد. این دستگاه اندازه‌گیری، مقدار تشعشع را در یک زاویه فضایی کوچک اندازه‌گیری کرد. علاوه بر این اندازه‌گیری، با استفاده از دستگاه مونوکروماتور، در بازه طول موجی ۳۰۰ تا ۶۰۰۰ آنگستروم، شدت تشعشع اندازه‌گیری شد که هر دو اندازه‌گیری انجام شده موفق بودند [۶]. در ادامه‌ی این تحقیقات، پارک (۲۰۰۱)، انتقال حرارت تشعشعی کپسول آپولوی ۴ را مورد بررسی قرار داد. برای انجام محاسبات، ابتدا داده‌های مربوط به محاسبه‌ی تشعشع، از موسسه‌ی بین‌المللی استاندارد و تکنولوژی دریافت شد که صحت اطلاعات موجود سنجیده شود. در این محاسبات از مدل میدان جریان و روش محاسبات خط به خط تشعشع استفاده شد. این کد کامپیوتری، مشخصات ترمودینامیکی، مانند چگالی ذرات را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و مقدار تشعشع را به صورت طیفی محاسبه می‌کند. در

طول موجی ۸۰۶-۲۳۰ نانومتر محاسبه شد و شبیه‌سازی به صورت سه بعدی و با استفاده از حل معادلات ناویر استوکس در حالت غیرتعادلی انجام شد [۱۱]. در تحقیق دیگری سورژیکو (۲۰۱۷)، با استفاده از حل عددی، انتقال حرارت تشعشی کپسول بازگشت به جو آپولوی ۱۷ را در طول مسیر پروازی با استفاده از کد سه بعدی NERAT و ASTEROID محاسبه کرد که جریان را به صورت غیرتعادلی در نظر می‌گیرد و کد ASTEROID، با توجه به طیف‌های طول موجی مختلف، داده‌های تشعشی را در دسترس قرار می‌دهد [۱۲].

در تحقیق حاضر، بررسی و تحلیل دما و فشار با در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشی و مقایسه آن با حالت بدون فعال سازی مدل تشعشی با فرض گاز ایده‌آل برای هندسه ای با نوک پیک با ماخ های ۳۰ و ۳۲/۸ و زاویه حمله‌ی ۲۵ درجه صورت گرفته است. جهت حل میدان از معادلات ناویراستوکس و معادلات تشعشی مدل دسته‌بندی گسسته استفاده شده است و شبیه‌سازی مورد نظر در نرم‌افزار تجاری فلوئنت انجام شده است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی اهمیت لحاظ کردن انتقال حرارت تشعشی علاوه بر انتقال حرارت جابه جایی در کپسول های بازگشت به جو با سرعت بالا است که در بعضی موارد تحقیقاتی در ایران از آن صرف نظر می‌شود. طبق نتایج عددی به دست آمده، لحاظ کردن انتقال حرارت تشعشی در محاسبات، تغییرات قابل ملاحظه ای را در دما و فشار ایجاد می‌کند که در صورت عدم لحاظ آن، خطای قابل توجهی در نتایج به دست آمده ایجاد خواهد شد. به علاوه، طبق بررسی های انجام شده بر روی تمامی مراجع در دسترس، اندازه گیری انتقال حرارت تشعش کپسول های بازگشت به جو یا به صورت تجربی و توسط تجهیزات اندازه گیری تشعش اندازه گیری شده است و یا از روش‌های عددی در نرم افزارهایی استفاده شده است که بعضی در ایران قابل دسترس نیستند و این برای اولین بار است که محاسبه انتقال حرارت اجسام بازگشت به جو، توسط مدل تشعشی انتقال گسسته در نرم افزار فلوئنت انجام شده است. این مدل کامل ترین روش حل را نسبت به دیگر روش های حل مانند مدل سطح به سطح و پی-۱ و بقیه ی مدل ها ارائه می‌دهد، چون تشعشع را در تمامی زوایای بازه ی ۰ تا ۴π مورد بررسی قرار می‌دهد، از دقت بالایی برخوردار است و از کامل ترین و دقیق ترین رابطه ی محاسباتی تشعشع استفاده می‌کند. به علاوه این نرم افزار، از نرم افزارهایی است که در

نهایت نتایج به دست آمده از روش مذکور، با داده‌های پروازی مقایسه شدند و نشان داده شد که این روش از دقت قابل قبولی برخوردار است [۷]. در داخل کشور نیز تحقیقاتی در زمینه مدل سازی انتقال حرارت تشعشی انجام شده است ولی همگی آن ها به بررسی این انتقال حرارت در محفظه های احتراق پرداخته‌اند و تا کنون در داخل کشور، در زمینه انتقال حرارت تشعشع اجسام بازگشت به جو مدل سازی صورت نگرفته است. در این راستا می‌توان به مدل‌سازی انتقال حرارت تشعشی در یک محفظه‌ی احتراق استوانه ای توسط علی پور و باقری (۲۰۰۴) اشاره کرد. در این تحقیق برای محاسبه انتقال حرارت تشعشع از روش های رزلند، پی-۱، انتقال گسسته و دسته‌بندی گسسته در نرم‌افزار تجاری فلوئنت استفاده شده است. در تمام روش‌های فوق گاز به صورت حقیقی در نظر گرفته شده است و به منظور مدل‌سازی از گاز خاکستری استفاده شده است [۸]. در تحقیق دیگری، میروف (۲۰۱۰)، یک سپر حرارتی بهینه برای کپسول آپولوی ۴ طراحی کرد و با استفاده از کد دی-پی-ال-آر^۴ که در مرکز تحقیقاتی ناسا گسترش پیدا کرده بود، انتقال حرارت تشعشی و همچنین انتقال حرارت جابه جایی را برای کپسول آپولوی ۴ محاسبه کرد. کد دی-پی-ال-آر معادله ناویراستوکس سه بعدی را به صورت ضمنی حل می‌کند. این کد، با زبان فرترن ۹۰ نوشته شده است که جریان را به صورت پیوسته و در حالت غیر تعادلی در نظر می‌گیرد و توانایی محاسباتی بالایی را برای اجسام با نوک پیک را دارد [۹]. پادوپولو (۲۰۱۳)، با استفاده از حل عددی، کپسول بازگشت به جو آپولوی ۴ را در نقاط پروازی که دارای بیشترین مقدار شار حرارتی بودند، مدل‌سازی کرد. به منظور حل دقیق میدان جریان، باید اثرات تشعشی و همچنین اثرات سپر حرارتی^۵ در نظر گرفته می‌شدند تا مقدار دقیقی از شار حرارتی جابه جایی و تشعشی را در اختیار قرار دهند. شبیه‌سازی به صورت دو بعدی و سه بعدی و با استفاده از حل معادلات ناویر استوکس در حالت غیرتعادلی و با فرض جریان آرام در نرم‌افزار تجاری ++cfd انجام شدند. برای این شبیه‌سازی از کد ایلیمیر^۶ استفاده شده است که کد شبیه‌سازی جریان تراکم پذیر در حالت گذرا است [۱۰]. مارتین (۲۰۱۵)، برای کپسول بازگشت به جو استاردوست، یک سپر حرارتی طراحی کردند و اثرات گازهای وارد شده از سپر حرارتی به میدان خارجی، بر روی انتقال حرارت کل را مورد بررسی قرار دادند. انتقال حرارت کل، در شش نقطه از مسیر پروازی در بازه ی

کشور قابل دسترس است و نتایج عددی با دقت بالایی را در دسترس قرار می‌دهد، در صورتی که برخی نرم افزارهای پیشرفته محاسبه تشعشع در ایران قابل دسترس نیست. علاوه بر لحاظ کردن شدت تشعشع در محاسبات، در این تحقیق، یک سیستم خنک‌کاری برای دیواره طراحی شده است. استفاده از مکانیزم خنک‌کاری برای دیواره، دما و فشار را به دمای واقعی نزدیک تر می‌کند. بنابراین، باید توجه داشت که علاوه بر لحاظ کردن شدت تشعشع، لحاظ کردن تبادل حرارت بین دیواره و محیط، تا چه اندازه در نتایج موثر است و عدم لحاظ آن باعث بروز خطا در محاسبه ی دما و در نهایت انتقال حرارت تشعشع خواهد شد.

۲. انتقال حرارت تشعشع

برای شبیه‌سازی انتقال حرارت تشعشع پنج روش مورد استفاده قرار می‌گیرد که به شرح زیر می‌باشند:

۱. مدل تشعشعی پی-۱ تکراری
۲. مدل تشعشعی سطح به سطح^۷
۳. مدل تشعشعی رزلند^۸
۴. مدل تشعشعی انتقال گسسته^۹
۵. مدل تشعشعی دسته‌بندی گسسته^{۱۰}

از میان پنج مدل تشعشعی، تنها مدل تشعشعی دسته‌بندی گسسته مورد استفاده قرار می‌گیرد و سایر مدل‌ها به دلایل زیر حذف خواهند شد:

- مدل تشعشعی سطح به سطح برای این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، به این علت که هدف اصلی محاسبه‌ی تشعشع گاز، اطراف کپسول بازگشت به جو می‌باشد و از محاسبه تشعشع دیواره‌های کپسول به یکدیگر صرف نظر شده است.
- مدل تشعشعی رزلند، برای شبیه‌سازی‌های باحلالگر بر مبنای فشار مناسب است، در صورتی که در این شبیه‌سازی از حلگر بر مبنای چگالی استفاده شده است.
- از مدل تشعشعی انتقال گسسته، نمی‌توان در پردازش موازی استفاده نمود و تنها در پردازش سری مورد استفاده است.

- مدل تشعشعی پی-۱، برای ضخامت‌های اپتیکی بزرگ تر از ۱ مناسب است، در حالی که در این تحقیق، ضخامت اپتیکی ۰/۰۰۹۹ است که در بازه ضخامت اپتیکی مدل تشعشعی پی-۱ نیست. بنابراین مدل پی-۱ برای شبیه‌سازی مورد نظر مناسب نمی‌باشد. مدل تشعشعی دسته‌بندی گسسته، یکی از پنج مدل

اصلی شبیه‌سازی تشعشع می‌باشد که از معادله انتقال تابشی برای محاسبه شدت تشعشع استفاده می‌کند. این مدل، معادله انتقال تابشی را برای تعداد محدودی از زاویه فضایی حل می‌کند. معادله انتقال تابشی، شدت تشعشع در هر موقعیتی در یک مسیر دارای جذب، گسیل و یا پراکندگی را محاسبه می‌کند. معادله انتقال تابشی برای محیطی با خاصیت جذب، تابش و پراکندگی در موقعیت \vec{r} و جهت \vec{s} به صورت رابطه (۱) است [۴]:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (1)$$

در این رابطه، \vec{r} بردار موقعیت، \vec{s} بردار جهت، \vec{s}' بردار جهت پراکندگی، s طول مسیر، a ضریب جذب، n ضریب شکست، σ_s ضریب پراکندگی، Ω' زاویه فضایی و ϕ تابع فاز^{۱۱} می‌باشد. تابع فاز، توزیع زاویه‌ای شدت تشعشع پراکنده شده به وسیله‌ی ذرات در طول موج مشخص شده می‌باشد. در واقع تابع فاز، شدت تشعشع پراکنده شده در یک جهت، نسبت به کل شدت تشعشع پراکنده شده در تمامی جهات می‌باشد.

برای محاسبه ی شدت تشعشعی در یک محیط، در ابتدا، داده‌هایی به عنوان ورودی به معادله ی انتقال تابشی داده می‌شود که در بخش حل جریان به نحوه ی محاسبه ی مقدار هر یک از آن‌ها اشاره شده است و پس از انجام محاسبات، شدت تشعشعی I به عنوان خروجی محاسبه می‌شود. ورودی و خروجی‌های معادله به صورت شرح زیر می‌باشند:

ورودی‌های معادله:

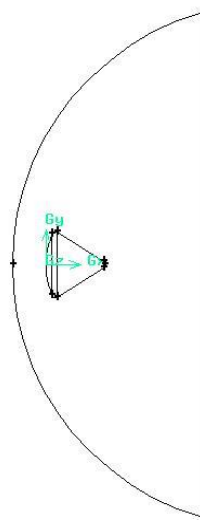
- ضریب جذب
- ضریب شکست
- زاویه فضایی
- دما
- خروجی معادله:
- شدت تشعشع

۳. حل عددی

برای حل میدان جریان و محاسبه انتقال حرارت، لازم است که ابتدا میدان جریان با استفاده از شبکه بندی مناسب گسسته سازی شود و سپس معادلات ناویراستوکس حل گردند.

۳-۱. هندسه و شبکه محاسباتی

هندسه‌ی مخروطی با نوک پخ با زاویه نیم راس ۳۳ درجه و شعاع نوک ۰/۲۳ و طول ۳/۴۳۰۶ متر که مشابه هندسه فضاپیماى آپولوى ۴ است در نرم‌افزار گمبیت ترسیم شده که در شکل ۱، هندسه و دامنه‌ی اطراف کپسول نشان داده شده است. دامنه‌ی اطراف کپسول به صورت متقارن ترسیم شده است و اگر طول هندسه، L در نظر گرفته شود، مطابق شکل، بیشتر ین مقدار طول دامنه در جهت x ، $3/2L$ و در جهت محور y ، $8/8L$ است.



شکل ۱. دامنه اطراف کپسول بازگشت به جو

به منظور اطمینان از شبکه، باید استقلال حل از شبکه مورد بررسی قرار بگیرد. به این منظور، از نرخ انتقال حرارت در نقطه‌ی سکون استفاده شده است. این انتخاب به علت حساس بودن نرخ انتقال حرارت به شبکه حل می‌باشد. جدول ۱، تغییرات نرخ انتقال حرارت نقطه‌ی سکون بر اساس تعداد کل سلول‌های شبکه را نمایش می‌دهد. طبق داده‌های جدول ۱، شبکه ۲ و ۳ از نظر نرخ انتقال حرارت در نقطه سکون حدود ۰/۱ درصد دارای اختلاف هستند، که نشان دهنده استقلال شبکه از حل است. بنابراین برای کاهش زمان محاسبات، شبکه ۲، به عنوان مناسب‌ترین شبکه انتخاب می‌شود.

جدول ۱. بررسی استقلال حل از شبکه

شبکه	تعداد سلول	ضخامت اولین سلول (m)	انتقال حرارت (w/m^2)
۱	۸۲۵۱۲	۰/۰۰۱	۱۷۱۴۳۴۵
۲	۱۶۰۱۵۵۹	۰/۰۰۰۵	۲۲۹۱۲۹۶
۳	۲۱۵۷۶۳۲	۰/۰۰۰۲	۲۲۹۵۰۸۱

۳-۲. حل جریان

در این تحقیق، معادلات سه بعدی جریان تراکم‌پذیر و لزج و پایا در جریان اطراف کپسول بازگشت به جو حل می‌شود. با توجه به فرض تراکم‌پذیری جریان در سرعت‌های بالا و همچنین حل انتقال حرارت، معادله انرژی علاوه بر معادله‌ی مومنتوم و بقای جرم حل خواهد شد. معادلات حاکم بر جریان در ادامه ارائه می‌شوند [۳]. معادله بقای جرم و مومنتوم و انرژی به ترتیب به صورت زیر می‌باشند:

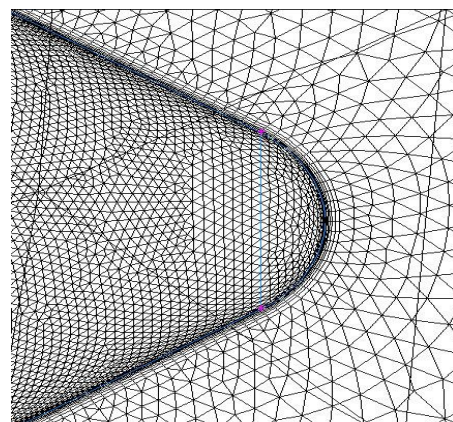
$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + P)) \quad (4)$$

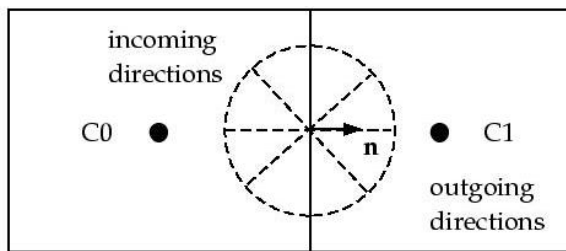
که در معادله (۲)، چگالی و v سرعت است. در معادله‌ی (۳) و (۴)، P فشار، $\vec{\tau}$ تانسور تنش، K_{eff} هدایت گرمایی موثر، J_j دبی پخش عناصر j است. ترم‌های سمت راست معادله (۴)، به ترتیب انتقال انرژی ناشی از هدایت، پخش عناصر و اتلاف لزجت را نشان می‌دهد. به منظور حل معادلات حاکم بر جریان، باید مرزهای میدان محاسباتی تعیین گردد که در تحقیق حاضر، از

به منظور تولید شبکه‌ی محاسباتی، از نرم‌افزار تولید شبکه‌ی گمبیت استفاده شده است. در این تحقیق، شبکه بندی میدان به دو بخش شبکه بی‌سازمان و شبکه‌ی لایه مرزی نزدیک بدنه تقسیم شده است. شکل ۲، شبکه بندی اطراف جسم و میدان را نشان می‌دهد.



شکل ۲. توزیع شبکه روی هندسه

که در این رابطه، S مساحت کره و R شعاع کره است. هر 90° درجه که برابر یک هشتم از زاویه فضایی 4π که از مرکز کره دیده می‌شود، است، می‌تواند به تعدادی زاویه θ و ϕ برای زوایای کنترلی ω_i تقسیم شود. در حالت سه‌بعدی، θ و ϕ می‌تواند در 8 جهت حل شود، اما در حالت دوبعدی، زاویه‌ای که از مرکز دایره دیده می‌شود، 2π استرادیان است و زوایای θ و ϕ می‌تواند در 4 جهت حل شود [۱۳]. برای اندازه‌گیری دقیق این دو زاویه، معیاری برای دقت اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. با توجه به فرضیات نرم‌افزار، برای تنظیم θ و ϕ ، مقدار 4 فرض خوبی است، اما برای تنظیم این مقدار بالای 5 ، می‌توان جواب قابل اطمینانی را برای محاسبه انتقال حرارت تشعشع به دست آورد که با توجه به تعداد شبکه‌بندی بالا و سه‌بعدی بودن مساله، این مقدار 6 در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت، زمانی که شبکه با سازمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، این امکان وجود دارد که مقادیر θ و ϕ برای گسسته‌سازی زاویه‌ای با سلول‌های شبکه مورد استفاده مطابق شکل ۴ به صورت هم تراز قرار بگیرد.



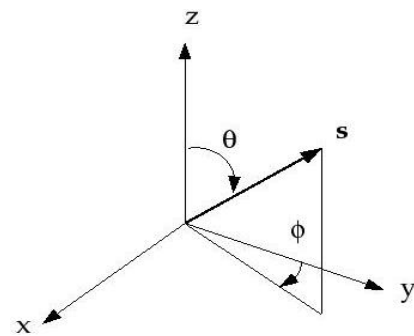
شکل ۴. سطح بدون ناحیه غیر هم تراز [۱۳]

اما زمانی که از شبکه بی‌سازمان استفاده می‌شود، اگر هر یک از سلول‌های شبکه، یک حجم کنترل در نظر گرفته شود، سطح هر حجم کنترلی با مقادیر θ و ϕ برای گسسته‌سازی زاویه‌ای فضایی هم تراز نمی‌شود، که باعث ایجاد یک ناحیه غیرهم تراز می‌شود که اثرات این ناحیه به صورت شبکه بندی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در انجام شبکه‌بندی، هر ناحیه غیر هم تراز می‌تواند به چندین زاویه θ_p و ϕ_p کوچک تقسیم شود. ناحیه غیرهم‌تراز همچنین می‌تواند در اثر بازتاب تشعشع از سطح به وجود بیاید، بنابراین لحاظ کردن یک شبکه بندی مناسب برای ناحیه غیر هم تراز ضروری است [۱۳]. شکل ۵ سطح در حضور ناحیه غیر هم تراز و شکل ۶ نحوه‌ی شبکه‌بندی ناحیه غیرهم‌تراز را در نرم‌افزار

شرط مرزی فشار دور دست^{۱۲} و شرط متقارن^{۱۳} استفاده شده است. همچنین جهت مدل‌سازی انتقال حرارت، از شرط مرزی دیواره با دمای ثابت روی هندسه استفاده شده است. برای حل معادلات جریان از حل‌گر بر مبنای چگالی^{۱۴} استفاده شده است. این نوع حل‌گر، برای سرعت‌های بالا و جریان‌های تراکم‌پذیر و برای مسائلی که تغییرات چگالی در میدان زیاد است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شبیه‌سازی مورد نظر، هوا به عنوان گاز ایده‌آل فرض می‌شود که دارای ضریب فشار ثابت و هدایت حرارتی ثابت است و از مدل ساترلند^{۱۵} برای محاسبه‌ی لزجت آن، استفاده می‌شود. برای حل میدان جریان، از روش ضمنی و برای محاسبه‌ی شارها از روش AUSM استفاده می‌شود که مناسب جریان‌های سرعت بالا است و عدد کورنت نیز 0.1 می‌باشد. برای مقداردهی اولیه^{۱۶} نیز، از روش حل استاندارد استفاده می‌شود که از فشار دور دست محاسبه می‌شود.

۳-۳. انتخاب پارامترهای تشعشی

مدل تشعشی دسته‌بندی گسسته، برای محاسبه‌ی دقیق انتقال حرارت تشعشی، زوایای θ و ϕ و همچنین تقسیم‌بندی شبکه-ای^{۱۷} مربوط به هر یک از آن‌ها را مورد استفاده قرار می‌دهد که در ادامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. مطابق شکل ۳، θ زاویه‌ی پرتوی تشعشی نسبت به محور Z و ϕ ، زاویه‌ی پرتوی تشعشی با محور y است.

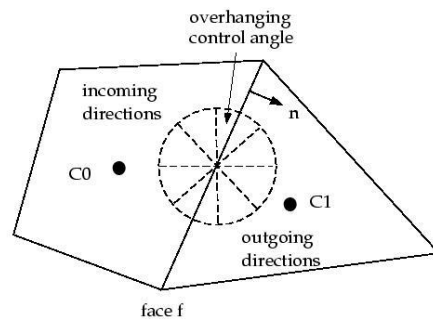


شکل ۳. نمایش زوایای θ و ϕ در دستگاه مختصات [۱۳]

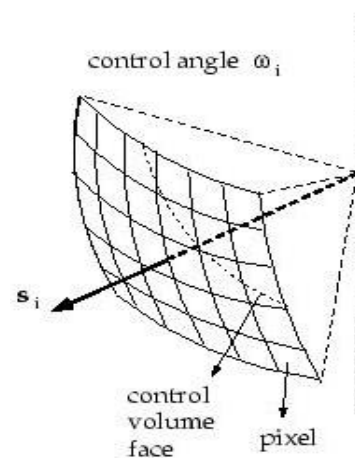
اگر فضای اطراف، یک کره واحد در نظر گرفته شود، زاویه فضایی کل که از مرکز کره دیده می‌شود، طبق رابطه (۵)، 4π استرادیان است. زاویه‌ی فضایی برای کره واحد به صورت رابطه (۵)، تعریف می‌شود:

$$S = 4\pi R^2 = 4\pi \quad (5)$$

زاویه‌ای که از مرکز دایره دیده می‌شود، $\pi/2$ استرادیان است و زاویه‌ای θ و Φ می‌تواند در ۴ جهت حل شود [۱۳].



شکل ۵. سطح با وجود ناحیه غیر هم تراز [۱۳]



شکل ۶. شبکه بندی ناحیه غیر هم تراز [۱۳]

حالت غیر تعادلی باشد، در این راستا سه ضریب جذب مختلف $0.0055, 0.00275, 0.0011/m$ ، برای گاز کامل در نظر گرفته شد که پس از بررسی انتقال حرارت تشعشی در هر یک از موارد، ضریب جذبی انتخاب شد که دارای کمترین مقدار خطا نسبت به انتقال حرارت تشعشی در مقایسه با مرجع [۹] بود. در نهایت ضریب جذب گاز کامل در تحقیق حاضر 0.0011 در نظر گرفته شد. همچنین، با توجه به این که ضریب تابش دیواره طبق مرجع [۱۰]، 0.8 است و یکی از الزامات کنترل حرارتی برای دیواره های هر فضایی این است که نسبت ضریب جذب به تشعشع 0.4 می‌باشد، بنابراین ضریب جذب دیواره 0.32 انتخاب می‌شود [۱۶]. همچنین با توجه به این که کپسول در حین بازگشت به جو، با محیط دور دست تبادل حرارتی انجام می‌دهد و این تبادل حرارتی به منزله‌ی خنک‌کاری دیواره کپسول به شمار می‌آید، ضریب تشعشع شرط مرزی فشار دور دست برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. از آن جایی که در حالت واقعی از دیواره‌ی کپسول، پرتوی تشعشی عبور نمی‌کند، بنابراین نوع دیواره به صورت کدر در نظر گرفته شده است. بنابراین به دلیل انتخاب این نوع دیواره، تشعشع تابشی به سطح، بازتاب می‌کند و یا جذب می‌شود. در واقع این نوع دیواره پرتویی از خود عبور نمی‌دهد، بلکه یا پرتوهای تابیده جذب و یا بازتاب می‌شوند. شکست دیفیوز^{۱۸} در قسمت دیواره، معیاری از پرتوی بازتابی از سطح است. این مقدار در واقع برابر نسبت بازتاب دیفیوز به جمع بازتاب دیفیوز و آینه ای می‌باشد. اگر این مقدار برابر ۱ باشد، به این معنی است که تمام تشعشع بازتابی به صورت دیفیوز است و در واقع با یک زاویه‌ی ثابت در تمام جهات بازتابیده می‌شود. اما اگر این مقدار صفر باشد به این معنی است که بازتاب به صورت آینه ای رخ می‌دهد و اگر بین صفر و یک باشد، به این معنی است هر دو مورد ذکر شده رخ می‌دهد [۱۳]. از آن جایی که بازتاب پرتوهای تشعشی در حالت واقعی می‌تواند در هر دو حالت اتفاق بیفتد، بنابراین این مقدار در تحقیق حاضر، 0.5 در نظر گرفته شده است.

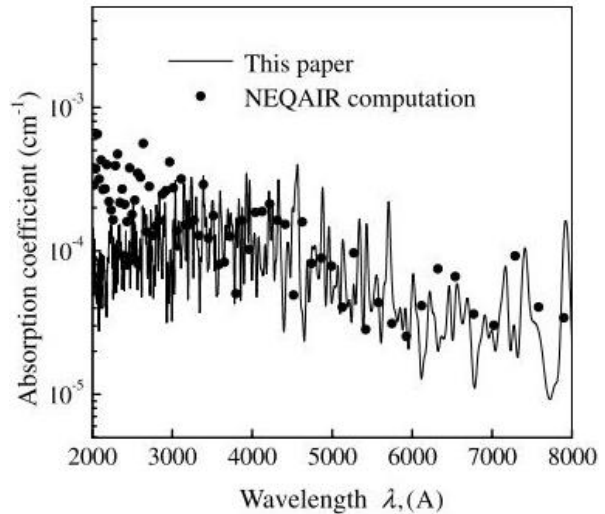
۴. نتایج

در این بخش، حل جریان در شرایط گاز کامل در اطراف هندسه مخروطی نوک پخ به شعاع نوک 0.2311 متر و زاویه‌ی نیم راس مخروط 33 درجه صورت گرفته است. در ابتدا نتایج جریان سه بعدی بدون اعمال انتقال حرارت تشعشی و با در نظر گرفتن

برای اجسام خاکستری، بهتر است که مقدار شبکه بندی ناحیه غیر هم تراز، 1×1 باشد، اما برای مسائلی که درگیر شرایط مرزی نیمه شفاف یا متقارن و یا پرپودیک هستند، بهتر است که این مقدار 3×3 باشد. در تحقیق حاضر، این مقدار برابر ۳ در نظر گرفته شده است. در ادامه، مشخصات تشعشی هوا، مانند ضریب جذب، طول موج محاسبه تشعشع و مشخصات تشعشی دیواره، مانند ضریب تابش مورد بررسی قرار می‌گیرد. بازه‌ی طول موجی محاسبه‌ی تشعشع مطابق مرجع [۱۴]، بین 0.2 تا 4 میکرومتر در نظر گرفته می‌شود. ضریب جذب هوا برای جریان غیر تعادلی، با توجه به طول موجی که انتقال حرارت تشعشع در آن محاسبه می‌شود، 0.1 است [۱۵]. شکل ۷، ضریب جذب هوا بر حسب طول موج برای جریان غیر تعادلی را نمایش می‌دهد.

از آن جایی که در جریان غیر تعادلی، به دلیل شکست مولکولی، تعداد ذرات بیشتر از تعداد ذرات گازی در حالت ایده‌آل است، ضریب جذب گاز کامل باید مقداری کمتر از ضریب جذب

انتقال حرارت جابه جایی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است و اعتبار سنجی شده است و در گام بعد انتقال حرارت تشعشع اعمال شده و نتایج در دو حالت مذکور با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۷. محاسبه‌ی ضریب جذب هوا در وضعیت غیر تعادلی [۱۵]

که جریان به صورت تعادلی فرض شود، واکنش های شیمیایی باید لحاظ شوند که باعث کاهش دما می‌شود.

علاوه بر تغییرات شدید دما، همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، فشار استاتیکی از مقدار فشار جریان آزاد تا ۴۳۶۰۰ پاسکال افزایش یافته که ماکزیمم اختلاف بین نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۱۰]، ۰/۹ درصد است که از دقت قابل قبولی برخوردار است.

۴-۲. انتقال حرارت تشعشعی

به منظور تحلیل اثرات انتقال حرارت تشعشعی، کانتورهای دما و فشار پس از فعال سازی مدل تشعشعی دسته‌بندی گسسته مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج در دو حالت بدون تشعشع و با وجود تشعشع مقایسه و تحلیل می‌شوند.

شرایط جریان آزاد در این حالت، مطابق جدول (۳) است.

جدول ۳. مشخصات جریان آزاد

ماخ	ارتفاع (Km)	فشار (Pa)	دما (K)	چگالی (kg/m ³)	ضریب جذب (1/m)
۳۲/۸	۶۴/۵۵۶	۲۴/۳۹	۲۴۹/۱۶	۰/۰۰۰۲۴۱	۰/۰۰۵۵

پس از شبیه‌سازی در نرم‌افزار، طبق شکل ۱۰، دما از مقدار ۵۵۶۹۳/۱۷ کلوین در نقطه‌ی سکون بدون اعمال تشعشع، به مقدار ۴۰۵۰۰/۱۳ کلوین در نقطه‌ی سکون با فعال سازی مدل تشعشعی دسته‌بندی گسسته می‌رسد. دلیل این کاهش دما، فعال سازی مدل تشعشعی در طی روند حل است که در آن شرایط مرزی دور دست به عنوان یک سیستم خنک‌کاری برای دیواره‌ی کپسول و محیط پیرامون آن به شمار می‌آید. به علاوه، از آن جایی که تشعشع با توان چهارم دما رابطه مستقیم دارد، مطابق شکل ۱۰، بیشتر بین مقدار انتقال حرارت تشعشع در نقطه‌ی سکون اتفاق می‌افتد که دارای دمای ۴۰۵۰۰/۱۳ کلوین است. بنابراین نزدیک ترین ناحیه‌ی کپسول به نقطه سکون، بیشتر بین مقدار انتقال حرارت تشعشع را جذب می‌کند. از طرفی، از آن جایی که دیواره دما ثابت است، دیواره‌ی کپسول، بخشی از این مقدار حرارت را بازتاب می‌دهد و تعادل دمایی بر روی دیواره کپسول، به این روش برقرار می‌شود.

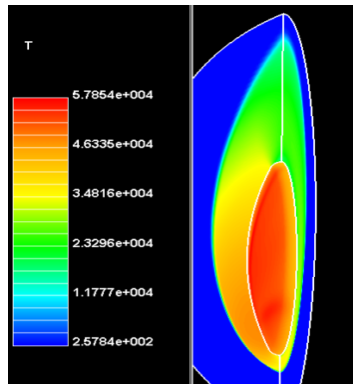
۴-۱. انتقال حرارت جابه جایی

در ابتدا، به منظور حصول اطمینان از نتایج به دست آمده، شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشعی با فرض گاز ایده‌آل انجام می‌شود و نتایج به دست آمده با نتایج مرجع [۱۰] مقایسه می‌شود. شرایط مرزی فشار دور دست در این حالت، برای دو عدد ماخ ۳۰ و ۳۲/۸ در جدول (۲)، ارائه شده است.

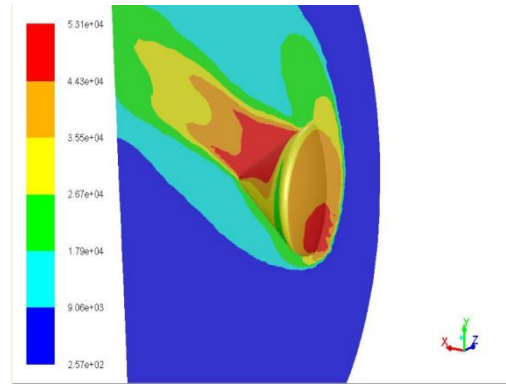
جدول ۲. شرایط مرزی شبیه‌سازی

حالت	عدد ماخ	فشار (Pa)	دما (K)
۱	۳۰	۳۷	۲۵۷
۲	۳۲/۸	۲۴/۳۹	۲۴۹/۱۶

طبق مرجع [۱۰]، دیواره به صورت آدیاباتیک و لزج می‌باشد. به دلیل وجود سرعت بسیار بالا در جریان ماوراء صوت، موج شوکی تشکیل می‌شود که باعث تغییر ناگهانی در دما، فشار می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در عدد ماخ ۳۰، دما تا مقدار ۵۳۱۰۰ درجه کلوین افزایش یافته که اختلاف بین نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۱۰]، ۳ درصد است که از دقت قابل قبولی برخوردار است. باید توجه داشت که علت افزایش بیش از اندازه دما، به دلیل عدم لحاظ واکنش های شیمیایی است. زمانی

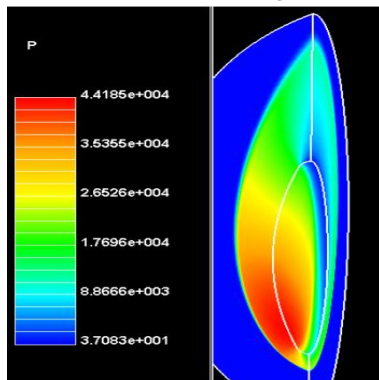


(ب)

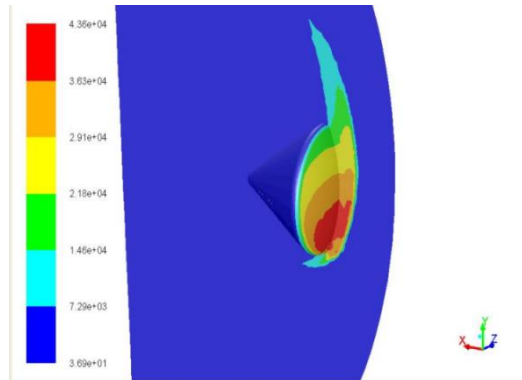


(الف)

شکل ۸. کانتوردمای استاتیکی درماخ ۳۰ (الف) تحقیق حاضر (ب) مرجع [۱۰]

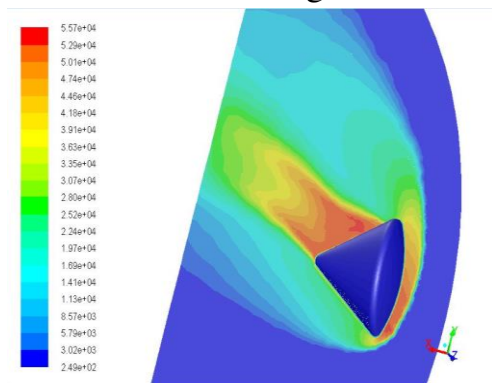


(ب)

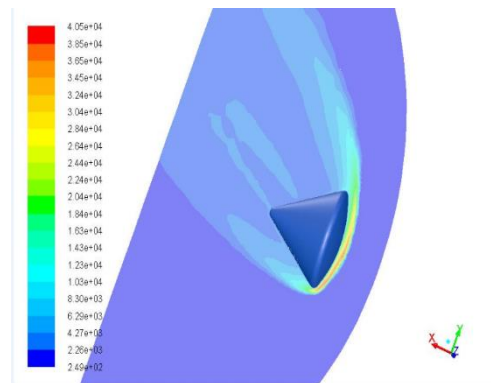


(الف)

شکل ۹. کانتور فشار استاتیکی درماخ ۳۰ (الف) تحقیق حاضر (ب) مرجع [۱۰]



(ب)



(الف)

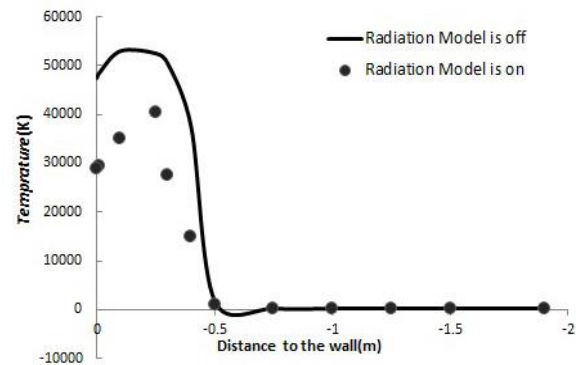
شکل ۱۰. کانتوردمای استاتیکی درماخ ۳۲/۸ (الف) با فعال سازی مدل تشعشی (ب) بدون فعال سازی مدل تشعشی

کپسول، هنگام بازگشت به جو، با محیط دور دست تبادل حرارتی انجام می‌دهد که باعث خنک شدن سطح دیواره می‌شود. بنابراین ضریب تشعشع شرط مرزی فشار دور دست که به منزله ی محیط پیرامون کپسول است، برابر ۱ در نظر گرفته شده است تا روند خنک‌کاری انجام شود. از منظر دیگر، در رابطه‌ی (۱)، که بیانگر معادله انتقال تابشی است، دما با توان چهارم ظاهر می‌شود که علت چندین برابر شدن اثرات دما است. بنابراین اگر در جریان ماوراء صوت که تاثیر انتقال حرارت تشعشی قابل ملاحظه است،

شکل ۱۱، نمودار دمای استاتیکی روی خط سکون برای دو حالت بدون اعمال تشعشع و هم چنین با فعال سازی مدل تشعشی را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، با فعال سازی مدل تشعشی، دما کاهش پیدا می‌کند که به دلیل خنک‌کاری دیواره کپسول و محیط پیرامون آن است. مقدار کاهش دما در نقطه ی سکون حدود ۲۷ درصد است که مقدار قابل توجهی است که به اهمیت لحاظ کردن انتقال حرارت تشعشی در جریان های ماوراء صوت اشاره می‌کند. در واقع

سیستم خنک کننده برای دیواره در نظر گرفته نشود، دما بیش از اندازه افزایش پیدا می کند که باعث ایجاد خطا در محاسبات می شود.

برای تحلیل و مقایسه‌ی نتایج، در ادامه، تغییرات دما و فشار، با فعال سازی مدل تشعشعی دسته‌بندی گسسته، نسبت به مرجع [۱۰] مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل ۱۱. کانتوردمای استاتیکی روی خط سکون

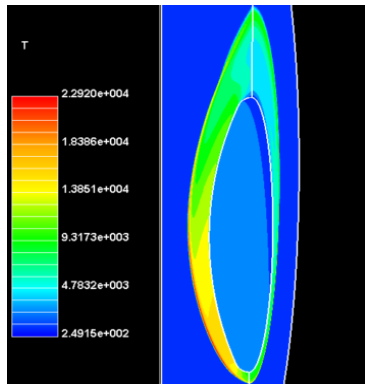
مطابق شکل ۱۲، بیشترین مقدار دما در نقطه سکون در گاز کامل شبیه‌سازی شده، $40492/13$ درجه کلوین است که در مقایسه با دمای نقطه‌ی سکون در مرجع [۱۰] که 22920 کلوین می‌باشد، مقدار قابل ملاحظه‌ای است که دلیل این افزایش دما، عدم لحاظ اثر واکنش‌های شیمیایی در تحقیق حاضر است. همان طور که اشاره شد، طبق نتایج به دست آمده، دما نسبت به حالتی که مدل تشعشعی مورد استفاده قرار نگرفته است، کاهش پیدا کرده است، اما هنوز هم اختلاف قابل توجهی با مرجع دارد، چون زمانی که اثر گازهای داغ و واکنش‌های شیمیایی طبق مرجع [۱۰] لحاظ می‌شوند، دما به شدت کاهش می‌یابد.

مطابق شکل ۱۳، بیشترین فشار نیز از مقدار $33462/26$ پاسکال در نقطه‌ی سکون در حالت بدون اعمال تشعشع، به مقدار ماکزیمم $32853/26$ پاسکال با فعال سازی مدل تشعشعی دسته‌بندی گسسته می‌رسد. در واقع، مقدار فشار حدود ۲ درصد کاهش پیدا کرده است که نسبت به تغییرات دما در همین شرایط ناچیز است. طبق رابطه‌ی (۱)، که بیانگر معادله انتقال تابشی است، فشار در این معادله نقش اساسی ندارد، بنابراین زمانی که

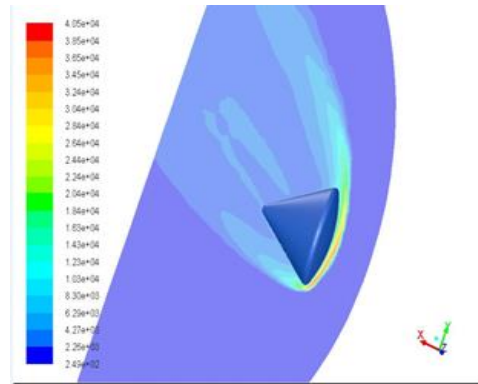
مدل تشعشعی فعال می‌شود، اندازه فشار به اندازه‌ی مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد که دلیل این مقدار کاهش فشار، به دلیل لحاظ کردن شرایط مرزی دوردست به عنوان یک سیستم خنک‌کاری برای دیواره‌ی کپسول و محیط پیرامون آن است. شکل ۱۴ نیز، نمودار فشار استاتیکی روی سطح، برای دو حالت بدون اعمال تشعشع و هم‌چنین با فعال سازی مدل تشعشعی را نشان می‌دهد که کاهش ناچیز فشار را با فعال شدن مدل تشعشعی، طبق توضیحات ذکر شده، نمایش می‌دهد.

ماکزیمم مقدار فشار در نقطه‌ی سکون در تحقیق حاضر، $32853/26$ پاسکال است که در مقایسه با فشار نقطه‌ی سکون در مرجع [۱۰] که 34000 پاسکال می‌باشد، ۳ درصد اختلاف دارد که از دقت قابل قبولی برخوردار است.

در ادامه، به منظور تحلیل اثرات تشعشعی، نتایج تحقیق حاضر، با نتایج مرجع [۱۴]، مقایسه می‌شوند که در آن داده‌های پروازی مربوط به انتقال حرارت تشعشعی کپسول آپولوی ۴ ارائه شده‌اند. شکل ۱۵، نرخ انتقال حرارت تشعشعی تحقیق حاضر و مرجع [۱۴] را در صفحه تقارن نمایش می‌دهد. بین نتایج اختلاف وجود دارد که دلیل این اختلاف، به دلیل لحاظ کردن تابش دیواره به عنوان شرایط مرزی است. باید توجه داشت که خنک‌کاری در مبحث تشعشع، بسیار موثر است. خنک‌کاری باعث کاهش دمای دیواره یک کپسول بازگشت به جو می‌شود. بدون در نظر گرفتن مکانیزم خنک‌کاری، که به معنای در نظر گرفتن ضریب تابش صفر است، دمای دیواره به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. در حالت کلی، دو نوع خنک‌کاری برای دیواره وجود دارد که یکی مربوط به تبادل حرارت دیواره با محیط از طریق تابش محیط دور دست است و دیگری از طریق تابش دیواره صورت می‌گیرد. با اعمال تشعشع در نرم افزار فلوئنت، کپسول به عنوان یک منبع تشعشعی در نظر گرفته می‌شود که دیواره‌ها به صورت ذاتی تابش انجام می‌دهند و با تابش دیواره خنک‌کاری به مقدار کافی برای دیواره از این طریق، انجام نمی‌شود. به علاوه از آن جایی که دمای دیواره ثابت در نظر گرفته شده است، دیواره این امکان را ندارد که از طریق تابش خنک‌کاری بیشتری انجام دهد و بنابراین دلیل اختلاف بین نتایج، تابش حرارتی سطح بدون لحاظ شدن خنک‌کاری دیواره به مقدار کافی، است.

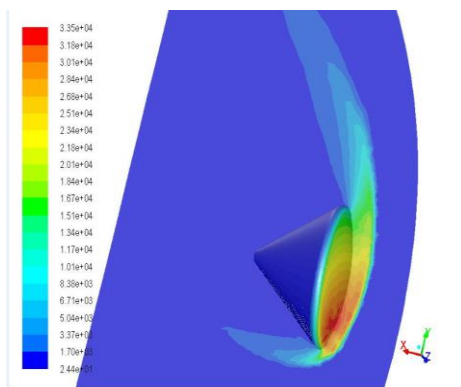


(ب)

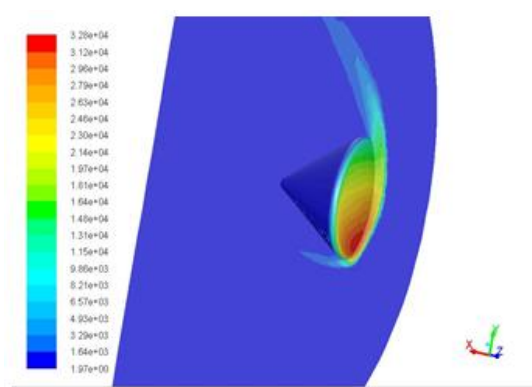


(الف)

شکل ۱۲. کانتور دمای استاتیکی در ماک ۳۲/۸ (الف) تحقیق حاضر (ب) مرجع [۱۰]

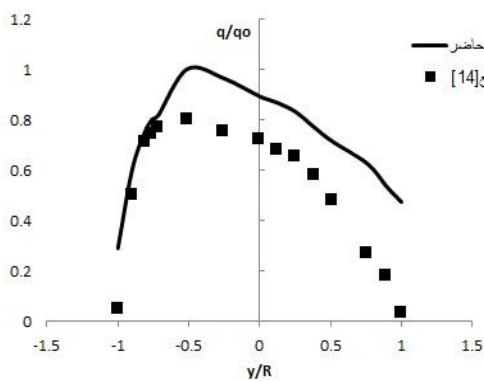


(ب)

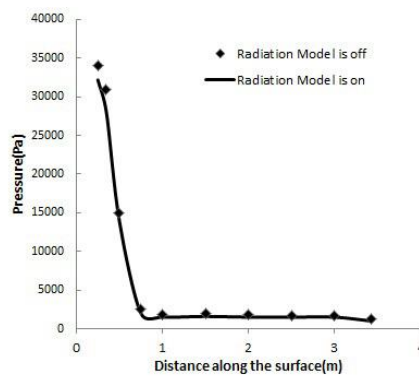


(الف)

شکل ۱۳. کانتور فشار استاتیکی در ماک ۳۲/۸ (الف) با فعال سازی مدل تشعشعی (ب) بدون فعال سازی مدل تشعشعی



شکل ۱۵. مقایسه ی نرخ انتقال حرارت تشعشعی تحقیق حاضر و مرجع [۱۴] در صفحه تقارن



شکل ۱۴. کانتور فشار استاتیکی روی سطح

۵. جمع بندی و نتیجه گیری

آپولوی ۴ است، صورت گرفته است. در ابتدا نتایج جریان سه بعدی بدون اعمال انتقال حرارت تشعشعی و با در نظر گرفتن انتقال حرارت جابه جایی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است و اعتبارسنجی شده است و در گام بعد انتقال حرارت تشعشع، اعمال

در تحقیق حاضر، حل جریان در شرایط گاز کامل در اطراف هندسه ی مخروطی نوک پخ به شعاع نوک ۰/۲۳۱۱ متر و زاویه ی نیم راس مخروط ۳۳ درجه که مشابه هندسه کپسول

کاهش دما و فشار، لحاظ کردن شرط مرزی فشار دور دست است که به عنوان یک سیستم خنک‌کاری برای دیواره‌ی کپسول و محیط پیرامون آن به شمار می‌آید. در واقع، نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در کپسول های بازگشت به جو، لحاظ کردن انتقال حرارت تشعشعی نقشی اساسی دارد که عدم لحاظ آن باعث خطای قابل ملاحظه‌ای در محاسبات خواهد شد. به علاوه لحاظ کردن یک سیستم خنک‌کاری برای دیواره به عنوان فشار مرزی دور دست ضروری خواهد بود که به معنای انتقال حرارت دیواره با محیط اطراف خود است.

شده و نتایج در دو حالت مذکور با یکدیگر مقایسه و اعتبار سنجی شده‌اند. طبق نتایج به دست آمده، با اضافه کردن تشعشع به حل مورد نظر، دما و فشار به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. بیش‌ترین فشار از مقدار $33462/26$ پاسکال در نقطه‌ی سکون در حالت بدون اعمال تشعشع، به مقدار ماکزیمم $32853/26$ پاسکال با فعال سازی مدل تشعشعی دسته‌بندی گسسته می‌رسد. هم چنین دما، از مقدار $55693/17$ کلوین در نقطه‌ی سکون بدون اعمال تشعشع، به مقدار $40500/13$ کلوین در نقطه‌ی سکون با فعال سازی مدل تشعشعی دسته‌بندی گسسته می‌رسد. دلیل این

۶. مآخذ

- [1] J. D. Anderson, Hypersonic and High Temperature Gas Dynamics, American Institute of Aeronautics and Astronautics publication, 2nd Edition, pp. 759-785, 2000.
- [2] J. D. Anderson, Fundamentals of Aerodynamics, McGraw-Hill publication, 5nd Edition, pp. 64-68, 2010.
- [3] M. Kim, M. Keidar, I. D. Boyd, Analysis of an Electromagnetic Mitigation Scheme for Re-entry Telemetry Through Plasm, Spacecraft and Rockets Journal, Vol. 45, No. 6, pp.1223- 1229, 2008.
- [4] R. Siegle, J. R. Howel, Thermal Radiation Heat Transfer, Lewis research center, 3nd Edition, pp. 1-20, 1971.
- [5] J. Lienhard, A Heat Transfer TextBook, 3nd Edition, pp. 26-32, Phlogiston Press publication, 2006.
- [6] D. L. Chauchon, Radiative Heating Result from the Fire2 Flight Experiment in a Re-entry Velocity of 11/2 Kilometers Per Second, Nasa Rep. TM X-1402, Langely research center, 1967.
- [7] C. Park, Stagnation Point Radiation for Apollo 4: A review and Current Status, Proceedings of The 35th AIAA thermophysics conference, No.2001-3070, pp. 6-9, 2001.
- [8] M. Hosseinalipour, Y. Bagheri, Comparing of different Methods in Simulating Radiation Heat Flux in Cylindrical Combustion Chamber, conferences of fluid dynamics, Shiraz university, pp. 1-8, 2005. (in Persian)
- [9] J. Meerof, Computational fluid dynamic solutions of optimized Heat shield designs for earth entry, Master Thesis, University of Maryland, Maryland, 2010.
- [10] E. Papadopoulou, Numerical Simulations of the Apollo4 Re-entry Trajectory, Master Thesis, Aristotle university of Thessaloniki, Lausanne, March 2013.
- [11] A. Martin, Modeling of eat transfer Attenuation by Ablative Gases during the stardust reentry, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 29, No. 3, pp. 450-466, 2015.
- [12] S.T. Surzhikov, Spatial Multiphysics Models of the Radiation Gas Dynamics of Super Orbital Re-Entry Space Vehicles, Journal of Physics, Vol. 837, No. 1, pp. 1-17, 2017.
- [13] Ansys Fluent User Manual, Modeling radiation, Accessed on 1 october 2013; <http://www.ansys.com>
- [14] R. C. Ried, Jr. Rochelle, Radiative Heating to the Apollo Command Module, Nasa TM X-58091, Manned spacecraft center, Texas, April 1972.
- [15] Dong, ShiKui, Ma. Yu, Modeling of High Temperature air Species Nonequilibrium Spectral Radiation Properties, Journal of Thermophysics and Heat transfer, Vol. 22, No. 2, pp. 3-5, 2008.
- [16] J. Pavlosky, L. leger, Apollo 4 Experience Report-Thermal protection subsystem, NASA Rep. TND-7564, Johnson Space Center, 1974.

پی‌نوشت

1. Ultraviolet
2. Visible light Region
3. Infrared
4. Data parallel Line Relaxation
5. Ablative
6. Eilmer3

-
7. Surface to surface Radiation Model
 8. Rosseland radiation Model
 9. Discrete Transfer Radiation Model
 10. Discrete ordinates radiation Model
 11. Phase function
 12. Pressure far field
 13. Symmetry
 14. Density based
 15. Sutherland
 16. Initialization
 17. Pixelation
 18. Diffuse fraction