

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. Ph.D., Aerospace Science and Technology Research Institute, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. Professor, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
3. Ph.D., Materials and Energy Research Institute, Iran Space Research Center, Tehran, Iran

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

Abstract

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

1. Introduction

Multi-layer thermal insulators prevent heat loss from satellites. This insulation consists of several layers, each of which has a high reflectance. To prevent the layers from contact, thin mesh sheets with a very low conductivity are used between them to minimize heat transfer. The absence of gas between the layers will increase the efficiency of multi-layer insulation. Insulation layers are designed and constructed in such a way that the gases trapped between the layers can be removed from the system. Also, to prevent rupture, bursting and separation from the surface of multilayer insulation due to the rapid pressure drop during the launch of the spacecraft, perforation is done.

If the number of gas outlets is not enough, cracks will continue to grow from the same holes. On the other hand, if the number of gas outlets in the MLI is too much, its insulating property will be lost. Therefore, the design of these paths and holes must be done carefully.

Different methods have been used to create gas exit paths in multilayer insulation. Chen et al. [1] used a slit matrix on

multilayer insulation. Kotros and Hashemi [2] have proposed an experimental formula for the exit of gas between layers of multilayer insulation using an X-shaped slit. Wesley et al. [3] measured the amount of heat loss from multilayer insulation. Layer drilling in the construction of this multi-layer insulation with a diameter of 1/16 inches and at intervals of 2 inches has been done using the punching method. Deng et al. [4] experimentally extracted the optimal perforation rate of multilayer insulation for cryogenic applications. The diameter of the holes in this study is 1 mm. Efromson [5] investigated the thermal performance of multilayer insulation during rapid pressure drop. In this paper, a 10-layer insulation with a diameter of 1.3 mm and perforated surface to the total insulation surface of 2.2% has been used. Fasmir et al. [6] have studied the thermal performance of multilayer insulation on a large scale for the use of space launchers and cryogenic spacecraft. The number of layers of this insulation is 15 layers and the diameter of its holes is 2 mm. In that study, the distance between the holes was 56 mm. Ramezani



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/).

How to cite this article:

H. Ramezani Najafi, S.M. 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. 11-21, 2023 (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1407>.

et al. [7] tested the radiant thermal efficiency of multilayer insulation in vacuum. The number of layers of this insulation is 20 layers and the diameter of its holes is 1.5 mm with intervals of 15 mm.

Assuming circular holes, the effective parameters in removing gas from multilayer insulation are diameter of Corresponding Author the holes, distance between them and shifting on holes in layer-by-layer.

2. Solution Method

The perforation matrix will be repeated on the multilayer insulation layers in length and width, therefore, the symmetry boundary condition was used (Figure 1).

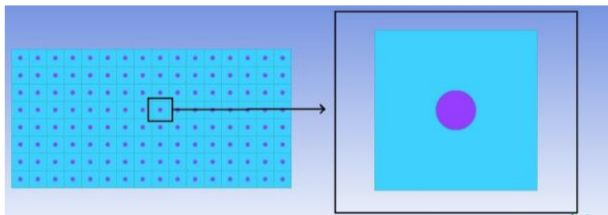


Figure 1. using the symmetry boundary condition

3. Results and Discussion

To evaluate the optimal element length, assuming a hole diameter of 1.5 mm, three element sizes of 5, 10 and 20 mm were studied (Figure 2).

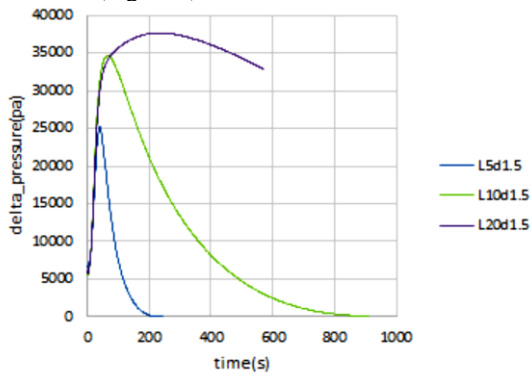


Figure 2. Pressure difference between inside and outside with element lengths of 5, 10 and 20 mm and hole diameters of 1.5 mm

The element size of 10 mm was selected as the optimal element size, which is studied with three hole diameters of 1, 1.5 and 2 mm (Figure 3).

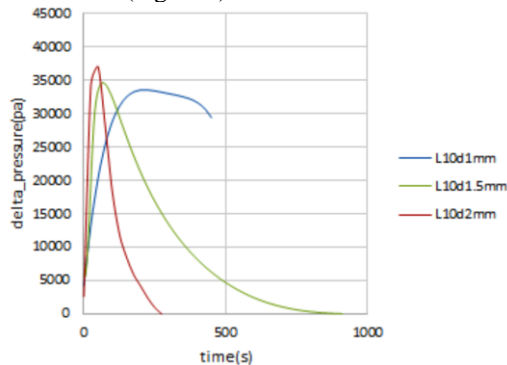


Figure 3. Pressure differences between inside and outside with element lengths of 10 mm and hole diameters of 1, 1.5 and 2 mm

4. Conclusions

The smaller distance between the holes and the larger diameter of the holes, leads to better discharging trapped air inside the launcher's fairing. However, it should be noted that creating more perforated surface on the layers will reduce the insulating properties of the layers. Studies have shown that a hole diameter of 1.5 mm at intervals of 5 mm will create the least pressure difference between multilayer insulation layers. But the short distance between the holes will definitely reduce the strength of the layers. Therefore, for the minimum suitable distance between the layers, a distance of 10 mm will be the optimal choice.

With this assumption, a diameter of 2 mm is the best drilling diameter for the layers in terms of air evacuation time. To reduce the pressure difference created by accepting a time penalty, a diameter of 1.5 mm can be used.

Sliding of the holes between the layers can increase the time of discharging process. As a result, the pressure difference between the middle and outer layers will increase. Therefore, it should be noted that in order to prevent rupture, it is better for the holes to be in line, but if there is no alignment, it is necessary to use larger perforation diameter of the layers.

5. References

- [1] G. Chen, T. Sun, J. Zheng, Z. Huang, and J. Yu, "Performance of multilayer insulation with slotted shield," *Cryogenics*, ICEC Supplement, Vol. 34, pp. 381-384, 1994.
- [2] I. Cotoros, AB Hashemi, "Multilayer Insulation Venting During Payload Depressurization," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 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] B. Deng, S. Yang, X. Xie, D. Wu, W. Pan, X. Li, and Q. Li, "Experimental Research of Perforation Rate for Multilayer Insulation Used in Cryogenic Transfer Lines," *IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering* 502,012118, 2019.
- [5] R. A. Efromson, "The performance of multilayer insulation in a rapidly depressurizing environment," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, USA*, 2005.
- [6] J. Fesmire, S. Augustynowicz, and C. Darve, "Performance characterization of perforated multilayer insulation blankets," *Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology*, pp. 56-72, 1991.
- [7] H. R Najafi, E. Moeini, S. M. H. Karimian, and H. Alisadeghi, "Evaluation of Effective Emissivity of a Multilayer Insulation Blanket Using Test," *Space Science and Technology*, Vol. 8, Issue 1, April 2015.

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

حامد رضانی 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، تهران، ایران

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

چکیده

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

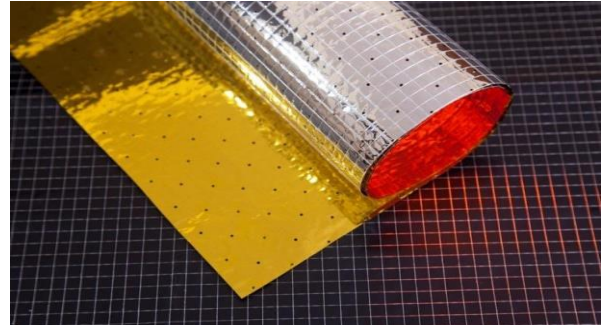
را به کمترین مقدار برسانند. عدم وجود گاز بین لایه‌ها بر کارایی عایق چندلایه خواهد افزود. لایه‌های عایق طوری طراحی و ساخته می‌شوند که بتوان گازهای محبوس شده در بین لایه‌ها را از سیستم خارج کرد. همچنین برای جلوگیری از پارگی، ترکیدگی و جدا شدن از سطح عایق‌های چندلایه به واسطه افت فشار سریع محیط اطراف در 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 عایق‌سازی 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 میلی‌متر و سطح باز یا همان سطح سوراخ شده به سطح کل عایق ۲/۲٪ بهره گرفته شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد گازروی از مواد تشکیل‌دهنده لایه‌ها، نسبت به محدودیت جریان هوای خروجی، کارایی عایق‌های چندلایه را به مقدار بیشتری کاهش خواهد داد. رمضانی و همکاران [۶] به آزمون کارایی حرارتی تشعشی عایق‌های چندلایه در خلأ پرداختند. تعداد لایه‌های این عایق ۲۰ لایه و قطر سوراخ‌های آن ۱/۵ میلی‌متر با فواصل ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ضریب صدور مؤثر برای این عایق چندلایه کمتر از ۰/۰۴ به‌دست آمده است که تطابق مناسبی با فرمول‌های محاسباتی دارد. لواندفسکی و دورفر [۷] با مدل‌سازی محاسباتی عبور جریان از سوراخ بر روی یک‌لایه میزان بهینه قطر به عمق سوراخ را بررسی کردند. قطر سوراخ در بازه ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌متر و ضخامت صفحه ۱ میلی‌متر 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 پیش‌بینی آیرودینامیک جریان، ۸/۵۷٪ شناسایی شده است. هاتاکناکا و همکاران [۸] عملکرد نوع جدید از عایق‌های چندلایه را بدون استفاده از ماشین خیاطی (بدون کوک) جهت بهبود عملکرد حرارتی مورد آزمایش قرار دادند. تضعیف عملکرد معمولاً در کوک‌ها، در کل لایه‌های عایق و چسب‌های نر و مادگی گیره‌ای رخ می‌دهد. نقش کوک در عایق، ثابت نگهداشتن لایه‌ها و همچنین تقویت لایه‌ها است. در این پژوهش از بین‌های برجسی^۴ که برای چسباندن قیمت روی اجناس استفاده می‌شود، بهره گرفته شده است. در واقع استفاده از بین‌ها برای ثابت کردن لایه‌ها، بدون فشردن آن‌ها، بسیار حائز اهمیت است. قطر سوراخ‌های عایق ۲ میلی‌متر با فواصل ۵۰ میلی‌متر 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 عایق‌های چندلایه استفاده نموده است. تعداد لایه‌های به کار رفته ۴۵ عدد و قطر سوراخ‌های آن ۱/۲۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جانسون و همکاران [۱۰] میزان عبور حرارت را از عایق چندلایه‌ای به قطر سوراخ کاری ۱ میلی‌متر مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله تعداد لایه‌ها ۱۰ عدد لحاظ و آزمون انجام شده با محاسبات مقایسه شده است. آن‌ها نشان دادند که انتقال حرارت تشعشی عبوری افزایش یافته از مسیر سوراخ‌ها تأثیر بسیار بیشتری نسبت به کاهش انتقال حرارت هدایتی به واسطه بین‌های مورد استفاده در اتصالات دارد. دنگ و همکاران [۱۱] از روش تجربی نرخ بهینه سوراخ‌کاری عایق‌های چندلایه برای کاربردهای کرایوژنیک استخراج نمودند. قطر سوراخ‌ها در این تحقیق ۱ میلی‌متر

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 چسب‌های اتصال‌دهنده به‌خصوص در مرزهای آن می‌شود.



شکل ۱- نمونه سوراخ کاری ماتریسی لایه خارجی عایق

نکته قابل ملاحظه در طراحی سوراخ‌های عایق چندلایه این است که اگر تعداد مسیرهای خروج گاز کافی نباشد، رشد ترک از همان محل سوراخ‌ها 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 سوراخ‌ها باید با دقت زیادی انجام گیرد.

روش‌های متفاوتی برای ایجاد مسیرهای خروج گاز در عایق‌های چندلایه به کار رفته است. چن و همکاران [۱] از طرح ایجاد شکاف بر روی عایق چندلایه استفاده نمودند. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که ترکیبی از لایه‌های شکافدار می‌تواند توزیع فشار مناسب‌تری را برای عملکرد عایق چندلایه فراهم آورد. مقرون به صرفه بودن شکاف‌های یک‌بعدی نسبت به سوراخ کاری از نکات مورد اشاره این مقاله در کاربردهای بروندی زمینی می‌باشد. کوتروس و هاشمی [۲] فرمول تجربی را برای خروج گاز از بین لایه‌های عایق‌های چندلایه با استفاده از شکاف X شکل پیشنهاد کردند. شکاف‌های ایجاد شده بر روی عایق چندلایه، طولی برابر با ۱/۸ سانتی‌متر داشتند. با ارائه منحنی اختلاف فشار درون عایق و محیط اطراف نشان دادند با افزایش تعداد شکاف‌ها 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 اندازه‌گیری 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 فضایی‌های بروندی، عملکرد حرارتی عایق‌های چندلایه را در مقیاس بزرگ مورد بررسی قرار دادند. تعداد لایه‌های این عایق ۱۵ لایه و قطر سوراخ‌های آن ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در تحقیق یاد شده فاصله بین سوراخ‌ها ۵۶ میلی‌متر 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

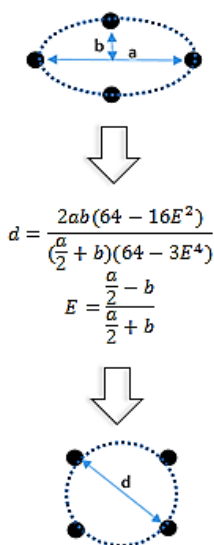
در دسته اول فاصله سطرها و ستون‌ها یکسان فرض شده و نیز سرش بین سطرها یا ستون‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در این دسته، تنها با داشتن قطر سوراخ و فاصله بین سوراخ‌ها در سطر یا ستون می‌توان الگوی سوراخ کاری را مشخص کرد.

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 معادل سازی 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 جذر ۲ می‌توان از نمودارهای تخلیه فشار ماتریس مربعی با فاصله به دست آمده، بهره برد.

هندسه و شبیه‌سازی

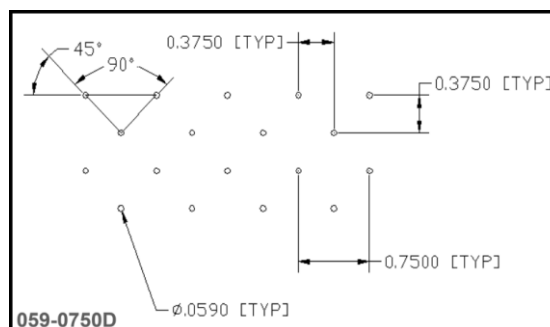
پیش از انجام شبیه‌سازی، لازم است شرایط مرزی حاکم بر مسئله به‌طور کامل شناسایی شود. ماهواره‌ها با قرار گرفتن در داخل کلاهک پرتابگر تابع شرایط حاکم بر آن خواهند بود. با اوج‌گیری پرتابگر و افزایش ارتفاع آن از فشار داخل کلاهک کاسته و با رسیدن به سطوح بالای جو، پوسته کلاهک جدا شده و ماهواره در معرض هوای رقیق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



شکل ۳- روند معادل سازی ماتریس سوراخ کاری غیر مربعی به مربعی

می‌باشد. آن‌ها در مقاله منتشر شده نرخ بهینه سوراخ کاری را ۰/۳۹٪ 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.

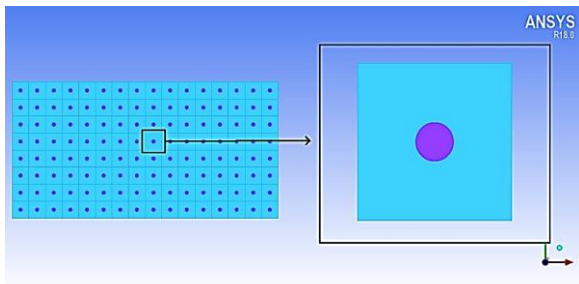
پارامترهای مؤثر در مسیر تخلیه

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

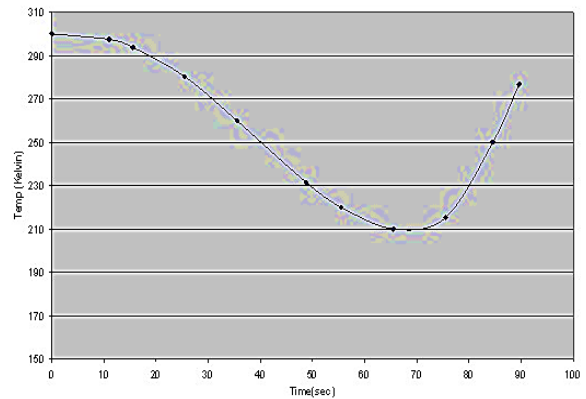
- قطر سوراخ
- فاصله بین سوراخ‌ها (فاصله بین سطرها و ستون‌ها)
- سرش^۶ در سوراخ کاری لایه به لایه عایق
- الگوهای مشاهده شده در مقالات را می‌توان در دو دسته تقسیم‌بندی کرد. الگوهایی که ماتریس سوراخ کاری در آن‌ها در هر لایه به شکل مربعی است و الگوهایی که ماتریس سوراخ کاری آن‌ها غیر مربعی یا با سرش ستون‌ها 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^۶ می تواند تا حدود زیادی مشکل تعداد شبکه را برطرف کند. استفاده از شرط مرزی پریودیک با توجه به فیزیک مسئله کارایی نخواهد داشت. تفاوت در تولید جریان در این مرزها است. در مرز پریودیک - 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 پریودیک، 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.

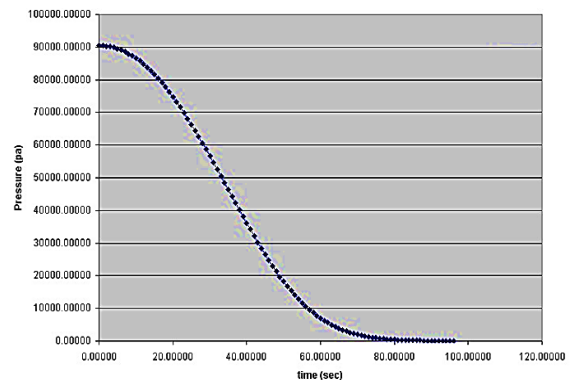


شکل ۶- المان مورد تحلیل با استفاده از شرط مرزی تقارن



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 مخابره 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 فلوئنت 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 آن ها دارد. نسبت فاصله بین لایه ها به طول و عرض عایق بسیار ناچیز است. لذا نسبت منطقی^۸ در این هندسه بسیار پایین خواهد بود.

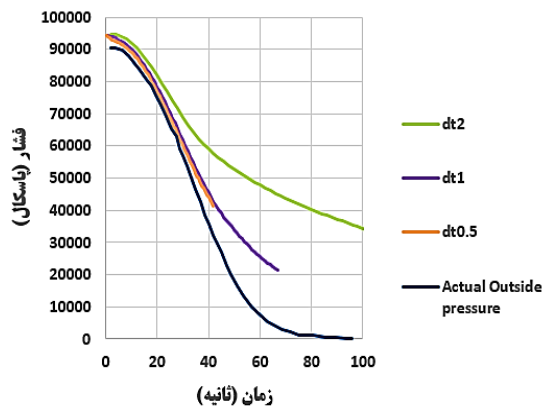
برای ایجاد شبکه بندی مناسب در محل سوراخ لازم است شبکه ریزتری در آن نقاط ایجاد شود. با در نظر گرفتن تعداد سوراخ های تعبیه

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.

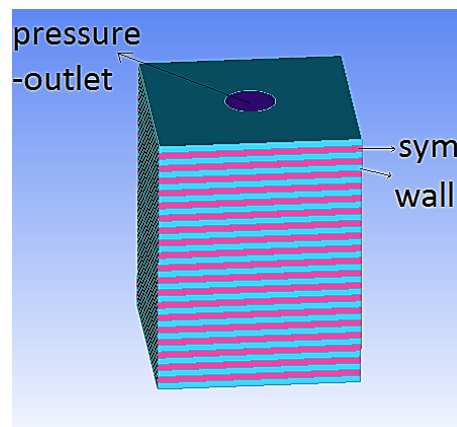


شکل ۹- تغییرات فشار در نقطه خروجی نمونه‌برداری در گام‌های زمانی متفاوت

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

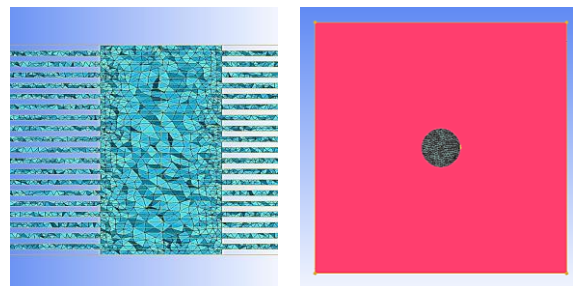
برای تعیین ماتریس سوراخ کاری بهینه، هر اندازه قطر سوراخ‌ها کوچک‌تر و فاصله بین آن‌ها بیشتر باشد، در صورت تخلیه هوا در مدت زمان مناسب بدون آسیب رسیدن به اتصالات، ماتریس سوراخ کاری مطلوب‌تری حاصل می‌شود. لذا برای انجام تحلیل‌ها پارامترهای ابعادی متغیر در شکل (۱۰) انتخاب شد.



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

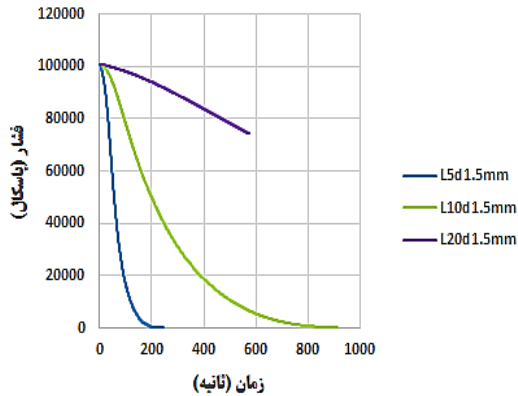
ماهیت این مسئله گذرا است، بنابراین روش حل گذرا^{۱۰} در نرم‌افزار فلونت انتخاب شد. با توجه به احتمال وقوع سرعت‌های بالا در هنگام خروج گاز از روش چگالی مینا^{۱۱} استفاده شده است. سیال مورد نظر هوا با فرض گاز ایده‌آل انتخاب گردید. با احتساب فاصله بین لایه‌ها در مرتبه 10^{-1} و لزجت در مرتبه 10^{-5} و سرعت‌های بالا در محل سوراخ خروجی عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ خواهد بود. لذا فرض جریان مغشوش در میدان حل برقرار است. در این مقاله جریان سیال، لزج و روش اسپالارت آلماراس^{۱۲} برای مدل‌سازی اغتشاشات آن بکار گرفته

12. Spalart allmaras

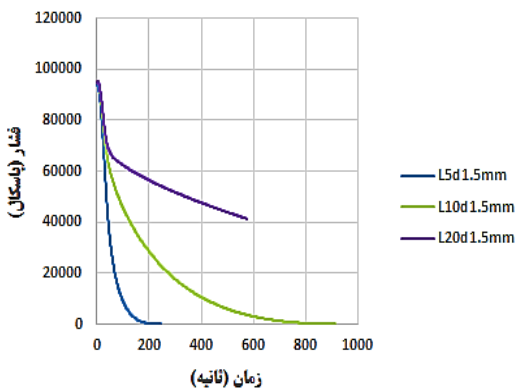
10. Transient

11. Density base

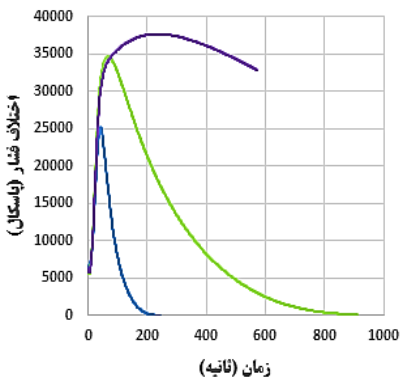
اندازه المان به ۲۰ میلی‌متر به ۳۷ کیلو پاسکال خواهد رسید. با افزایش بیشتر اندازه المان تنها میزان کمی به بیشینه اختلاف فشار اضافه خواهد شد. لذا با عبور نمودار از نقاط بیشینه نمودار فوق، می‌توان رفتار افزایشی اختلاف فشار بیشینه را شناسایی کرد. بیشینه اختلاف فشار در قطر ثابت با افزایش اندازه المان در شکل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



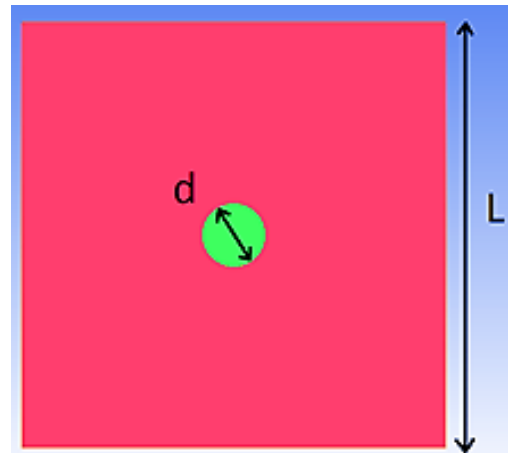
شکل ۱۰- تغییرات فشار در نقطه میانی نمونه‌برداری با طول المان ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و قطر سوراخ ۱/۵ میلی‌متر



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.

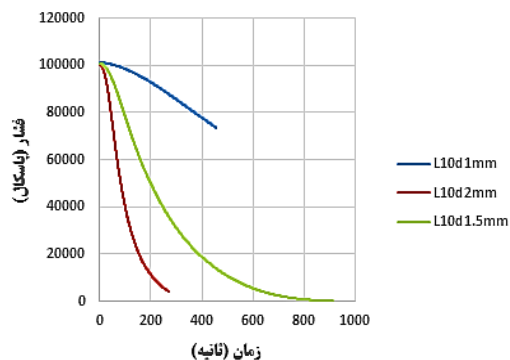
برای مقایسه نحوه خروج هوا از میان لایه‌ها در دو نقطه مینا، فشار در تمامی تحلیل‌ها مقایسه شد. نقطه اول در سوراخ خروجی بیرونی‌ترین لایه عایق در نظر گرفته شده است و نقطه دوم در میانی‌ترین لایه عایق تعبیه شده است که در طول زمان تخلیه، بیشترین فشار را به علت دورتر بودن نسبت به خروجی تجربه خواهد کرد.

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.

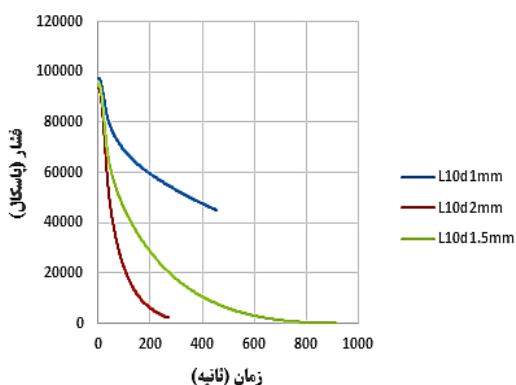
همان‌طور که مشاهده می‌شود در نقطه میانی با افزایش طول المان یا به عبارتی افزایش فاصله بین سوراخ‌ها، فشار با سرعت کمتری افت خواهد کرد. با افزایش ۲ برابری اندازه المان از ۵ به ۱۰ میلی‌متر زمان تخلیه، رشد ۴/۵ برابری خواهد داشت. منحنی افت فشار در اندازه المان ۲۰ میلی‌متری تا زمان ۶۰۰ ثانیه دنبال می‌شود. 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

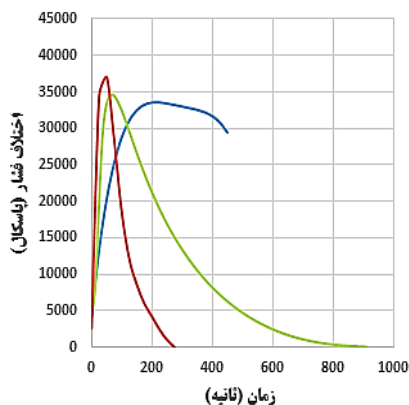
شده است. با افزایش قطر سوراخ بیشینه اختلاف فشار بیشتری بین لایه‌های داخلی و خارجی عایق چندلایه به وجود خواهد آمد اما مدت زمان تخلیه کوتاه‌تر خواهد شد. این امر به دلیل افزایش سرعت تخلیه در سوراخ‌های خروجی می‌باشد که فشار کمتری را در آن نقاط به دنبال خواهد داشت.



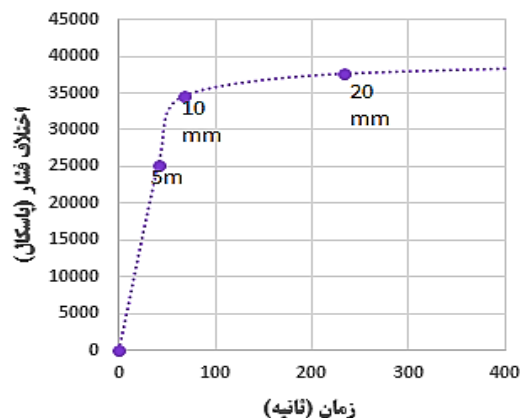
شکل ۱۴ - تغییرات فشار در نقطه میانی نمونه‌برداری با طول المان ۱۰ میلی‌متر و قطر سوراخ ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر



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



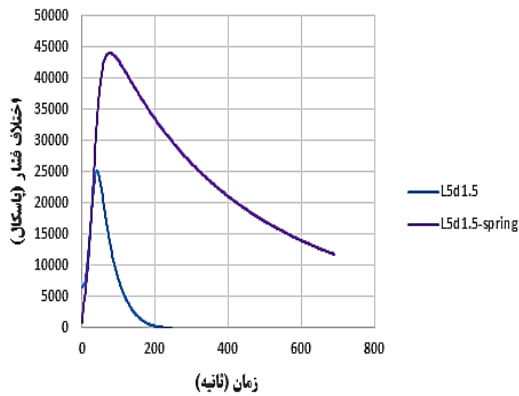
شکل ۱۷ - بیشینه اختلاف فشار در دو نقطه نمونه‌برداری در قطر سوراخ ۱/۵ میلی‌متر با افزایش طول المان

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 همراستا و سوراخ کاری سرشی لایه‌ها

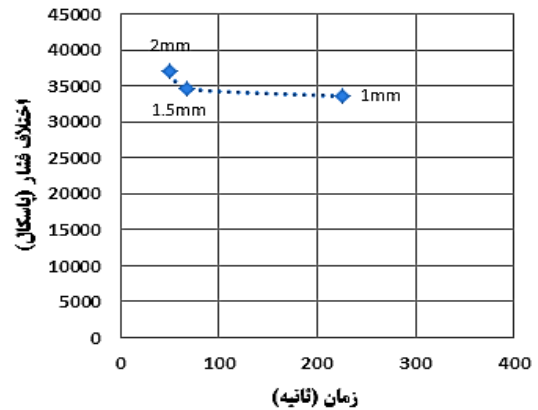
نتیجه گیری

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 پهنالی 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 همراستا باشند اما در صورت عدم همراستایی لازم است از قطرهای بزرگ‌تر سوراخ کاری لایه‌ها بهره برد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

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، پهنالی 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 همراستا استفاده نمود. عبور ذرات باردار از حفره و رسیدن به سطح پوشش داده شده یکی از معایب سوراخ‌های همراستا 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 همراستا نمودن سوراخ‌ها بسیار دور از ذهن خواهد بود. برای نشان دادن میزان تأثیر عدم همراستایی 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 همراستا 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 همراستای همسان ۱/۸ برابر افزایش خواهد داد؛ بنابراین می‌توان دریافت از نظر ملاحظات خروج هوای محبوس شده سوراخ همراستا احتمال پارگی یا ترکیدگی کمتری خواهد داشت.

مراجع

- [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.
- [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>.
- [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," *ASME 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," *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.