



Analysis of the Effect of Layer Perforation Pattern on the Rate of Gas Leakage from Multilayer Thermal Insulation During Satellite Launch

Hamed Ramezani Najafi^{1*}, S.M. Hossein Karimian², and Mohammad Reza Pakmanesh³

1. PhD, Aerospace Science and Technology Research Institute, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. PhD, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
3. PhD, Material and Energy Research Institute, Iran Space Research Center, Esfahan, Iran

* Corresponding Author E-mail's: hamedramezani@aut.ac.ir

One of the passive components of the satellite Thermal control subsystem is multilayer insulation. In order to prevent air from being trapped between the multilayer insulation layers, which causes the thin layers to inflate and disintegrate during satellite launches, holes are made in the layers. These holes in different layers may not be aligned due to heat transfer problems as well as manufacturing constraints. For maximum thermal efficiency of thermal insulation, gas outlets must be designed to have the least resistance to exhaust gas flow, because the air trapped between the layers will greatly reduce the insulation efficiency by leaving a convective heat transfer path between them. In this article, different perforation matrix that have been used in articles are reviewed. By analyzing the computational fluid dynamics of gas outflow from these insulators, the effect of various parameters has been studied.

Keywords: Multilayer Insulation-trapped air discharge - Perforation matrix- Launch- hole Diameter- Drilling intervals

How to Cite:

H. Ramezani Najafi, H. Karimian, and M. R. Pakmanesh, "Analysis of the Effect of Layer Perforation Pattern on the Rate of Gas Leakage from Multilayer Thermal Insulation During Satellite Launch," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 11-9, 2023 (in Persian).

تحلیل اثر الگوی سوراخ کاری لایه‌ها در میزان خروج گاز از عایق حرارتی چندلایه در طول پرتاب ماهواره

حامد رمضانی نجفی^{۱*}، سید محمدحسین کریمیان^۲ و محمدرضا پاکمنش^۳

۱- پژوهشکده علوم و فناوری هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳- پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان، ایران

ایمیل نویسنده مخاطب: *Hamedramezani@aut.ac.ir

یکی از اجزای غیرفعال زیرسیستم کنترل حرارت ماهواره عایق‌های چندلایه است. به منظور جلوگیری از محبوس شدن هوا میان لایه‌های عایق چندلایه که موجبات بادکنکی شدن و از هم گسیختگی لایه‌های نازک آن حین پرتاب ماهواره را فراهم می‌کند، سوراخ‌هایی در لایه‌ها ایجاد می‌نمایند. این سوراخ‌ها در لایه‌های مختلف به دلیل مسائل انتقال حرارتی و همچنین محدودیت‌های ساخت ممکن است هم‌راستا نباشند. برای داشتن بیشترین راندمان عملکردی عایق‌های حرارتی، مسیرهای خروج گاز باید به نحوی طراحی شوند که کمترین مقاومت در برابر جریان گاز خروجی را داشته باشند زیرا هوای محبوس در میان لایه‌ها با باقی گذاشتن مسیر انتقال حرارت همرفتی میان آن‌ها راندمان عایق را به شدت کاهش خواهد داد. در این مقاله الگوهای مختلف سوراخ کاری در مقالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی خروج گاز از میان این عایق‌ها، اثر پارامترهای مختلف نظیر قطر سوراخ، فواصل بین سوراخ‌ها و سرش لایه به لایه مورد مطالعه قرار گرفته است. قطر مناسب برای سوراخ کاری ۱/۵ میلی‌متر و فاصله مناسب ۱۰ میلی‌متر می‌باشد که برای تخلیه سریع‌تر بهتر است سوراخ‌ها هم‌راستا باشند.

واژه‌های کلیدی: عایق‌های چندلایه، تخلیه هوای محبوس شده، ماتریس سوراخ کاری، پرتاب، قطر سوراخ، فواصل سوراخ کاری

مقدمه

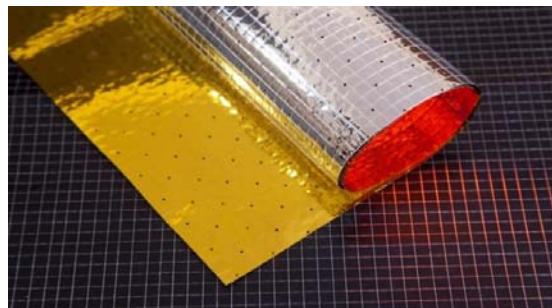
را به کمترین مقدار برسانند. عدم وجود گاز بین لایه‌ها بر کارایی عایق چندلایه خواهد افزود. لایه‌های عایق طوری طراحی و ساخته می‌شوند که بتوان گازهای محبوس شده در بین لایه‌ها را از سیستم خارج کرد. همچنین برای جلوگیری از پارگی، ترکیبگی و جدا شدن از سطح عایق‌های چندلایه به واسطه افت فشار سریع محیط اطراف در طول پرتاب فضاپیما و در نتیجه افزایش حجم عایق چندلایه، سوراخ کاری انجام می‌شود. نمونه این سوراخ کاری در شکل (۱) نشان داده شده است.

در حین پرتاب در محیط داخلی دماغه پرتابگر، فضاپیما دچار افت فشار پیش از باز شدن کفه‌های دماغه و بعد از آن خواهد شد. اگر

بشر از دیرباز بر روی انرژی و حفظ آن فعالیت‌های زیادی انجام داده است. مبحث عایق سازی و عدم هدر رفت انرژی نیز همواره مورد توجه دانشمندان بوده است. عایق‌های چندلایه حرارتی با حفظ انرژی مانع اتلاف حرارت از ماهواره‌ها و همچنین بهبود کارایی آن‌ها می‌شوند. این عایق از چندین لایه تشکیل شده است که هر کدام دارای ضریب بازتاب بالایی است. برای جلوگیری از تماس لایه‌ها، در میان آن‌ها از صفحاتی نازک مانند پارچه توری شکل با ضریب رسانایی بسیار پایین استفاده می‌شود تا انتقال حرارت

با سوراخ کاری به قطر ۱/۳ میلی متر و سطح باز یا همان سطح سوراخ شده به سطح کل عایق ۲/۲٪ بهره گرفته شده است. اندازه گیری ها نشان می دهد گازروی از مواد تشکیل دهنده لایه ها، نسبت به محدودیت جریان هوای خروجی، کارایی عایق های چندلایه را به مقدار بیشتری کاهش خواهد داد. رضائی و همکاران [۶] به آزمون کارایی حرارتی تشعشی عایق های چندلایه در خلأ پرداختند. تعداد لایه های این عایق ۲۰ لایه و قطر سوراخ های آن ۱/۵ میلی متر با فواصل ۱۵ میلی متر در نظر گرفته شده است. ضریب صدور مؤثر برای این عایق چندلایه کمتر از ۰/۰۴ به دست آمده است که تطابق مناسبی با فرمول های محاسباتی دارد. لواندفسکی و دورفر [۷] با مدل سازی محاسباتی عبور جریان از سوراخ بر روی یک لایه میزان بهینه قطر به عمق سوراخ را بررسی کردند. قطر سوراخ در بازه ۰/۱ تا ۰/۶ میلی متر و ضخامت صفحه ۱ میلی متر در نظر گرفته شده است. در این مقاله مقادیر خطا و ضریب تصحیح آن در چند نمونه با توجه به هندسه و رفتار آیرودینامیکی، مورد مطالعه قرار گرفته است. بیشینه خطای ناشی از پیش بینی آیرودینامیک جریان، ۸/۵۷٪ شناسایی شده است. هاتاکناکا و همکاران [۸] عملکرد نوع جدید از عایق های چندلایه را بدون استفاده از ماشین خیاطی (بدون کوک) جهت بهبود عملکرد حرارتی مورد آزمایش قرار دادند. تضعیف عملکرد معمولاً در کوک ها، در کل لبه های عایق و چسب های نر و مادگی گیره ای رخ می دهد. نقش کوک در عایق، ثابت نگهداشتن لایه ها و همچنین تقویت لبه ها است. در این پژوهش از بین های برجسی که برای چسباندن قیمت روی اجناس استفاده می شود، بهره گرفته شده است. در واقع استفاده از بین ها برای ثابت کردن لایه ها، بدون فشرده کردن آن ها، بسیار حائز اهمیت است. قطر سوراخ های عایق ۲ میلی متر با فواصل ۵۰ میلی متر لحاظ شده است. بر اساس نحوه انجام آزمون توصیف شده در این مقاله، در صورتی که عایق چندلایه شرایط ایجاد شده، یک اتمسفر اختلاف فشار را تحمل نماید و دچار از هم گسیختگی نشود قابلیت تحمل افت فشار هنگام پرتاب را نیز خواهد داشت. ترامل و همکاران [۹] در مرکز پرواز فضایی مارشال ناسا، برای بستر آزمون چندمنظوره هیدروژن تحت خلأ از عایق های چندلایه استفاده نموده است. تعداد لایه های به کار رفته ۴۵ عدد و قطر سوراخ های آن ۱/۲۷ میلی متر در نظر گرفته شده است. جانسون و همکاران [۱۰] میزان عبور حرارت را از عایق چندلایه ای به قطر سوراخ کاری ۱ میلی متر مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله تعداد لایه ها ۱۰ عدد لحاظ و آزمون انجام شده با محاسبات مقایسه شده است. آن ها نشان دادند که انتقال حرارت تشعشی عبوری افزایش یافته از مسیر سوراخ ها تأثیر بسیار بیشتری نسبت به کاهش انتقال حرارت هدایتی به واسطه بین های مورد استفاده در اتصالات دارد. دنگ و همکاران [۱۱] از روش تجربی نرخ بهینه سوراخ کاری عایق های چندلایه برای کاربردهای کرایونیک استخراج نمودند. قطر سوراخ ها در این تحقیق ۱ میلی متر

این کاهش فشار بسیار سریع اتفاق بیفتد، جریان گاز خروجی تولید تنش در اتصالات عایق یا پارگی در عایق چندلایه خواهد شد و باعث جدا شدن چسب های اتصال دهنده به خصوص در مرزهای آن می شود.



شکل ۱- نمونه سوراخ کاری ماتریسی لایه خارجی عایق

نکته قابل ملاحظه در طراحی سوراخ های عایق چندلایه این است که اگر تعداد مسیرهای خروج گاز کافی نباشد، رشد ترک از همان محل سوراخ ها ادامه خواهد یافت. در مقابل اگر تعداد مسیرهای خروج گاز در عایق چندلایه بیش از اندازه باشد، خاصیت عایق بودن آن از بین خواهد رفت؛ بنابراین طراحی این مسیرها و سوراخ ها باید با دقت زیادی انجام گیرد.

روش های متفاوتی برای ایجاد مسیرهای خروج گاز در عایق های چندلایه به کار رفته است. چن و همکاران [۱] از طرح ایجاد شکاف بر روی عایق چندلایه استفاده نمودند. آزمایش ها نشان می دهند که ترکیبی از لایه های شکافدار می تواند توزیع فشار مناسب تری را برای عملکرد عایق چندلایه فراهم آورد. مقرون به صرفه بودن شکاف های یک بعدی نسبت به سوراخ کاری از نکات مورد اشاره این مقاله در کاربردهای بروندی زمینی می باشد. کوتروس و هاشمی [۲] فرمول تجربی را برای خروج گاز از بین لایه های عایق های چندلایه با استفاده از شکاف X شکل پیشنهاد کردند. شکاف های ایجاد شده بر روی عایق چندلایه، طولی برابر با ۱/۸ سانتی متر داشتند. با ارائه منحنی اختلاف فشار درون عایق و محیط اطراف نشان دادند با افزایش تعداد شکاف ها در ابتدا مقدار اختلاف فشار به شدت کاهش و پس از آن با شیب کمتری کاهش پیدا خواهد کرد. وسلی و همکاران [۳] مقدار هدر رفت حرارت از عایق چندلایه را اندازه گیری نمودند. سوراخ کاری لایه در ساخت این عایق چندلایه به قطر ۱/۱۶ اینچ و در فواصل ۲ اینچی با استفاده از روش پانچ را به انجام رساند. فسمیر و همکاران [۴] برای کاربرد پرتابگرهای فضایی و فضاییماهای بروندی، عملکرد حرارتی عایق های چندلایه را در مقیاس بزرگ مورد بررسی قرار دادند. تعداد لایه های این عایق ۱۵ لایه و قطر سوراخ های آن ۲ میلی متر در نظر گرفته شده است. در تحقیق یاد شده فاصله بین سوراخ ها ۵۶ میلی متر بود. افرومسون [۵] عملکرد حرارتی عایق چندلایه را در هنگام افت فشار سریع مورد بررسی قرار داد. در این مقاله از یک عایق ۱۰ لایه

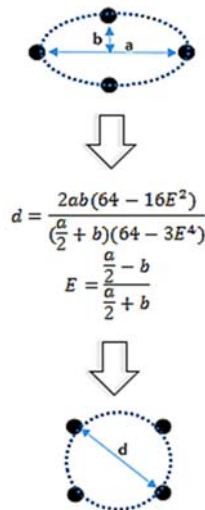
در دسته اول فاصله سطرها و ستون‌ها یکسان فرض شده و نیز سرش بین سطرها یا ستون‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در این دسته، تنها با داشتن قطر سوراخ و فاصله بین سوراخ‌ها در سطر یا ستون می‌توان الگوی سوراخ کاری را مشخص کرد.

در دسته دوم با سرش ردیف‌های سوراخ به میزان نصف فاصله بین دو سطر یا ستون الگوی تکرار شونده قابل تشخیص خواهد بود. استفاده از میان‌یابی در فواصل بین سوراخ‌ها و به دست آوردن فاصله معادل می‌تواند راه حل مناسبی برای تعمیم نتایج ماتریس سوراخ کاری مربعی به نتایج این دسته باشد.

با این روش ماتریس سوراخ کاری با فواصل عمودی و افقی متفاوت و سرش سطری، قابل معادل‌سازی با ماتریس سوراخ کاری با فواصل سوراخ‌های سطری و ستونی یکسان و بدون سرش سطری خواهد بود؛ بنابراین می‌توان از میان‌یابی در نمودارهای تخلیه فشار الگوی مربعی با قطر معادل برای تخمین روند تخلیه فشار ماتریس سوراخ کاری هدف استفاده نمود. با استفاده از روابط مثلثاتی مطابق شکل (۳) با تقسیم قطر هیدرولیک بر جزر ۲ می‌توان از نمودارهای تخلیه فشار ماتریس مربعی با فاصله به دست آمده، بهره برد.

هندسه و شبیه‌سازی

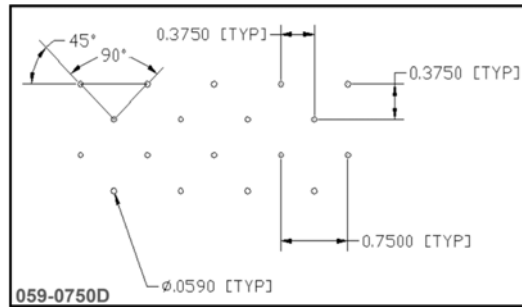
پیش از انجام شبیه‌سازی، لازم است شرایط مرزی حاکم بر مسئله به‌طور کامل شناسایی شود. ماهواره‌ها با قرار گرفتن در داخل کلاهک پرتابگر تابع شرایط حاکم بر آن خواهند بود. با اوج‌گیری پرتابگر و افزایش ارتفاع آن از فشار داخل کلاهک کاسته و با رسیدن به سطوح بالای جو، پوسته کلاهک جدا شده و ماهواره در معرض هوای رقیق کم فشار قرار خواهد گرفت.



شکل ۳- روند معادل‌سازی ماتریس سوراخ کاری غیر مربعی به مربعی

می‌باشد. آن‌ها در مقاله منتشر شده نرخ بهینه سوراخ کاری را ۳۹٪/۰ پیشنهاد کردند. نکته مهم در این مقاله معرفی چند پروفیل اندازه‌گیری شده تجربی برای بیشترین اختلاف فشار مشاهده شده و مدت زمان آن در عایق چندلایه و مخزن می‌باشد.

شرکت سازنده لایه‌های عایق چندلایه با نام شلدال^۵ چند نوع ماتریس سوراخ کاری را به‌عنوان نمونه مطرح کرد [۱۲] که قابلیت انتخاب تحویل لایه‌ها با ماتریس سوراخ کاری مورد نظر را فراهم ساخت. نمونه‌ای از ماتریس سوراخ کاری ارائه شده در شکل (۲) به نمایش در آمده است.



شکل ۲- نمونه ماتریس سوراخ کاری شرکت شلدال

با جمع‌آوری آماری مقالات با نحوه سوراخ کاری دایروی که از نظر ساختاری احتمال کمتری در ایجاد ترک دارند می‌توان دریافت که به‌طور متوسط کمتر از ۱ درصد سطح هر لایه سوراخ کاری شده و قطر سوراخ‌ها در بازه ۱ تا ۲ میلی‌متر می‌باشد.

با مرور مقالات فوق می‌توان دریافت که در هیچ یک از آن‌ها مبنای مشخصی برای انتخاب ماتریس سوراخ کاری وجود نداشته است و تنها به‌صورت تجربی پارامترهای آن انتخاب شده است. در این مقاله به بررسی پارامترهای مؤثر بر سوراخ کاری عایق‌های چندلایه برای کارایی در طول پرتاب محموله پرداخته خواهد شد. استخراج حالت بهینه سوراخ کاری هدف اصلی این تحقیق است.

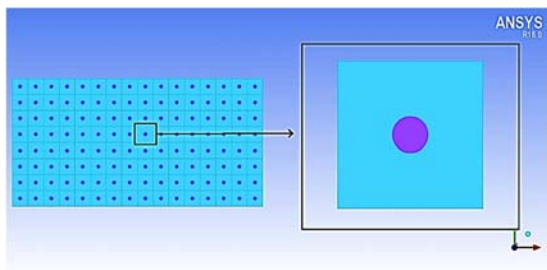
پارامترهای مؤثر در مسیر تخلیه

با فرض سوراخ‌های دایروی، پارامترهای مؤثر در خروج گاز از عایق‌های چندلایه عبارتند از:

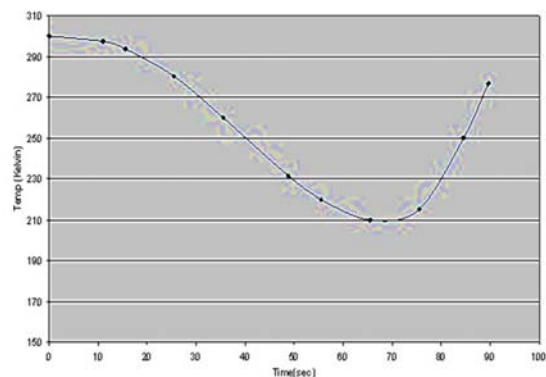
- قطر سوراخ
- فاصله بین سوراخ‌ها (فاصله بین سطرها و ستون‌ها)
- سرش‌گر سوراخ کاری لایه به لایه عایق
- الگوهای مشاهده شده در مقالات را می‌توان در دو دسته تقسیم‌بندی کرد. الگوهایی که ماتریس سوراخ کاری در آن‌ها در هر لایه به شکل مربعی است و الگوهایی که ماتریس سوراخ کاری آن‌ها غیر مربعی یا با سرش ستون‌ها یا ردیف‌ها همراه باشد.

شده بر روی عایق در صورت مدل سازی آن به صورت کامل به بیش از چند ده میلیون سلول شبکه برای انجام تحلیل ها نیاز خواهد بود. با توجه به حجم برآورد شده زمان انجام حل گذرا با کامپیوترهای موجود برای هر مورد ماه ها طول خواهد کشید. شایان ذکر است الگوی سوراخ کاری بر روی لایه های عایق چندلایه در طول و عرض تکرار خواهد شد. لذا استفاده از شرط تقارن می تواند تا حدود زیادی مشکل تعداد شبکه را برطرف کند. استفاده از شرط مرزی پرئودیک با توجه به فیزیک مسئله کارایی نخواهد داشت. تفاوت در تولید جریان در این مرزها است. در مرز پرئودیک - که باید بر روی دو مرز روبروی هم اعمال شود - با ورود جریان از یک مرز خروج جریان از مرز روبرو طبق روابط پیش بینی شده برای آن شرط مرزی، صورت می پذیرد. به عنوان مثال در شرط مرزی پرئودیک، در صورت اعمال جریان عرضی بین لایه ها در حدس اولیه، این سرعت عرضی تا انتهای حل برقرار بوده و متوقف نمی شود. در صورتی که در شرط مرزی تقارن - که بر روی هر مرز به طور جداگانه تعریف می شود - اجازه عبور از مرز تقارنی داده نشده و حدس اولیه در ادامه حل تصحیح خواهد شد. بنابراین با توجه به محدودیت های موجود هندسه مورد مطالعه به المان کوچکی که دارای یک سوراخ است، تقسیم بندی شده و ابعاد و قطر سوراخ به عنوان متغیر در نظر گرفته خواهد شد. شماتیک المان حاوی سوراخ برای انجام تحلیل ها در شکل (۶) ارائه شده است.

در شکل (۷) شماتیک کلی از یک سوراخ سرتاسری نمایش داده شده است. این عایق ۲۰ لایه در نظر گرفته شده و ضخامت لایه های عایق ۰/۱ میلی متر و فاصله بین لایه ها نیز ۰/۱ میلی متر در لحاظ شده است. در بالا و پایین مدل شرط مرزی فشار خروجی در محل سوراخ در نظر گرفته شده است. مقدار این فشار همان فشار درون کلاهک پرتابگر تعیین می شود. در محل برش در راستای طول و عرض برای لایه ها شرط مرزی دیواره و برای سیال شرط مرزی تقارن در نظر گرفته می شود.

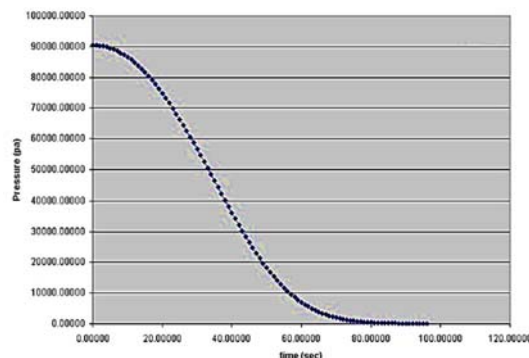


شکل ۶- المان مورد تحلیل با استفاده از شرط مرزی تقارن



شکل ۴- منحنی تغییرات دما در داخل کلاهک پرتابگر

نمونه منحنی تغییرات دما و فشار در داخل کلاهک پرتابگر در شکل های (۴ و ۵) به نمایش در آمده است. منحنی های زیر با قرار دهی حسگر دما و فشار بر روی دیواره داخلی کلاهک پرتابگر و مخبره آن به زمین طی مراحل پرتاب محموله بیش از ۱۰۰ کیلوگرمی حاصل شده است.



شکل ۵- منحنی تغییرات فشار در داخل کلاهک پرتابگر

شرایط فوق در شرط مرزی فشار خروجی^۷ حول مدل عایق چندلایه در نرم افزار تجاری فلونت بکار گرفته خواهد شد. در حل جریان به صورت گذرا و فشار و دمای خروجی هوا با استفاده از کد udf به حل مورد نظر اعمال می گردد.

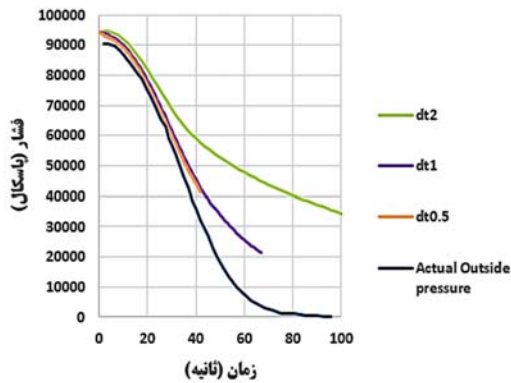
عایق های چندلایه از تعدادی لایه تشکیل شده است که در فاصله بسیار کم از یکدیگر قرار گرفته است. فاصله بین لایه ها بستگی به ضخامت فاصله دهنده بین آنها دارد. نسبت فاصله بین لایه ها به طول و عرض عایق بسیار ناچیز است. لذا نسبت منظری^۸ در این هندسه بسیار پایین خواهد بود.

برای ایجاد شبکه بندی مناسب در محل سوراخ لازم است شبکه ریزتری در آن نقاط ایجاد شود. با در نظر گرفتن تعداد سوراخ های تعبیه

9. Symmetry

7. Pressure outlet
8. Aspect Ratio

شد. منحنی‌های فشار و دما در شکل‌های (۴ و ۵) به شرط مرزی فشار خروجی سوراخ فوقانی و تحتانی اختصاص داده شد. در مسائل پایا برای تصدیق نتایج لازم است تا به مطالعه شبکه پرداخته شود؛ اما در مسائل گذرا مهم‌تر از استقلال از شبکه، عدم وابستگی آن‌ها به گام‌های زمانی مورد مطالعه می‌باشد. برای این کار بازه زمانی ۰/۵، ۱ و ۲ ثانیه بررسی شد. نقطه پایش فشار، سوراخ خروجی عایق چندلایه در نظر گرفته شده است. نتایج سه گام زمانی در تعداد تکرارهای مختلف در شکل (۹) نمایش داده شده است.

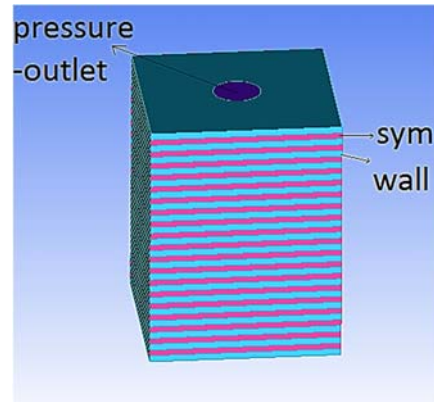


شکل ۹- تغییرات فشار در نقطه خروجی نمونه‌برداری در گام‌های زمانی متفاوت

هر اندازه گام زمانی کاهش یابد و تعداد تکرار افزایش، نتایج نزدیک‌تری به پروفیل تغییرات فشار محیط بیرونی حاصل می‌شود. اما باید توجه داشت هزینه محاسباتی انجام تحلیل‌ها نیز مقرون به صرفه باشد. برای اطمینان از همگرا شدن حل در هر گام زمانی پیش‌فرض تعداد تکرار ۱۰۰۰ لحاظ شد. با مقایسه منحنی‌های تغییرات فشار در خروجی در دو گام زمانی ۰/۵ و ۱ ثانیه نتایج یکسانی حاصل شده است؛ به عبارت دیگر با کاهش بیشتر گام زمانی نتایج تغییر محسوسی را نشان نخواهند داد. لذا برای کاهش هزینه محاسباتی و دنبال کردن صحیح میزان فشار خروجی تعریف شده در طی حل تحلیل‌های انجام شده در این گزارش گام زمانی ۱ ثانیه مبنای کار قرار گرفت.

نتایج

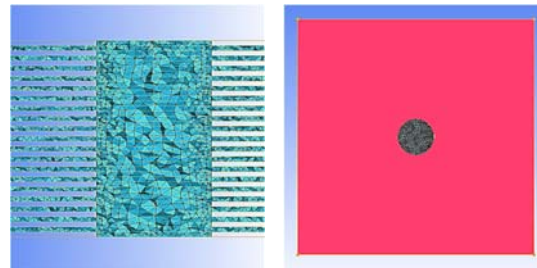
برای تعیین ماتریس سوراخ‌کاری بهینه، هر اندازه قطر سوراخ‌ها کوچک‌تر و فاصله بین آن‌ها بیشتر باشد، در صورت تخلیه هوا در مدت زمان مناسب بدون آسیب رسیدن به اتصالات، ماتریس سوراخ‌کاری مطلوب‌تری حاصل می‌شود. لذا برای انجام تحلیل‌ها پارامترهای ابعادی متغیر در شکل (۱۰) انتخاب شد.



شکل ۷- شرایط مرزی یک عایق با سوراخ سرتاسری

شبکه‌بندی

برای شبکه‌بندی دامنه حل از شبکه بی‌سازمان استفاده گردید. این هندسه با حدود ۳ میلیون المان، شبکه‌بندی شده است. شبکه‌بندی با نمای برشی میانی در شکل (۸) نشان داده شده است. شبکه در قسمت‌هایی از هندسه که شعاع به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند و روی شکستگی‌ها، ریز شده و در سایر نواحی درشت‌تر است.

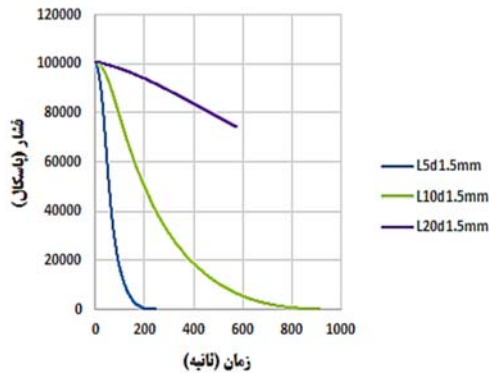


شکل ۸- شبکه‌بندی از نمای بالا و برش خورده میانی

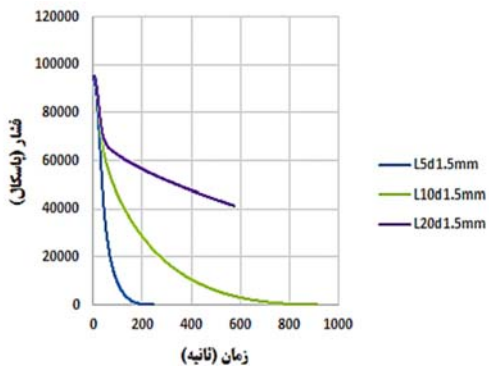
روش حل

ماهیت این مسئله گذرا است، بنابراین روش حل گذرا در نرم‌افزار فلوئنت انتخاب شد. با توجه به احتمال وقوع سرعت‌های بالا در هنگام خروج گاز از روش چگالی مبنای استفاده شده است. سیال مورد نظر هوا با فرض گاز ایده‌آل انتخاب گردید. با احتساب فاصله بین لایه‌ها در مرتبه 10^{-1} و لزجت در مرتبه 10^{-5} و سرعت‌های بالا در محل سوراخ خروجی عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ خواهد بود. لذا فرض جریان معشوش در میدان حل برقرار است. در این مقاله جریان سیال، لزج و روش اسپالارت آلماراس برای مدل‌سازی اغتشاشات آن بکار گرفته

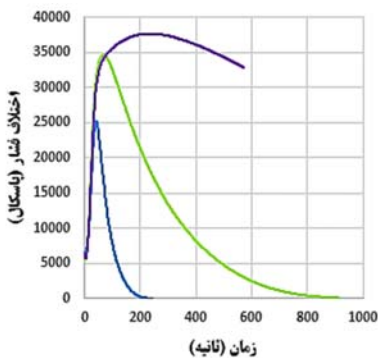
اندازه المان به ۲۰ میلی‌متر به ۳۷ کیلو پاسکال خواهد رسید. با افزایش بیشتر اندازه المان تنها میزان کمی به بیشینه اختلاف فشار اضافه خواهد شد. لذا با عبور نمودار از نقاط بیشینه نمودار فوق، می‌توان رفتار افزایشی اختلاف فشار بیشینه را شناسایی کرد. بیشینه اختلاف فشار در قطر ثابت با افزایش اندازه المان در شکل (۱۴) نمایش داده شده است.



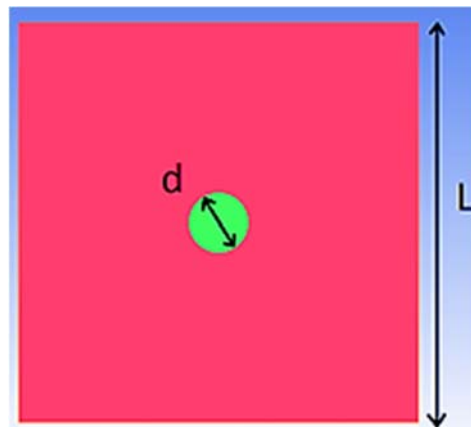
شکل ۱۰- تغییرات فشار در نقطه میانی نمونه‌برداری با طول المان ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و قطر سوراخ ۱/۵ میلی‌متر



شکل ۱۱- تغییرات فشار در نقطه خروجی نمونه‌برداری با طول المان ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و قطر سوراخ ۱/۵ میلی‌متر



شکل ۱۲- اختلاف فشار در دو نقطه نمونه‌برداری با طول المان ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و قطر سوراخ ۱/۵ میلی‌متر



شکل ۱۳- پارامترهای متغیر ابعادی

d : قطر سوراخ‌های ایجاد شده بر روی صفحات است. (شامل قطر دهانه خروجی)

L : طول المان که سوراخ در آن تعبیه می‌شود. هرچه این عدد کوچک‌تر باشد نشان دهنده تعداد سوراخ‌های بیشتری است در واقع این مقدار با تعداد سوراخ نسبت عکس دارد.

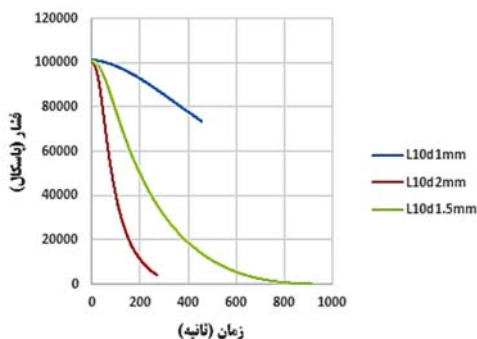
برای مقایسه نحوه خروج هوا از میان لایه‌ها در دو نقطه مینا، فشار در تمامی تحلیل‌ها مقایسه شد. نقطه اول در سوراخ خروجی بیرونی‌ترین لایه عایق در نظر گرفته شده است و نقطه دوم در میانی‌ترین لایه عایق تعبیه شده است که در طول زمان تخلیه، بیشترین فشار را به علت دورتر بودن نسبت به خروجی تجربه خواهد کرد.

برای بررسی طول المان بهینه، با فرض قطر سوراخ ۱/۵ میلی‌متر که متوسط قطر انتخاب شده در مراجع است، سه اندازه المان ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفتند. منحنی‌های تغییرات فشار در نقطه میانی و خروجی عایق در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نشان داده شده است.

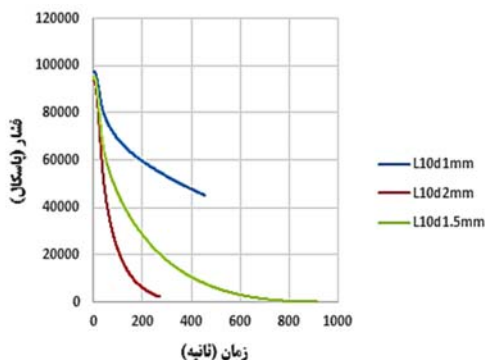
همان‌طور که مشاهده می‌شود در نقطه میانی با افزایش طول المان یا به عبارتی افزایش فاصله بین سوراخ‌ها، فشار با سرعت کمتری افت خواهد کرد. با افزایش ۲ برابری اندازه المان از ۵ به ۱۰ میلی‌متر زمان تخلیه، رشد ۴/۵ برابری خواهد داشت. منحنی افت فشار در اندازه المان ۲۰ میلی‌متری تا زمان ۶۰۰ ثانیه دنبال می‌شود. نقطه بیشینه اختلاف فشار در همین بازه واقع شده است که در شکل (۱۳) نمایش داده شده است.

افزایش اندازه المان به معنای تعداد سوراخ کمتر در لایه‌های عایق چندلایه می‌باشد. لذا انتظار می‌رود هوا با سرعت کمتری تخلیه شود. انباشت هوا در داخل عایق چندلایه در اندازه المان بیشتر و با فرض تخلیه هوای داخل کلاهک موشک با شرایط یکسان در تمامی حالات، اختلاف فشار بیشتری را ما بین لایه‌ها به همراه خواهد داشت. با افزایش اندازه المان از ۵ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر اختلاف فشار نقطه میانی و خروجی از ۲۵ کیلو پاسکال به ۳۵ کیلو پاسکال و با افزایش

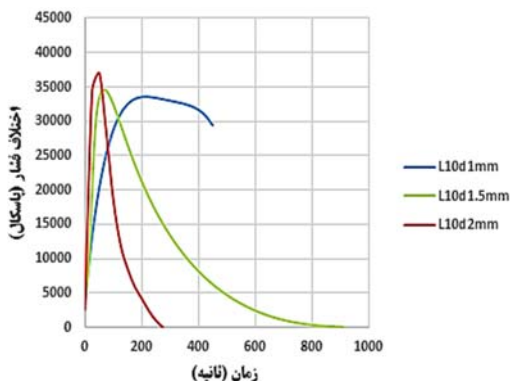
شده است. با افزایش قطر سوراخ بیشینه اختلاف فشار بیشتری بین لایه‌های داخلی و خارجی عایق چندلایه به وجود خواهد آمد اما مدت زمان تخلیه کوتاه‌تر خواهد شد. این امر به دلیل افزایش سرعت تخلیه در سوراخ‌های خروجی می‌باشد که فشار کمتری را در آن نقاط به دنبال خواهد داشت.



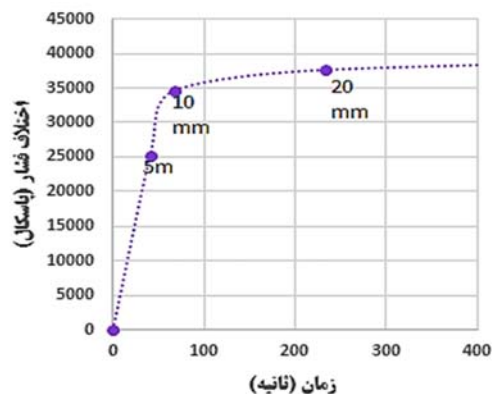
شکل ۱۴ - تغییرات فشار در دو نقطه میانی نمونه‌برداری با طول المان ۱۰ میلی‌متر و قطر سوراخ ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر



شکل ۱۵ - تغییرات فشار در نقطه خروجی نمونه‌برداری با طول المان ۱۰ میلی‌متر و قطر سوراخ ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر



شکل ۱۶ - اختلاف فشار در دو نقطه نمونه‌برداری با طول المان ۱۰ میلی‌متر و قطر سوراخ ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر



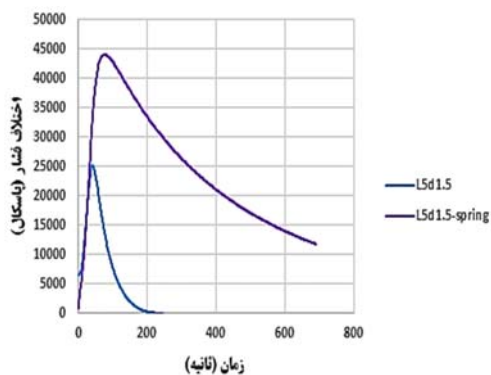
شکل ۱۷ - بیشینه اختلاف فشار در دو نقطه نمونه‌برداری در قطر سوراخ ۱/۵ میلی‌متر با افزایش طول المان

همان‌طور که مشاهده می‌گردد در قطر ۱/۵ میلی‌متری و اندازه المان بیش از ۱۰ میلی‌متر، اختلاف فشار بیشینه بین دو نقطه اندازه‌گیری، تغییرات کمتری خواهد داشت. لذا افزایش بیشتر فواصل سوراخ‌کاری تنها زمان تخلیه را بالا برده و تأثیر چندانی بر روی اختلاف فشار بیشینه نخواهد گذاشت.

پارامتر قطر دیگر مشخصه ماتریس سوراخ‌کاری است. با تغییر قطر سوراخ می‌توان دبی جریان خروجی را افزایش یا کاهش داد. با احتساب اندازه المان ۵ میلی‌متر که در مقایسه با قطر سوراخ بسیار کوچک می‌باشد اندازه المان ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان اندازه المان بهینه انتخاب شد که با سه قطر سوراخ ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر جهت انتخاب قطر بهینه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. فرض هم‌راستا بودن سوراخ‌ها کماکان برقرار می‌باشد. منحنی تغییرات فشار در دو نقطه انتخابی در خروجی سوراخ بیرونی و میانی لایه‌ها در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) نمایش داده شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش قطر سوراخ فشار سریع‌تر افت می‌نماید. افزایش دبی تخلیه سریع‌تر را به همراه خواهد داشت. با قطر سوراخ ۱/۵ میلی‌متر هوای محبوس در کمتر از ۹۰۰ ثانیه تخلیه خواهد شد. افزایش قطر سوراخ به ۲ میلی‌متر این زمان را تا ۳۰۰ ثانیه بهبود می‌بخشد. کاهش قطر، نرخ تخلیه را بسیار آهسته خواهد کرد. با طولانی شدن زمان حل قطر ۱ میلی‌متر، به دلیل افزایش چشمگیر هزینه محاسباتی حل مورد نظر قطع گردید. با مشاهده منحنی اختلاف فشار در دو نقطه نمونه می‌توان دریافت در همین مدت زمان نیز بیشینه اختلاف فشار در قطر سوراخ ۱ میلی‌متر رخ داده است و حل این بازه پوشش داده شده است.

نمودار اختلاف فشار در دو نقطه نمونه‌برداری با طول المان ۱۰ میلی‌متر و قطر سوراخ ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر در شکل (۱۷) نشان داده



شکل ۱۹- بیشینه اختلاف فشار در دو نقطه نمونه برداری با طول المان ۵ و قطر سوراخ ۱/۵ میلی متر در حالت سوراخ هم راستا و سوراخ کاری سرشی لایه ها

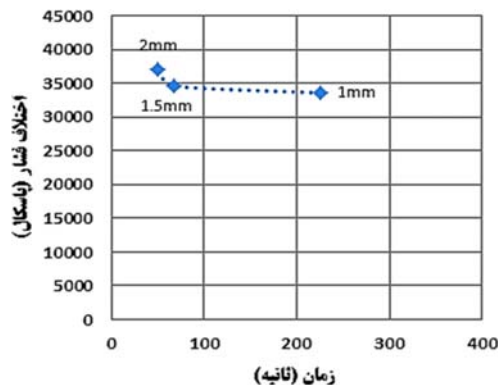
نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی پارامترهای مؤثر در سوراخ کاری عایق‌های چندلایه برای کارایی در طول پرتاب محموله پرداخته شد. قطر سوراخ، فواصل سوراخ کاری و سرش لایه به لایه پارامترهای مهم در نحوه خروج هوای محبوس شده شناسایی شدند. هر اندازه فواصل بین سوراخ‌ها کمتر و قطر سوراخ‌ها بیشتر باشد روند تخلیه هوای محبوس شده نزدیک‌تر به منحنی تغییرات فشار داخل دماغه پرتابگر خواهد بود؛ اما باید توجه داشت ایجاد سطح سوراخ کاری بیشتر بر روی لایه‌ها از خاصیت عایق بودن لایه‌ها خواهد کاست. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد قطر سوراخ ۱/۵ میلی متر با فواصل ۵ میلی متری کمترین اختلاف فشار را بین لایه‌های عایق چندلایه ایجاد خواهد کرد؛ اما فاصله کم بین سوراخ‌ها از استحکام لایه‌ها خواهد کاست. لذا برای کمترین فاصله مناسب بین لایه‌ها، فاصله ۱۰ میلی متر انتخاب بهینه خواهد بود. بدین ترتیب برای جبران فاصله بیشتر بین سوراخ‌ها در حفظ زمان تخلیه هوای محبوس شده، قطر ۲ میلی متر بهترین قطر سوراخ کاری برای لایه‌ها خواهد بود. برای کاستن اختلاف فشار ایجاد شده با قبول پنالتی زمانی، می‌توان از قطر ۱/۵ میلی متر استفاده کرد. سرش سوراخ‌ها بین لایه‌ها می‌تواند زمان تخلیه را تا چندین برابر افزایش دهد. در نتیجه اختلاف فشار بین لایه‌های میانی و خارجی افزایش خواهد یافت. لذا باید توجه داشت برای جلوگیری از پارگی بهتر است سوراخ‌ها هم راستا باشند اما در صورت عدم هم راستایی لازم است از قطرهای بزرگ‌تر سوراخ کاری لایه‌ها بهره برد.

مراجع

- [1] G. Chen, T. Sun, J. Zheng, Z. Huang, and J. Yu, "Performance of multilayer insulation with slotted shield," *Cryogenics*, vol. 34, pp. 381-384, 1994.
- [2] I. Cotoros and A. Hashemi, "Multilayer Insulation Venting During Payload Depressurization," in *ASME*

با عبور نمودار از نقاط بیشینه نمودار فوق، می‌توان رفتار افزایشی اختلاف فشار بیشینه را با افزایش قطر سوراخ شناسایی کرد. این روند در شکل (۱۸) نمایش داده شده است.



شکل ۱۸- بیشینه اختلاف فشار در دو نقطه نمونه برداری در قطر سوراخ‌های ۱، ۱/۵ و ۲ میلی متر با طول المان ۱۰ میلی متر

در قطر ۱/۵ میلی متری و بیش از آن و اندازه المان ۱۰ میلی متر، اختلاف فشار بیشینه بین دو نقطه اندازه‌گیری تغییرات کمتری خواهد داشت. کاهش بیشتر قطر سوراخ کاری تنها زمان تخلیه را افزایش داده است و تأثیر چندانی بر اختلاف فشار بیشینه نخواهد گذاشت. با افزایش قطر، پنالتی افزایش اختلاف فشار بیشینه گریزناپذیر خواهد بود.

باید توجه داشت با وجود مناسب بودن سوراخ‌های سرتاسری برای تخلیه هوای محبوس شده، همیشه نمی‌توان از سوراخ‌های هم راستا استفاده نمود. عبور ذرات باردار از حفره و رسیدن به سطح پوشش داده شده یکی از معایب سوراخ‌های هم راستا می‌باشد. همچنین عبور شار خورشیدی و رسیدن آن به سطح زیرین از خاصیت عایق بودن عایق‌های چندلایه خواهد کاست. همچنین در فرآیند لایه چینی در صورت استفاده از لایه‌های از پیش سوراخ شده امکان هم راستا نمودن سوراخ‌ها بسیار دور از ذهن خواهد بود. برای نشان دادن میزان تأثیر عدم هم راستایی سوراخ‌ها در یکی از موارد بررسی شده، سرش لایه به لایه اعمال شد. بیشترین تأثیر سرش لایه هنگامی رخ خواهد داد که سوراخ‌های یک لایه نسبت به لایه‌های مجاور، نصف فاصله بین سوراخ‌ها در دو جهت فاصله داده شود. برای قطر سوراخ ۱/۵ میلی متر و اندازه المان ۵ میلی متر اختلاف فشار ایجاد شده بین دو نقطه میانی و خروجی در حالت سوراخ هم راستا و سوراخ کاری سرشی در شکل (۱۹) به نمایش در آمده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان تخلیه هوای محبوس شده بیش از ۵ برابر افزایش یافته است. سرش لایه‌ها، اختلاف فشار ایجاد شده را نسبت به حالت سوراخ کاری هم راستای همسان ۱/۸ برابر افزایش خواهد داد؛ بنابراین می‌توان دریافت از نظر ملاحظات خروج هوای محبوس شده سوراخ هم راستا احتمال پارگی یا ترکیدگی کمتری خواهد داشت.

- [8] R. Hatakenaka, M. TAKESHI, H. Sugita, M. Saitoh, and T. Hirai, "Thermal performance and practical utility of a mli blanket using plastic pins for space use," in *43rd International Conference on Environmental Systems*, IECS, Vali, p. 3503, 2013.
- [9] R. Tramel, S. Sutherlin, and W. Johnson, "Multilayer Insulation Ascent Venting Model," NASA/TM—2017–219844, Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama 35812, 2017.
- [10] W. Johnson, K. Heckle, and J. Fesmire, "Heat Loads Due To Small Penetrations In Multilayer Insulation Blankets," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 278, no. 1: IOP Publishing, p. 012197, 2017.
- [11] Deng B. C., Yang S Q, Xie X J, and *et al.*, "Experimental Research of Perforation Rate for Multilayer Insulation Used in Cryogenic Transfer Lines," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, , vol. 502, no. 1: IOP Publishing, p. 012118, 2019.
- [12] Sheldahl A Flex Company, The Red Book, Rev C, p.p. 15-20, July 27, 2015. Available: <https://www.sheldahl.com/sites/default/files/2017-09/RedBook.pdf>.
- International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 42223, pp. 55-59, 2005.
- [3] W. L. Johnson, A. O. Kelly, and K. M. Jumper, "Two dimensional heat transfer around penetrations in multilayer insulation," final Report, NASA/TP–216315, Kennedy Space Center, FL 32899-0001, 2012.
- [4] J. Fesmire, S. Augustynowicz, and C. Darve, "Performance characterization of perforated multilayer insulation blankets," *Proceedings of the nineteenth international cryogenic*, pp. 843-846, 2002.
- [5] R. A. Efromson, "The performance of multilayer insulation in a rapidly depressurizing environment," in *NASA, Goddard Space Flight Center, 16th Space Simulation Conference Confirming Spaceworthiness Into the Next Millennium*, 1990.
- [6] Hamed R. Najafi , Esmail Moeini, Seyed Mohammad Hossein Karimian , Hamed Alisadeghi "Evaluation of Effective Emissivity of a Multilayer Insulation Blanket Using Test " *Journal of Space Science and Technology*, vol. 8, Issue 1, pp. 19-25, 2015.
- [7] T. Lewandowski and P. Doerffer, "Determination of an aerodynamic perforation of plates by means of numerical simulation," *Aerospace Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 58-63, 2012.

COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

