

## مدلسازی عددی و تجربی اثر الگوهای دوخت بر عملکرد حرارتی عایق‌های چندلایه

فاطمه بابایی<sup>۱</sup>، احسان بنی اسدی<sup>۲</sup>، محمد رضا پاک منش<sup>۳</sup>، حمید مس فروش<sup>۴</sup>

۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، e.baniasadi@eng.ui.ac.ir

۳ استادیار، گروه مهندسی مواد، پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان

۴ کارشناسی ارشد، پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳

### چکیده

یکی از چالش‌های طراحی و ساخت ماهواره‌ها؛ تغییرات شارهای حرارتی وارد بر بدنه است. به منظور کاهش اثرپذیری ماهواره از محیط اطراف، از عایق‌های چندلایه استفاده می‌شود. نحوه اتصال پتوهای عایق تأثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی دارند. هدف اصلی این پژوهش تعیین شرایطی است که تحت آن کمترین مقدار ضریب نشر مؤثر و شار حرارتی در عایق‌های چند لایه حاصل شود. به همین منظور چندین طرح اتصال دوخت مدلسازی شده است و طرح اتصال لایه به لایه به عنوان بهترین طرح اتصال بین پتوهای عایق تعیین شد. همچنین به منظور اعتبارسنجی، مدل بدون دوخت و طرح اتصال لایه به لایه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. انحراف نتایج مدل عددی از نتایج تجربی کمتر از ۹ درصد است. به منظور ارزیابی عملکرد عایق چندلایه، اثر تعداد لایه‌ها، اثر ضخامت لایه‌ها و جنس مواد نیز تحلیل شده است. همچنین، به دلیل سیکل دمایی در محیط اطراف ماهواره دو حالت شرایط محیطی گرم و سرد لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد طرح اتصال لایه به لایه با تعداد ۱۲ لایه که در حالت محیطی گرم شار حرارتی ۲/۰۲۱۶ وات بر متر مربع و ضریب نشر ۰/۰۰۳۷ و در حالت محیطی سرد شار حرارتی ۲/۳۶۰ وات بر متر مربع و ضریب نشر ۰/۰۰۴۸ دارد، بهترین طرح اتصال می‌باشد.

### واژگان کلیدی

عایق چندلایه، ضریب نشر حرارتی مؤثر، کنترل حرارتی ماهواره، جنس لایه بازتابنده

## ۱. مقدمه

عایق‌های چندلایه یکی از رایج‌ترین عناصر کنترل حرارت در ماهواره‌ها هستند. عایق چندلایه برای کاهش نشر گرما در سیستم‌های کرایزنیک و برای کنترل نشر گرمای ماهواره استفاده می‌شود. مقاومت در برابر نوسانات شار حرارتی، جلوگیری از نشت گرما به دلیل رسانایی پایین و دارا بودن مشخصه‌های مناسب از جمله سبک بودن، سازگاری با محیط زیست و وجود شبکه‌های جداکننده با رسانایی پایین بین سپرهای حرارتی، باعث شده است که در اکثر کاربردهای فضایی به خصوص بدنه خارجی ماهواره‌ها از این دسته عایق‌ها استفاده شود [۱]. عایق چند لایه که یک پتو حرارتی نیز نامیده می‌شود؛ از چندین لایه از سپرهای با فاصله و با خاصیت انعکاسی که عمود بر جهت جریان گرما قرار دارند، تشکیل شده‌اند. به طور معمول لایه‌های داخلی، لایه‌های بسیار نازک از کپتون یا میلار هستند که از دو طرف با آلومینیوم پوشانده شده‌اند. آلومینیوم مانند آئینه باعث می‌شود ورق‌ها بسیار انعکاس‌پذیر و دارای شدت نشر کم باشند که منجر به مقاومت زیاد در برابر انتقال حرارت تابشی بین لایه‌ها می‌شود. پوشش خارجی معمولاً نسبت به لایه داخلی ضخیم‌تر است تا مقاومت مکانیکی آن افزایش یابد. در لایه خارجی معمولاً فقط قسمت داخلی با آلومینیوم پوشانده می‌شود؛ زیرا آلومینیوم وقتی در معرض اشعه ماوراء بنفش قرار می‌گیرد، دچار تغییر خواص می‌شود. لایه خارجی می‌تواند به صورت کپتون ساده باشد یا برای مثال از رنگ کربن سیاه استفاده شود تا از انعکاس ناخواسته جلوگیری شود.

در صورت نیاز به خواص مکانیکی بهتر به عنوان مثال محافظت در برابر ریزش‌ها می‌توان از مواد مقاوم‌تر مانند پارچه بتا برای لایه بیرونی استفاده کرد. در هر صورت از آنجا که پوشش خارجی در معرض تابش خورشیدی است باید سازگاری آن با اشعه ماوراء بنفش به دقت بررسی شود. برای جلوگیری از تماس مستقیم بین سپرها و در نتیجه هدایت گرما بین ورق‌ها، از جداکننده‌های غیرفلزی با رسانایی کم استفاده می‌شود. به منظور به حداقل رساندن تماس آن‌ها معمولاً به صورت شبکه هستند. به طور معمول از شبکه‌های داکرون و نومکس برای جداکننده استفاده می‌شود [۲].

عایق چندلایه اولین بار در سال ۱۹۰۰ توسط سرجیمز دیوور آزمایش شد. وی این آزمایش را با سه لایه فویل آلومینیومی انجام داد [۳]. با این حال، اواخر دهه ۱۹۴۰ بود که کرنل سیستم محافظ

تابش لایه‌ای خود را توصیف کرد و عایق چندلایه ظهور پیدا کرد [۴]. اما اغلب پترسون را به عنوان آغازگر عایق چندلایه می‌شناسند [۵]. مطالعات در مورد عایق‌های چندلایه به صورت مطالعات تجربی، مطالعات عددی و مطالعات تجربی-عددی تقسیم بندی شده است.

در مطالعات تجربی، تنها و همکاران [۶] شدت نشر مؤثر پوشش نازک بر روی یک بستر فلزی را براساس نظریه الکترومغناطیسی بررسی کردند. ترکیبات مختلف فلزات (طلا، رودیوم، پلاتین) و غیرفلزی (اکسید سیلیکون و دی‌اکسید) با مقادیر مختلف ضخامت بررسی شده است. هدف از این کار تجزیه و تحلیل ترکیبات پوشش‌ها برای یافتن مناسب‌ترین عملکرد مورد نیاز (انتشار، کم بودن وزن) در محدوده‌های مختلف دما است. اندازه‌گیری‌های شدت نشر مؤثر بر روی دو نمونه انجام شد و نتایج با توجه‌های نظری توافق خوبی داشتند. سگیتا و همکاران [۷] عملکرد حرارتی (شدت نشر مؤثر) پتوهای عایق چند لایه را با استفاده از روش کالریمتر مایع جوش با روش نیتروژن مایع اندازه‌گیری کردند که قادر به اندازه‌گیری عملکرد حرارتی پتوهای عایق با درجه بالایی از دقت است. همچنین اثر درزها بر عملکرد حرارتی پتوهای عایق چندلایه اهمیت اساسی داشت، از ۵۰ درصد اتلاف حرارت درزها؛ ۲۳ درصد هدایت، ۱۸ درصد تابش و ۱۰ درصد تلفات بین لایه‌ها می‌باشد. بهترین روش بهبود عملکرد حرارتی، کاهش طول اتصال و هدایت بین لایه‌ها است. در این مقاله HFC-134a با توجه به سمیت کم، قابلیت اشتعال پایین و حرارت نهان انتخاب شده است. داسیلوا و همکاران [۸] نتایج آزمایشی برای خصوصیات حرارتی مؤثر یک پتو عایق چند لایه را برای کاربرد فضایی ارائه دادند. نتایج ارائه شده در این مقاله مربوط به یک پتو ۲۵ لایه است که بر تعیین میزان اشباع مؤثر، جذب مؤثر و هدایت حرارتی مؤثر متمرکز است. نتایج نشان می‌دهد که در عمل افزایش تعداد لایه‌ها همیشه سبب بهبود در عملکرد حرارتی پتو نمی‌شود؛ بلکه عوامل دیگری مانند سطح فشار، نقاط اتصال، نقاط دوخت و همچنین مسائل مربوط به آماده‌سازی پتو در عملکرد حرارتی تأثیرگذار است. جانسون و همکاران [۹] به عنوان بخشی از یک پروژه تحقیقاتی در ناسا، چندین نمونه عایق را آزمایش کردند تا چگالی لایه بهینه را به دست آورند. آنها در پیکربندی پتوهای عایق تنوع چگالی لایه از

این پتو جدید می‌تواند تماس بین سطوح سپرها را از بین ببرد. برای پتوهای معمولی، کنترل میزان تماس میان لایه‌ها دشوار است در نتیجه عملکرد عایق حرارتی پتوهای معمولی که روی فضاپیما نصب شده‌اند، نسبت به این پتوی جدید کاهش می‌یابند. نتایج نشان می‌دهد که این نوع جدید جداکننده با کاربردهای فضایی سازگار است. این جداکننده جدید در دماهای پایین خوب عمل می‌کند و به دلیل مقاومت بالا میزان شدت نشر مؤثر آن ۰/۰۴۶ است. منجان و همکاران [۱۵] یک ساختار عایق چندلایه ترکیب شده برای استفاده در سیستم حفاظت حرارتی با درجه بالا ارائه دادند. در ساختار عایق چند لایه از مواد فیبرکربن در داخل و بیرون مواد متخلخل و مواد فویل آلومینیوم و فویل انعکاسی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد عملکرد عایق حرارتی به شدت تحت تأثیر فشار گاز قرار می‌گیرد و هدایت حرارتی گاز با فشار افزایش می‌یابد. دمای خارجی عایق چندلایه زمانی که فشار گاز به ۰/۰۱ مگا پاسکال کاهش می‌یابد، تغییر نمی‌کند. دمای سطح خارجی عایق‌های چندلایه ترکیب همیشه با افزایش تراکم مواد فیبرکربن و مواد آلومینا، کاهش نمی‌یابد و همچنین تعداد مطلوب فویل‌های انعکاسی ۳۹ است. در مطالعات تجربی عددی، اسپیلرو و همکاران [۱۶] مطالعات تجربی و نظری در مورد تعیین هدایت حرارتی مؤثر از سیستم‌های عایق حرارتی چند لایه با سپرهای مخصوص طراحی شده برای کاربرد در پیل‌های سوختی با درجه حرارت بالا را بررسی کردند. عایق‌ها شامل مواد فیبری و مواد میکرومتخلخل هستند. پایین‌ترین هدایت حرارتی با مواد میکرومتخلخل بدست آمد. صفحات تابش به طور کلی باعث کاهش هدایت حرارتی مؤثر جداکننده میکرومتخلخل می‌شود. ترکیبی از صفحات کم انتشار و جداکننده‌های نازک نوری باعث کاهش بهینه هدایت حرارتی مؤثر می‌شود. دریابگی و همکاران [۱۷] عایق‌های چند لایه دما بالا را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. این عایق چند لایه دما بالا شامل فویل‌های بازتابنده با روکش طلا که توسط جداکننده‌های فیبری آلومینیومی جدا شده‌اند. از یک مدل عددی حجم محدود برای حل معادلات انتقال حرارت ترکیبی تابش و هدایت استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از سپرها در بین عایق، ضریب هدایت مؤثر کل عایق را نسبت به حالتی که بدون سپر است کاهش می‌دهد. وانگ و همکاران [۱۸] تحقیق نظری و تجربی را بر روی عملکرد حرارتی عایق چند لایه چگالی متغیر با پیکربندی‌های مختلف ارائه

۰/۵ تا ۲/۵ لایه در هر میلی‌متر را بررسی کردند. نتایج تجربی نشان‌دهنده افزایش تراکم لایه نسبت به پیش‌بینی عددی است. این به دلیل غلبه بر تابش است که در مدل اجتناب شده است. همچنین پیشنهاد شده است که از چگالی لایه پایین برای بهینه‌سازی بار جرم و گرما استفاده شود. فسمیر و همکاران [۱۰] شش نوع از سیستم‌های عایق چندلایه را مورد آزمایش قرار دادند. این سیستم‌ها شامل میلار/ورق، فویل/ورق، میلار/شبیکه، میلار/پتو، میلار/پارچه، میلار/جداکننده می‌باشد. همچنین سیستم‌های خلا با مواد و پوشش‌های مختلف سرمایی مانند فولاد ضدزنگ، مس و آلومینیوم مورد آزمایش قرار گرفتند. تغییرات سیستم شامل تعداد لایه‌ها از ۱ تا ۸۰ لایه، تراکم لایه‌ها از ۰/۵ تا ۵ لایه در هر میلی‌متر و تکنیک‌های نصب می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد برای شرایط مرزی در دماهای ۷۸ و ۳۰۰ کلوین در خلا بالا، مقدار شار حرارتی حدود ۰/۳ وات بر مترمربع توسط تعدادی از سیستم‌های مختلف عایق چندلایه به‌دست آمده است. در مطالعات عددی، رهقی و همکاران [۱۱] عایق‌های چندلایه را با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی کردند و تأثیر پارامترهای از قبیل تعداد صفحه‌ها، چگالی صفحه‌ها، جنس صفحه و نگره‌دارنده را بر روی عملکرد عایق بررسی کردند. نتایج نشان داد با انتخاب مواد مناسب در ساخت عایق چندلایه می‌توان شار حرارتی ناشی از انواع مکانیزم‌های انتقال گرما در فضاپیماها و ادوات فضایی را کاهش داد. معرفت و همکاران [۱۲] مدلسازی انتقال حرارت هدایتی/تابشی ترکیب شده در عایق چند لایه را بررسی کردند. برای معادلات حاکم بر مساله راه‌حل دقیق وجود ندارد، بنابراین از روش‌های عددی استفاده شده است. توزیع درجه حرارت و جریان‌های گرمای تابشی و هدایتی به دست آمده است. در نهایت پیشنهاد شده است که فقط فویل‌های نزدیک مرز گرم، به دلیل کاهش هزینه با طلا پوشانده شده است. هوان کن و همکاران [۱۳] یک مدل عددی ترکیبی تابش و هدایت را برای مواد متخلخل براساس روش حجم محدود بررسی کردند. این مدل می‌تواند برای بررسی عایق‌های حرارتی در سیستم‌های حفاظت حرارتی در وسایل نقلیه پرتاب و سلول‌های سوختی با درجه حرارت بالا مورد استفاده قرار گیرد. انحراف بین هدایت گرمای مؤثر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده کمتر از ۴ درصد است. میاکیتا و همکاران [۱۴] یک نوع جدید از پتوهای عایق چند لایه با استفاده از جداکننده‌های جدید به نام NICS بررسی کردند.

دادند. نتایج نشان داد که عملکرد عایق‌های چند لایه می‌تواند پس از جایگزینی پیکربندی یکنواخت معمول با پیکربندی متغیر بهینه، ۴۵/۵ درصد بهبود می‌یابد. برای همان پیکربندی بهینه شده، با تغییر محتویات جداکننده از پارچه فیبر به شبکه داکرون، عملکرد ۵۴ درصد بیشتر شد. دنگ و همکاران [۱۹] مطالعات نظری و تجربی بر عملکرد عایق چند لایه شامل تراکم لایه‌های مختلف، تعداد لایه‌ها و مواد مورد استفاده در خطوط انتقال گرما را بررسی کردند. ترکیب بهینه از چگالی لایه و تعداد لایه پیشنهاد شده است. نتایج نشان داد که شار حرارتی با کاهش چگالی لایه کاهش می‌یابد. تفاوت شار گرما بین مقادیر تئوری و مقادیر تجربی در چگالی لایه ۲۰ و ۲۵ و ۴۰ لایه/سانتی‌متر ۲۳ درصد، ۲۰ درصد و ۳۹ درصد برای تعداد لایه از ۴۰ تا ۷۰ است. در چهار سیستم عایق ساخته شده با مواد مختلف، ترکیبی از میلار آلومینیوم شده و کاغذ فایبرگلاس بهترین عملکرد را دارد. هدایت حرارتی موثر ۰/۱۳۵ وات بر متر بر کلون و شار حرارتی ۱/۴۳ وات بر مترمربع به ترتیب است.

در پژوهش‌های گذشته عمدتاً به صورت تجربی و با استفاده از دستگاه کالریمتر به مطالعه شار حرارتی، ضریب نشر و جنس مواد پرداخته شده است. در مطالعات عددی نیز عوامل موثر بر عملکرد عایق بدون دوخت بررسی شد. در مطالعات پیشین نحوه اتصال دو پتو و اثرات طرح اتصال بیان نشده است. پیش‌بینی عملکرد حرارتی عایق‌های چندلایه دشوار است؛ زیرا خواص آنها ناهمگون و در معرض دگرگونی‌های ناشی از فرآیند تولید و ساخت می‌باشد. همچنین مدلسازی مجموعه‌ی مونتاژ شده‌ی عایق‌های چندلایه با روش‌های تحلیلی پیچیدگی‌های فراوانی دارد که از آن جمله می‌توان به تغییرات غیرقابل تخمین خواص مانند فشار در اتصالات و بین لایه‌ها، وجود سوراخ‌های تخلیه‌ی گاز<sup>۱</sup> و اثر درزها و لبه‌ها<sup>۲</sup> در مکانسیم‌های انتقال حرارت، ماهیت ناهمگون و اثرات کارکردی در سه بعد اشاره کرد. بسته به محل به کارگیری عایق‌های چندلایه، الگوها و روش‌های مختلفی جهت دوخت و مونتاژ آن‌ها وجود دارد. همچنین نصب پتو به سازه نیز باید در طراحی الگو دیده شود که انتخاب بهترین طرح تأثیر بسزایی در عملکرد حرارتی و مکانیکی مجموعه عایق دارد. از این‌رو می‌توان با شبیه‌سازی حرارتی، بدون انجام آزمون‌های پرهزینه و زمانبر به تخمین طراحی بهینه الگوی دوخت عایق دست پیدا نمود. بررسی و رفع این مشکل نیاز به مدلسازی‌هایی دارد که رفتار حرارتی

عایق چند لایه را با دقت مناسب پیش‌بینی کند. اتصال پتوها به یکدیگر و همچنین الگوهای دوخت می‌تواند تأثیر زیادی در عملکرد عایق داشته باشد. لذا در این پژوهش اهداف جامع‌تری نسبت به مطالعاتی که تاکنون انجام شده است دنبال خواهد شد. علاوه بر مدل‌سازی عایق‌های چند لایه، با توجه به خواص عایق‌ها مانند ضرایب نشر، تعداد لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها به تعیین پارامترهای بهینه عایق چند لایه پرداخته می‌شود.

## ۲. تعریف مساله

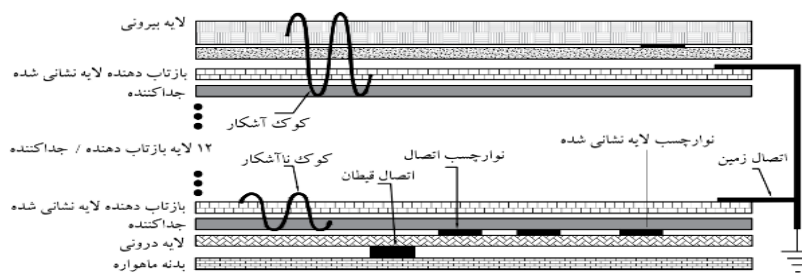
در این تحقیق، یک عایق چندلایه شامل ۱۲ لایه جداکننده، ۱۱ لایه بازتاب‌دهنده، لایه داخلی و نیز یک لایه بیرونی از جنس کپتون سیاه در نظر گرفته می‌شود. سپس الگوهای دوخت که شامل مدل لایه به لایه، مدل overlapping، مدل folded و مدل Velcro مدلسازی شده و بهترین مدل از نظر کمینه بودن ضریب نشر انتخاب می‌شود. جهت اعمال اثر دوخت نیاز است که ابتدا هندسه دوخت توسط نرم افزار انسیس فلونت مدل شود. سپس هندسه مورد نظر شبکه‌بندی شده و به حلگرهایی که قابلیت شبیه‌سازی انتقال حرارت تابشی و رسانشی را دارند معرفی می‌شود. از نرم‌افزار فلونت برای شبیه‌سازی انتقال حرارت تابشی و رسانشی به طور همزمان در هندسه مورد نظر استفاده می‌شود. در قسمت دوم مدلسازی اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد عایق ارائه می‌شود.

### ۲-۱. ساختار عایق چندلایه

یک نمونه از عایق‌های چند لایه در شکل ۱ نشان داده شده است. یک پتوی عایق حرارتی چند لایه شامل مواد اولیه لایه خارجی، لایه بازتاب‌دهنده میانی، لایه جداکننده، داخلی‌ترین لایه، چسب، نوار چسب، نخ، دکمه، واش، قیطان، اتصال‌دهنده و اتصال بدنه می‌باشد. عملکرد عایق‌های حرارتی چند لایه به شدت به پیکربندی لایه‌ها در کنار هم بستگی دارد. کنترل دمای لایه داخلی در تماس با بدنه فضاپیما مشکل است؛ بنابراین عملکرد عایق حرارتی وابسته به فضای خالی بین عایق‌های چند لایه متصل شده است. در دماهای پایین انتقال حرارت تشعشی عبوری از عایق‌های چند لایه خیلی کم است و در این محدوده دمایی، نشر حرارتی عمدتاً ناشی از انتقال حرارت هدایتی است. بنابراین برای کاهش نشر حرارتی بین لایه‌های عایق بایستی

کلی بین لایه‌ها تاثیرگذار است. برای پوشش ماهواره مدنظر با پوشش عایق چندلایه احتمال استفاده از هریک از انواع اتصال‌های پتو به پتو وجود دارد. بنابراین در طراحی پوشش مناسب برای ماهواره بایستی حتی‌المقدور از روش اتصالی استفاده نمود که کمترین نشر حرارتی را به لایه متصل به ماهواره ایجاد کند. همچنین از آنجا که تعداد درزها یا اتصالات برای ملحق کردن پتوها به هم اهمیت دارد، بایستی فاصله دوخت‌ها طوری تنظیم شود که در ناحیه اتصال دو پتو کمترین نشر حرارتی به لایه زیرین اتفاق بیافتد و یا اینکه این نشر حرارتی در موضعی باشد که کنترل دمایی از اهمیت کمتری برخوردار باشد.

انتقال حرارت هدایتی بین لایه‌ها که شامل جداکننده هم هست خیلی کم باشد. ضریب نشر مؤثر را می‌توان با تمهیدات مناسب حتی به ۰/۰۰۵ و پایین‌تر هم رساند. عایق‌های چندلایه که برای کاربردهای فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید دارای عملکرد حرارتی بالا (نشر حرارتی بسیار کم) و پایدار باشند. در عملکرد عایق‌های حرارتی چند لایه باید وضعیت سطح تماسی بین لایه عایق و جداکننده پایدار باشد و از تماس جداکننده‌ها به لایه‌ها تا جای ممکن جلوگیری شود. چنانچه در محل دوخت جداکننده وجود نداشته باشد، لایه‌های عایق به صورت مستقیم با هم در تماس قرار می‌گیرند و بنابراین تماس بین لایه‌های عایق موجب پیدایش مسیر انتقال حرارت هدایتی می‌شود که در نشر حرارتی



شکل ۱. ساختار عایق چندلایه

چسب Velcro چسبانده می‌شود. در محل اتصال دو پتو از چسب Velcro به ضخامت ۲۵ میکرون استفاده شده است. در مدل folded دو پتو ۱۲ لایه، با تا شدن دو پتو در داخل یکدیگر دوخته می‌شوند. هندسه مدل در شکل ۲-ج نشان داده شده است. در شکل ۲-د یک پتو عایق ۱۲ لایه با مدل overlapping که اولین لایه پتو دیگر بر روی آخرین لایه پتو اول دوخت می‌شود، نشان داده شده است.

## ۲-۲. انواع طرح‌های اتصال پتوی عایق

در این پژوهش ۴ مدل طرح اتصال پتوی عایق که شامل مدل لایه به لایه، مدل با چسب Velcro، مدل overlapping و مدل folded seam در دو حالت شرایط کاری محیطی گرم و سرد مدلسازی و مقایسه می‌شوند. ضخامت لایه‌های جداکننده و لایه‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات لایه‌های تشکیل دهنده عایق

ضخامت لایه mm	ماده
۰/۰۱۳	میانی
۰/۰۲۵	خارجی
۰/۱۶۵	جداکننده

## ۳. روابط حاکم

انتقال حرارت درون عایق چندلایه به صورت ترکیبی از تشعشع و رسانش صورت می‌گیرد. معادله بقای انرژی برای عایق چندلایه به صورت معادله دیفرانسیل پاره‌ای زیر است:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -div(q) \quad (1)$$

که در آن  $\rho$  چگالی،  $c$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $T$  دما و  $q$  شار حرارتی که مجموع شار حرارتی و شار تابشی است و به صورت معادله ۲ است.

$$q'' = -k \cdot grad(T) + q''_r \quad (2)$$

در شکل ۲ نحوه اتصال دولبه پتوی عایق در چهار طرح مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل ۲-الف، در مدل لایه به لایه لبه‌های پتو که فقط شامل لایه‌های بازتابنده هستند (در محل دوخت جداکننده وجود ندارد) به صورت یک در میان بر روی یکدیگر دوخت می‌شوند. مطابق شکل ۲-ب، دو پتو با استفاده از

$$k_g = \frac{k_{g0}}{\phi + 2\phi \frac{2-\alpha}{\alpha} \frac{2\gamma}{pr\gamma+1} k_n} \quad (7)$$

که در آن  $k_{g0}$  رسانش حرارتی گاز در فشار اتمسفر،  $\alpha$  ضریب تطابق حرارتی،  $pr$  عدد پراتل،  $\gamma$  نسبت گرمای ویژه گاز،  $k_n$  عدد بی بعد نادن می‌باشد. نسبت مسافت آزاد میانگین مولکولی به طول فیزیکی، عدد بی بعد نادن نامیده می‌شود. مقادیر  $\phi$  و  $\Phi$  با توجه به مقادیر عدد نادن دو مقدار صفر یا یک لحاظ می‌شود.

### ۳-۲. ضریب هدایت لایه جداکننده

برای ضریب هدایت لایه جداکننده روابط تجربی وجود دارد که دو رابطه برای حالت دما بالا و دما پایین ارائه شده است. برای ضریب هدایت جداکننده در حالت دمایی از معادله ۸ استفاده می‌شود [۲۳].

$$k_s = c_2 f k_1 \quad (8)$$

که  $k_1$  ضریب هدایت ماده جداکننده می‌باشد که به دما بستگی دارد. برای ضریب هدایت جداکننده در حالت دما بالا از معادله ۹ استفاده می‌شود.

$$k_s = f^m k_{s0} \quad (9)$$

در معادله ۹،  $k_{s0}$  رسانش حرارتی در ماده خام الیاف و  $m$  ضریب تجربی که معمولاً بین ۲ و ۳ است و  $f$  کسر جامد می‌باشد.

### ۳-۳. ضریب هدایت گاز و جامد

اگرچه ضریب رسانش حرارتی محیط گاز و جامد هر یک به تنهایی به دست آمد، با استفاده از معادله ۱۰ اثر همزمان آن‌ها در نظر گرفته می‌شود [۱۷].

$$k = f k_s + (1-f) k_g \quad (10)$$

### ۳-۴. مقاومت تماسی

مقاومت تماسی می‌تواند با استفاده از معادله‌ای که ابتدا توسط هولم پیشنهاد شده است محاسبه شود. در معادله ۱۱،  $R_{ct}$  مقاومت تماسی و  $a$  شعاع تماس بین سپر و جداکننده است [۲۴].

$$R_{ct} = \frac{1}{(2ak_m)} \quad (11)$$

فرمول هرگز به فرم معادله ۱۲ برای شعاع تماس بین دو حوزة شعاع  $R_1$  و  $R_2$  در نظر گرفته می‌شود.

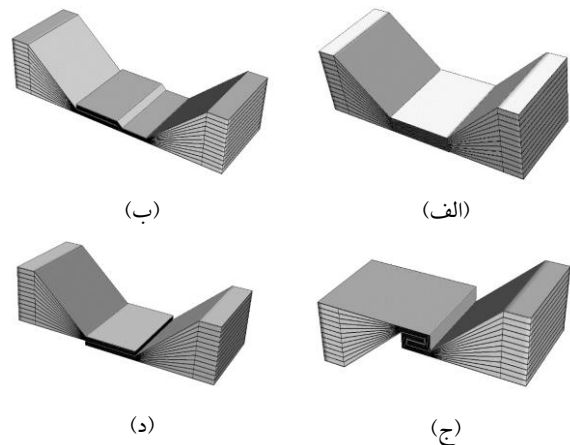
$$a = \left\{ \frac{3\pi(k_1+k_2)R_1R_2P_1}{4(R_1+R_2)} \right\}^{1/3} \quad (12)$$

$$k_1 = \frac{(1-\mu_1^2)}{E_1} \quad (13)$$

که در آن  $k$  ضریب رسانش که شامل اثر هدایت گاز و هدایت جامد است. برای به دست آوردن ضریب رسانشی که معادل با رسانش گاز و جامد باشد ابتدا باید هریک به تنهایی مدل شوند. انتقال حرارت تشعشع بین دو لایه عایق که بین آن‌ها یک جداکننده وجود دارد توسط معادله ۳ محاسبه می‌شود [۲۰].

$$q = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (3)$$

انتقال حرارت رسانش در عایق چندلایه به صورت هدایت فاز گاز و هدایت سطح جامد صورت می‌گیرد.



شکل ۲. هندسه طرح‌های اتصال‌های (الف) لایه به لایه (ب) Velcro (ج) overlapping (د) folded seam

### ۳-۱. هدایت گاز بین لایه و جداکننده

انتقال حرارت هدایت گاز بین لایه و جداکننده در عایق دما پایین توسط معادله ۴ محاسبه می‌شود [۲۱].

$$q_g = c_1 \alpha p (T_w - T_c) \quad (4)$$

ضریب هدایت گاز نیز توسط معادله ۵ بیان می‌شود.

$$k_g = c_1 \alpha p \Delta x \quad (5)$$

در این معادله،  $\alpha$  ضریب تطابق حرارتی بین گاز و سطوح جامد می‌باشد و بیانگر درصد مولکول‌های گاز مجاور سطوح جامد می‌باشد که با سطح جامد به تعادل حرارتی رسیده است. مقدار  $c_1$  توسط معادله ۶ محاسبه می‌شود که  $p$  فشار و  $M$  وزن مولکولی گاز می‌باشد [۲۲].

$$c_1 = \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \sqrt{\frac{R}{4\pi M T}} \quad (6)$$

ضریب هدایت گاز بین لایه و جداکننده در عایق دما بالا با استفاده از معادله ۷ به دست می‌آید [۲۲].

محیط واسط است. در این مدل تمامی سطوح دیفیوز فرض می‌شود و به‌صورت خاکستری مدل می‌شود.

#### ۴-۱. مدل‌سازی طرح اتصال

جهت مدل‌سازی ۴ طرح اتصال پتوی عایق که شامل، یک عایق چندلایه حرارتی شامل ۱۲ لایه جداکننده، ۱۱ لایه بازتاب‌دهنده، لایه داخلی و نیز یک لایه بیرونی از جنس کیتون سیاه در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن ابعاد مش جداکننده، یک مربع ۲×۲ میلی‌متر از این عایق حرارتی چندلایه در نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی شده است. پس از استخراج نتایج شار حرارتی بر واحد مترمربع و استخراج ضریب نشر مؤثر، این نتیجه قابل تعمیم به کل عایق چندلایه حرارتی است. این نتیجه در صورتی برقرار است که شرایط تابش و خلاء در بقیه نقاط عایق چندلایه حرارتی ثابت در نظر گرفته شود به عبارتی خلاً بین لایه‌ها در آزمایشگاه در یک حد ثابت تأمین شده باشد.

#### ۴-۲. فرضیات و شرایط مرزی

دمای داخل ماهواره ۳۱۳ کلوین و سه حالت شرایط کاری محیطی گرم و سرد بررسی می‌شود. در شرایط محیطی گرم، دمای محیط اطراف ماهواره بیشتر از دمای داخل ماهواره است و در شرایط سرد محیط اطراف ماهواره سردتر از محیط داخل ماهواره است. در حالت کلی محدوده دمایی اطراف ماهواره بین ۱۵۰- درجه تا ۱۵۰+ درجه سلسیوس می‌باشد که در این پژوهش سه حالت شرایط محیطی گرم ۳۲۳ کلوین، ۳۷۳ کلوین و ۴۲۳ کلوین و سه حالت شرایط محیطی سرد ۱۲۳ کلوین، ۱۷۳ کلوین و ۲۵۳ کلوین بررسی شده است. فرضیات اصلی در این پژوهش شامل کاربرد عایق چندلایه در شرایط کاری ماهواره است. لذا میزان دمای سطح داخلی و خارجی عایق به شرایط کاری داخل ماهواره و محیط پیرامون مقید است. همچنین فرآیند انتقال حرارت در حالت پایا نظر گرفته شده است. از اثرات انتقال حرارت جابجایی و هدایت گاز نیز صرف‌نظر شده است زیرا در کاربرد ماهواره شرایط کاری عایق چندلایه تحت خلاء نسبی است.

#### ۴-۳. بررسی استقلال از شبکه محاسباتی

برای شبکه‌بندی هندسه مورد نظر از نرم‌افزار انسیس فلونت نسخه ۱۹ استفاده شده است. برای مدل بدون دوخت و تمامی

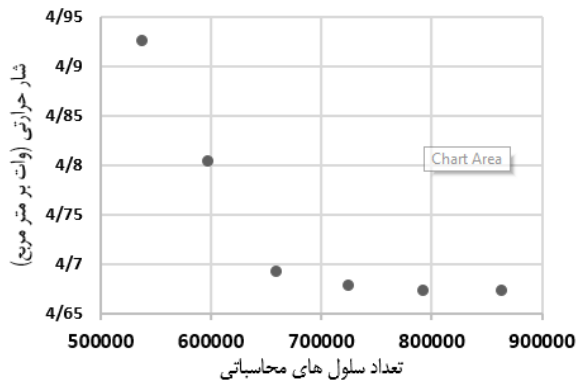
$$k_2 = \frac{(1-\mu_2^2)}{E_2} \quad (14)$$

در معادله ۱۲،  $P$  نیروی بارگذاری تماس است. در معادلات ۱۳ و ۱۴  $\mu$  نسبت پواسون و  $E$  ضریب الاستیسیته می‌باشد. در این پژوهش، شعاع تماس، ضخامت جداکننده در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش اثرات مقاومت تماسی در نظر گرفته شده است. همچنین مهم‌ترین پارامتر مورد نظر ضریب نشر مؤثر می‌باشد که توصیه می‌شود که مقایسه بر مبنای شدت نشر مؤثر انجام شود. ضریب نشر مؤثر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{q_{total}}{\sigma(T_H^4 - T_C^4)} \quad (15)$$

#### ۴. روش حل عددی

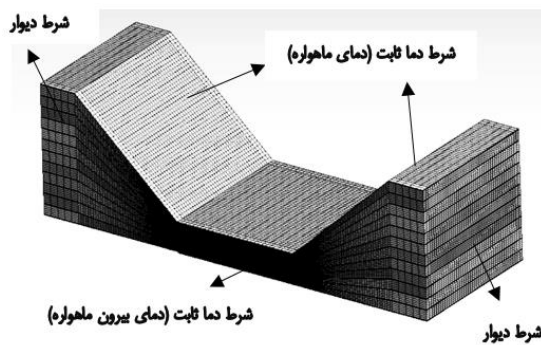
نوع شبکه بندی به صورت مستطیلی و با سازمان و تطبیقی<sup>۳</sup> است. برای کیفیت مناسب در شبکه‌بندی انسیس فلونت باید کیفیت همواری<sup>۴</sup> و کیفیت کجی سلول<sup>۵</sup> را در نظر داشته و بر پایه این الگوها به شبکه‌بندی پرداخته شود. مکانیزم انتقال حرارت بین دولایه با توجه به اینکه این عایق‌های چندلایه در فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند، تشعشع است لذا از مدل S2S فلونت استفاده شده است. در این حل‌گر ابتدا ضرایب دید بین صفحات توسط نرم‌افزار حساب‌شده و در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. مکانیزم دیگر انتقال حرارت، انتقال حرارت هدایتی موجود در جداکننده‌های بین لایه‌های عایق است. خواص مربوط به جنس عایق‌ها و جداکننده‌ها از منابع استخراج‌شده و در قسمت زون تخصیص داده می‌شود. مدل تشعشعی سطح به سطح برای مدل کردن تشعشع در محیط بسته با سطوح خاکستری دیفیوز کاربرد دارد. در این مدل فرض بر این است که هیچ محیط واسطه‌ای درون محفظه وجود ندارد و یا محیط واسطه موجود فاقد توانایی جذب و صدور فرض شده است. این مدل منطبق بر روش ضرایب شکل در محفظه بسته است. نرم‌افزار فلونت پیش از آغاز حل عددی ضرایب شکل لایه‌های را محاسبه و درون یک فایل ذخیره می‌کند و پس از شروع حل و در هر تکرار مربوط به حل معادله انرژی ضرایب شکل بدون محاسبه مجدد از فایل ذخیره‌شده بازخوانی می‌شود. مزیت استفاده از این روش در مواقعی است که محیط واسطه وجود ندارد و هدف محاسبه انتقال حرارت تشعشعی بین سطوح است. این مدل به زمان کمتری در هر بار تکرار نیاز دارد و بنابراین حل آن بسیار سریع‌تر از مدل‌های شامل



شکل ۳. بررسی استقلال نتایج از شبکه

جدول ۲. تعداد سلول محاسباتی طرح‌های اتصال

تعداد نهایی سلول محاسباتی	طرح اتصال
۲۳۶۹۹۲	مدل بدون دوخت
۶۹۶۹۰۰	مدل لایه به لایه
۴۶۵۶۵۲	مدل overlapping
۷۲۳۸۴۷	مدل با چسب velcro
۱۳۴۸۴۸۳	مدل folded seam



شکل ۴. میدان حل شبکه بندی شده طرح اتصال لایه به لایه و شرایط مرزی

تعداد سنسورهای حرارتی به کار رفته در این مجموعه ۴ عدد می‌باشد که دو عدد در مرکز صفحات آلومینیومی و دو عدد در منتهای قطر آن توسط چسب حرارتی ثابت شده‌اند. پوشش عایق شامل دو کفه  $20 \times 20$  سانتیمتری در دو طرف این مجموعه قرار گرفته و مجموعه فوق را در برمی‌گیرد. پیش از آن نخ‌هایی از جنس تفلون به چهار پیچ و مهره تعبیه شده اتصال داده می‌شود. با استفاده از لایه‌های چسب‌دار صفحات به کار رفته در ساخت عایق‌های چندلایه، درزهای موجود در مدل ترمیم گردیده تا عایق‌های چندلایه به طور کامل صفحات آلومینیومی را دربرگیرند (شکل ۸).

طرح‌های اتصال استقلال از شبکه محاسباتی بررسی شده است و تعداد نهایی سلول‌های محاسباتی در جدول ۲ نشان داده شده است. به عنوان نمونه در شکل ۳ شار حرارتی برحسب تعداد سلول محاسباتی برای طرح اتصال با چسب Velcro نشان داده شده است. برای بررسی استقلال از شبکه، ۶ شبکه با تعداد سلول محاسباتی تولید شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دو شبکه  $723847$  و  $792183$  اختلاف بسیار کمی در شار حرارتی وجود دارد که نشان دهنده کافی بودن تعداد سلول‌های در نظر گرفته شده است. لذا تفاوتی در جواب دو شبکه وجود ندارد و به دلیل کاهش زمان حل از شبکه با  $723847$  سلول محاسباتی استفاده شده است. در شکل ۴ میدان حل شبکه بندی شده مدل لایه به لایه به همراه شرایط مرزی نشان داده شده است.

## ۵. مطالعه تجربی

محفظه خلا حرارتی دارای پمپ خلا، روتاری و یک پمپ خلا، توربومولکولی است. ابعاد داخلی محفظه  $67 \times 67 \times 74$  سانتی‌متر است. فشار خلا  $10^{-6}$  میلی بار است. علاوه بر صفحه اصلی، ۵ دیواره با قابلیت کنترل دمایی دارد. برای عایق حرارتی دو صفحه آلومینیومی  $20 \times 20$  سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

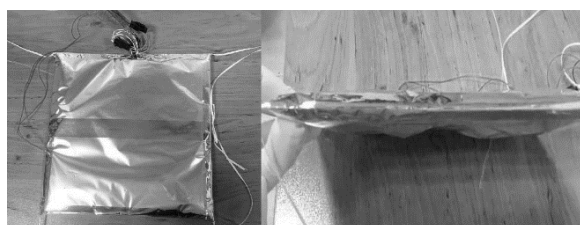
تعداد لایه‌ها ۱۲ عدد و جنس جداکننده از پلی‌استر است. ابتدا صفحات آلومینیومی نازک تهیه شده را روی هم قرار داده و با مته، چهار سوراخ برای عبور پیچ‌ها ایجاد می‌گردد. گرمکن الکتریکی ورقه‌ای مناسب با اندازه نمونه تحت آزمایش انتخاب می‌گردد. با توجه به ابعاد نمونه ( $20 \times 20$  سانتی‌متر) ارائه شده، ترکیبی از دو نوع گرمکن HK517R294L12A و hk5179r318112a مورد استفاده قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، گرمکن‌ها بین صفحات آلومینیومی به نحوی قرار می‌گیرند که قسمت برجسته سیم گرمکن‌ها در میان صفحات قرار نگیرد تا ایجاد فاصله بین آنها نکند. حسگرهای حرارتی بر روی صفحات آلومینیومی و در دو طرف عایق چندلایه نصب شده‌اند (شکل ۶). در شکل ۷ صفحات آلومینیومی که با عایق چند لایه پوشیده شده‌اند نشان داده شده است. ۴ عدد پیچ و مهره و ۴ عدد نخ عایق حرارتی با روکش تفلون برای معلق ماندن مجموعه عایق چند لایه در داخل محفظه استفاده می‌شود که هدایت حرارتی ناچیز دارد.



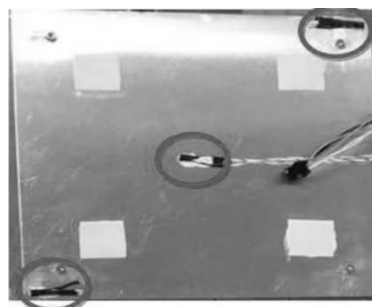
سلسیوس است. در آزمایشات گرم برای اطمینان از کارایی عایق‌های چند لایه در دمای محیطی متفاوت، دمای دیواره‌ها پس از یک شب خاموش نمودن سرمایش محفظه و حفظ شرایط خلا در حدود ۱۵ درجه سلسیوس حفظ گردید. بطور کلی منظور از شرایط گرم دمای بیشتر از دمای داخلی ماهواره و شرایط محیطی سرد دمای محیط کمتر از دمای ماهواره است. ضخامت لایه‌های میانی ۲۵ میکرون و ضخامت جداکننده‌ها ۲۰۰ میکرون در نظر گرفته شده است. داده‌های تجربی پس از ۳ بار اندازه‌گیری میانگین‌گیری شده‌اند و از تکرارپذیری آنها اطمینان حاصل شده است.



شکل ۵. نحوه قرارگیری گرمکن‌ها در میان صفحات



شکل ۸. نحوه قرارگیری مجموعه آلومینیومی داخل عایق چندلایه



شکل ۶. نحوه قرارگیری سنسورها بر روی صفحات آلومینیومی



شکل ۷. دو کفه MLI تعبیه شده جهت در برگرفتن صفحات آلومینیومی



شکل ۹. نحوه قرارگیری مدل عایق چندلایه در محفظه خلا حرارتی

## ۶. نتایج و بحث

### ۶-۱. صحت‌سنجی نتایج

به منظور صحت‌سنجی، نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های تجربی مرجع [۱۴] و نتایج مطالعه تجربی که در این پژوهش انجام شده است، مقایسه شد. جهت مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های مرجع [۱۴] مدل عایق چندلایه یکسان تحت شرایط مرزی مشابه مورد تحلیل قرار گرفت. این مدل از ۵ لایه

همچنین شیارهایی در لبه‌های این مجموعه تعبیه شده تا نخ تفلونی، سیم گرمکن‌ها و سنسورها از آن خارج گردد. نخ‌های مذکور جهت معلق نمودن عایق‌های چندلایه از سقف محفظه سیکل خلا حرارتی استفاده می‌گردد. نحوه اتصال عایق چندلایه در محفظه در شکل ۹ نشان داده شده است. با اطمینان از برقراری اتصالات الکتریکی و کارکرد صحیح سنسورهای تعبیه شده در محفظه خلا حرارتی بسته می‌شود. ابتدا محفظه خلا می‌گردد و سپس دمای دیواره‌ها به مقدار قابل دستیابی توسط محفظه که در حدود ۸۰- درجه سلسیوس می‌باشد پایین آورده می‌شود. در تمامی آزمایشات محیطی سرد توان گرمکن ۱/۵۶ وات و در تمامی آزمون‌های گرم توان گرمکن ۰/۷۲ وات در نظر گرفته شده است. در آزمایشات محیطی سرد تمامی سطوح به غیر از سطح زیرین و درب محفظه دمای کمتر از ۷۵- درجه سلسیوس را مشاهده می‌شود و سطح زیرین دمای کمتر از ۶۰- درجه سلسیوس را مشاهده می‌کند. سطح دیواره نیز دمای کمتر از ۳۰- درجه

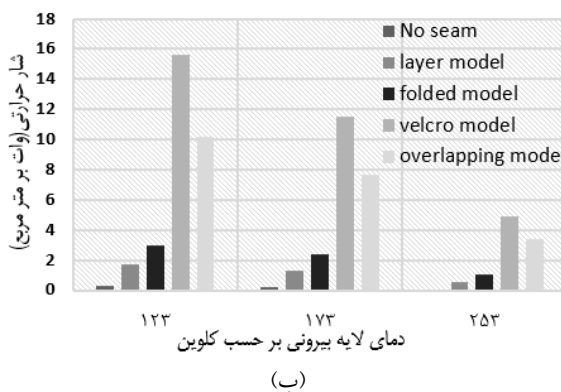
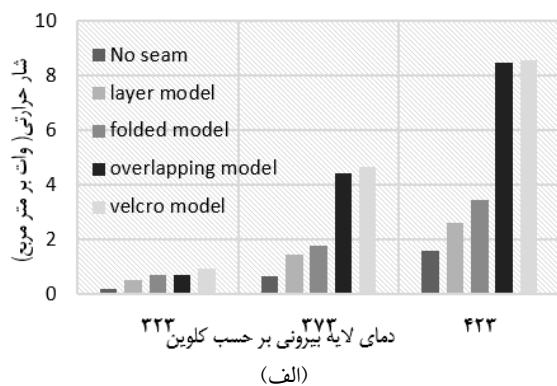
مدل folded seam، مدل overlapping و مدل با چسب Velcro می‌باشد.

جدول ۳. ضریب صدور مؤثر عایق‌های چندلایه حاصل از نتایج مطالعه

تجربی		
حالت سرد	حالت گرم	ضریب نشر مؤثر تجربی
۰/۰۰۵۲۶	۰/۰۰۴۸۵	مدل بدون دوخت
۰/۰۰۵۵۷	۰/۰۰۵۸۱	مدل لایه به لایه

جدول ۴. ضریب صدور مؤثر حاصل از نتایج تحلیل عددی عایق چندلایه

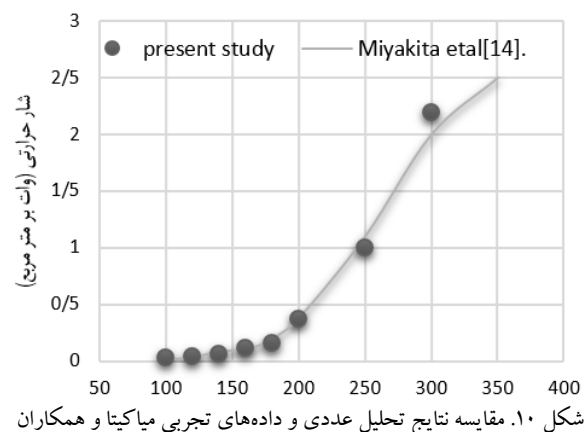
انحراف از داده‌های تجربی	ضریب نشر مؤثر	طرح اتصال
۴٪/۱۲	۰/۰۰۴۶۵	مدل بدون دوخت در حالت گرم
۹٪	۰/۰۰۴۷۷	مدل بدون دوخت در حالت سرد
۱٪/۰۳	۰/۰۰۵۸۷	مدل لایه به لایه در حالت گرم
۵٪/۸	۰/۰۰۵۲۴۶	مدل لایه به لایه در حالت سرد



شکل ۱۱. مقایسه شار حرارتی طرح‌های اتصال در شرایط محیطی (الف) گرم (ب) سرد

هرچه مدل دوخت مورد نظر عملکرد بهتری داشته باشد شار حرارتی کاهش پیدا می‌کند و به تبع باعث می‌شود که ضریب نشر مؤثر نیز کاهش یابد. ضریب نشر لایه به لایه پایین‌ترین ضریب نشر ممکن است. در این بخش به منظور ارزیابی عملکرد عایق،

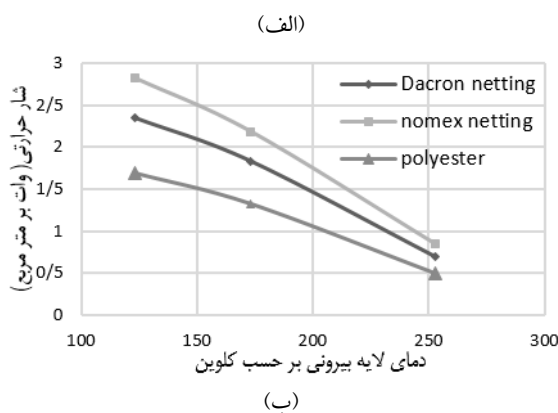
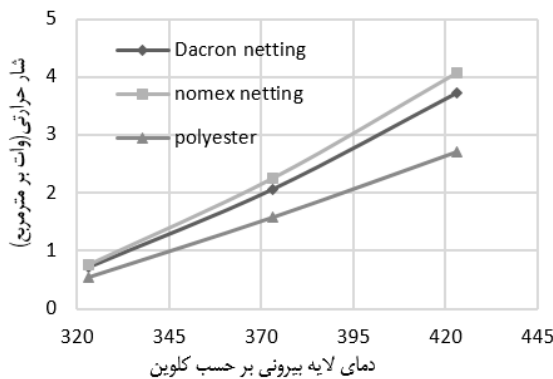
عایق حرارتی پلی‌آمید، پوشش داده‌شده با آلومینیوم و به ضخامت ۲۵ میکرومتر و جداکننده‌هایی با ضخامت ۵ میلی‌متر تشکیل شده است. در سطح بیرونی عایق از شرط دما ثابت استفاده شده است. برای این مدل عایق حرارتی از نرم‌افزار انسیس فلونت استفاده شده است. تعداد المان‌ها ۶۴۰۰۰ و نوع المان‌ها مربعی و نوع مش‌بندی و روش آن به ترتیب سازمان‌یافته و تطبیقی بوده است. در شکل ۱۰ شار حرارتی لایه آخر برای ۵ لایه با در نظر گرفتن دماهای مختلف لایه بیرونی برای حل عددی و نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۴] ارائه شده است. اختلاف بین نتایج ناشی از عوامل گوناگونی نظیر خطای گرد کردن و استقلال از شبکه است. نتایج نشان می‌دهد که انحراف داده‌های عددی از داده‌های تجربی کمتر از ۱۰ درصد است که نشان‌دهنده تطابق خوب بین نتایج عددی و تجربی است. به منظور اعتبارسنجی روش حل عددی، نتایج عددی مدل بدون دوخت و طرح اتصال لایه به لایه با نتایج تجربی نیز مقایسه شده است. در جدول ۳ نتایج ضریب نشر مؤثر در آزمایشگاه و در جدول ۴ نتایج ضریب نشر مؤثر به روش عددی نشان داده شده است. با توجه به نتایج، انحراف نتایج مدل عددی از نتایج تجربی کمتر از ۹ درصد است. لذا مدل عددی با دقت بسیار خوبی قادر به محاسبه ضریب نشر مؤثر عایق چند لایه با طرح اتصال دلخواه است.



## ۲-۶. نتایج شبیه‌سازی عددی

برای بهتر نشان دادن الگوهای دوخت، از نمودار مستطیلی استفاده می‌شود. مطابق با نمودارهای ۱۱-الف و ۱۱-ب برای هر محدوده دمایی، چه در شرایط گرم و چه در شرایط محیطی سرد، بهترین الگوی دوخت به ترتیب مدل بدون دوخت، مدل لایه به لایه،

شده و بین این مواد به منظور انتخاب بهترین ماده که دارای بهترین عملکرد حرارتی است مقایسه صورت گرفته است. با توجه به نمودارهای ۱۳-الف و ۱۳-ب در شرایط گرم و محیطی سرد به ترتیب با تغییر جنس شبکه جداکننده به پلی استر، داکرون و سپس نومکس شار حرارتی و ضریب نشر کاهش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت هرچه جداکننده ضریب هدایت کمتری داشته، عایق حرارتی عملکرد بهتری دارد زیرا باعث کاهش انتقال حرارت رسانایی می‌شود.



شکل ۱۳. مقایسه شار حرارتی با تغییر جنس جداکننده در الف) شرایط گرم ب) شرایط سرد

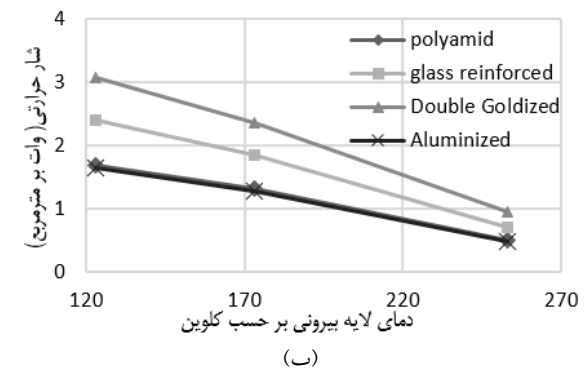
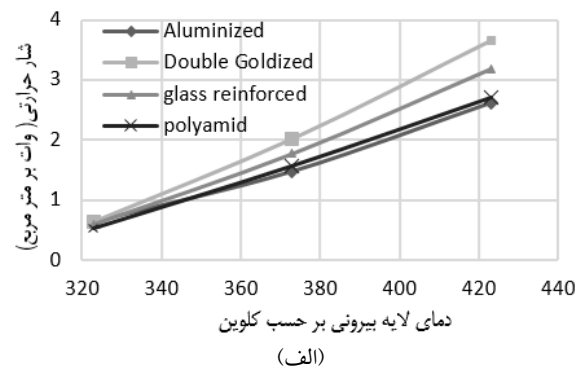
#### ۵-۶. تأثیر مواد بازتابنده

در مدل‌های اولیه برای لایه بازتابنده عایق از ماده کپتون استفاده شد، سپس خواص مواد میلار، پلی استر، تفلون و کپتون با پوشش آلومینیومی و کپتون با پوشش طلائی برای لایه بازتابنده شبیه‌سازی شده و بین این مواد به منظور انتخاب بهترین ماده که دارای بهترین عملکرد حرارتی است مقایسه صورت گرفته است. با توجه به نتایج، همه مواد به کار رفته در لایه بازتابنده تقریباً عملکرد مشابهی دارند. اختلاف بین نتایج کمتر از ۱ درصد است، چون مهمترین عامل تأثیرگذار در لایه بازتابنده، ضریب نشر

اثر پارامترهای مختلف مانند تعداد لایه، ضخامت لایه، جنس جداکننده، جنس مواد لایه بیرونی، جنس مواد لایه درونی و جنس لایه بازتابنده به صورت مجزا بررسی می‌شود. سپس با استفاده از نرم‌افزار Design Expert تأثیر همزمان همه پارامترهای مورد نظر بررسی شده و بهترین حالت ممکن تعیین می‌شود.

#### ۳-۶. تأثیر جنس لایه داخلی

به منظور بررسی جنس لایه داخلی از موادی که در استانداردهای فضایی برای لایه داخلی شناخته شده‌اند استفاده شده است. مواد پلی آمید، شیشه تقویت شده، طلا و آلومینیوم بررسی شده‌اند. دو عامل ضریب نشر و ضریب هدایت به صورت همزمان بر عملکرد لایه داخلی تأثیر دارند. به همین علت آلومینیوم بهترین عملکرد را دارد. با توجه به مقادیر نمودارهای ۱۲-الف و ۱۲-ب به ترتیب لایه داخلی با جنس آلومینیوم، پلی آمید، شیشه تقویت شده و طلا باعث عملکرد بهتر عایق چند لایه می‌شود.



شکل ۱۲. مقایسه شار حرارتی با تغییر جنس لایه داخلی در شرایط الف) گرم ب) سرد

#### ۴-۶. تأثیر مواد جداکننده

در مدل‌های اولیه برای جداکننده عایق از ماده پلی استر استفاده شد، سپس مواد داکرون و نومکس نیز برای جداکننده شبیه‌سازی

می‌باشد که بر طبق استانداردهای فضایی این مواد دارای ضریب نشر یکسان هستند که باعث می‌شود علی‌رغم چگالی و ضریب هدایت متفاوت تقریباً عملکرد یکسانی داشته باشند. در جدول‌های ۵ و ۶ شار حرارتی با تغییر جنس بازتابنده محاسبه شده است؛ که نشان می‌دهد استفاده از هر نوع از جنس عملکرد یکسانی دارد.

جدول ۵. شار حرارتی با تغییر جنس بازتابنده در حالت گرم

شار حرارتی در حالت گرم $(\frac{w}{m^2})$			جنس بازتابنده
۴۲۳ کلوین	۳۷۳ کلوین	۳۲۳ کلوین	
۲/۵۹۱۳	۱/۴۶۴۹	۰/۵۳۵۹	تفلون با پوشش آلومینیوم
۲/۶۰۹۶	۱/۴۷۲۹	۰/۶۳۳۸	پلی استر با پوشش آلومینیوم
۲/۶۱۳۵	۱/۴۷۴۶	۰/۵۳۷۲	میلار با پوشش آلومینیوم
۲/۷۰۳۶	۱/۵۷۲۰	۰/۵۳۷۷	کپتون با پوشش آلومینیوم
۲/۶۲۱۷	۱/۴۷۸۰	۰/۵۳۷۷	کپتون با پوشش طلا

جدول ۶. شار حرارتی با تغییر جنس بازتابنده در حالت سرد

شار حرارتی در حالت سرد $(\frac{w}{m^2})$			جنس بازتابنده
۱۲۳ کلوین	۱۷۳ کلوین	۲۵۳ کلوین	
۱/۶۵۴۴	۱/۲۸۵۸	۰/۴۷۲۹	تفلون با پوشش آلومینیوم
۱/۶۵۰۴	۱/۲۸۶۴	۰/۴۷۵۹	پلی استر با پوشش آلومینیوم
۱/۶۴۹۴	۱/۲۸۶۴	۰/۴۷۶۵	میلار با پوشش آلومینیوم
۱/۶۸۵۱	۱/۳۲۲۳	۰/۴۹۹۰	کپتون با پوشش آلومینیوم
۱/۶۴۷۲	۱/۲۸۶۴	۰/۴۷۷۷	کپتون با پوشش طلا

## ۶-۶. تاثیر مواد لایه بیرونی

به منظور تأثیر جنس لایه بیرونی خواص مواد تدار، تفلون، پارچه بتا و نومکس با هم مقایسه شدند. با توجه جدول‌های ۷ و ۸ به ترتیب پارچه بتا، تفلون، تدار و سپس نومکس دارای عملکرد بهتری هستند. مقادیر به دست آمده به هم نزدیک‌اند و اختلاف داده‌ها در حدود ۲ درصد می‌باشد چون در لایه بیرونی یکی از عوامل تأثیرگذار بر ضریب نشر است که بر طبق استانداردهای فضایی این مواد دارای محدوده یکسانی هستند.

## ۶-۷. اثر تعداد لایه بر عملکرد حرارتی عایق چندلایه

در حالت کلی محدوده تعداد لایه از ۱۰ تا ۳۰ لایه می‌باشد. در این قسمت، تعداد لایه ۱۰، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۲ و ۲۵ مدلسازی شده است. در عایق‌های چندلایه که در فضا کاربرد دارند انتقال حرارت تشعشی یکی از اصلی‌ترین روش‌های انتقال حرارت است، لذا

برای کاهش اثر انتقال حرارت تشعشع بین دو سطح عایق، از سپرهای تشعشی با ضریب انعکاس زیاد استفاده می‌شود. همچنین این لایه‌ها، مقاومت حرارتی کل را افزایش داده و باعث کاهش نرخ انتقال گرمای تشعشی می‌شود. ولی همیشه افزایش سپرها باعث بهبود عملکرد نمی‌شود زیرا علاوه بر تشعشع، رسانش نیز بین لایه‌ها و جداکننده وجود دارد. در تعداد لایه‌های ۱۰ تا ۱۶، انتقال گرمای تابشی مکانسیم غالب در فرآیند انتقال حرارت است. با این حال، فویل‌ها از موادی ساخته شده‌اند که در مقایسه با مواد بدنه از هدایت حرارتی بسیار بالاتری برخوردار هستند و با افزایش تعداد لایه‌های عایق، ضخامت کل پتوی عایق افزایش می‌یابد و هدایت حرارتی کلی بیشتر می‌شود و اثر انتقال حرارت رسانش قابل توجه‌تر می‌شود. اثر همزمان انتقال حرارت تشعشی و رسانش با افزایش تعداد سپرهای حرارتی الزاماً منجر به افزایش مقاومت حرارتی نمی‌شود. از آنجا که در محل اتصال پتو مکانسیم انتقال حرارتی به طور کامل از نوع رسانش است و در بقیه بخش‌ها تلفیقی از رسانش و تشعشع است. لذا افزایش تعداد لایه‌ها بر مقاومت حرارتی یکنواخت نیست. در نتیجه با توجه به نتایج به دست آمده که در شکل‌های ۱۴-الف و ۱۴-ب که شار حرارتی در دو حالت گرم و محیطی سرد نشان داده شده است بهترین محدوده برای عملکرد بهتر عایق در محدوده ۱۲ تا ۱۶ لایه می‌باشد. همچنین با توجه به دو نمودار شرایط گرم و شرایط محیطی سرد هرچه اختلاف دما محیط با ماهواره کمتر باشد، شار حرارتی نیز کاهش می‌یابد.

جدول ۷. شار حرارتی با تغییر جنس لایه بیرونی در حالت گرم

شار حرارتی در حالت گرم $(\frac{w}{m^2})$			جنس لایه بیرونی
۴۲۳ کلوین	۳۷۳ کلوین	۳۲۳ کلوین	
۲/۶۶۳۲	۱/۴۹۴۵	۰/۵۳۵۴	تفلون
۲/۶۷۵۶	۱/۴۹۹۳	۰/۵۳۹۸	تدار
۲/۶۲۱۷	۱/۴۷۸۱	۰/۵۴۰۶	پارچه بتا

جدول ۸. شار حرارتی با تغییر جنس لایه بیرونی در حالت سرد

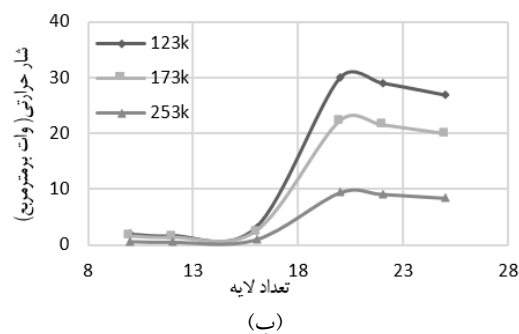
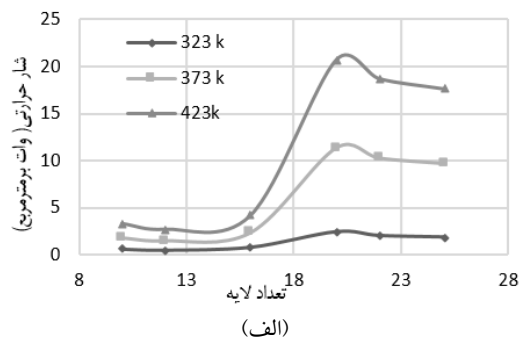
شار حرارتی در حالت سرد $(\frac{w}{m^2})$			جنس لایه بیرونی
۱۲۳ کلوین	۱۷۳ کلوین	۲۵۳ کلوین	
۱/۶۲۶۵	۱/۲۷۸۶	۰/۴۸۱۲	تفلون
۱/۶۲۰۱	۱/۲۷۶۱	۰/۴۸۲۱	تدار
۱/۶۴۷۲	۱/۲۸۶۳	۰/۴۷۷۷	پارچه بتا

دلیل تعداد حالات زیاد مدلسازی از نرم‌افزار کمک گرفته که به طور تصادفی چند حالت مختلف را نشان دهد. مطابق جدول ۹، ۲۳ حالت انتخاب شده است. هرکدام از ۲۳ حالت یکبار در شرایط محیطی گرم با دمای بدنه ماهواره ۳۱۳ کلوین و دمای محیط ۳۷۳ کلوین و یکبار در شرایط محیطی محیطی سرد با دمای بدنه ماهواره ۳۱۳ کلوین و دمای محیط ۱۲۳ کلوین مدل‌سازی شده‌اند. در جدول ۹ منظور از کپتون طلائی، کپتون با پوشش طلا است.

جدول ۹. حالات مختلف مدلسازی به منظور بررسی تاثیر همزمان پارامترها

ردیف	تعداد لایه	ضخامت	لایه چندلایه	لایه بیرونی	لایه درونی	مواد بازتابنده
۱	۲۰	۱	نومکس	تفلون	شیشه	کپتون
۲	۱۲	۱	پلی استر	پارچه بتا	طلا	تفلون
۳	۱۰	۱	داکرون	پارچه بتا	طلا	پلی استر
۴	۲۰	۱	داکرون	پارچه بتا	پلی آمید	تفلون
۵	۱۶	۱	داکرون	پارچه بتا	آلومینیوم	کپتون طلائی
۶	۱۲	۰/۵	پلی استر	تفلون	آلومینیوم	کپتون طلائی
۷	۱۲	۱	پلی استر	نومکس	آلومینیوم	کپتون طلائی
۸	۱۲	۰/۲۵	پلی استر	نومکس	پلی آمید	کپتون
۹	۱۲	۱	نومکس	تدلار	پلی آمید	تفلون
۱۰	۲۲	۱	نومکس	نومکس	آلومینیوم	کپتون طلائی
۱۱	۲۲	۱	پلی استر	نومکس	پلی آمید	میلار
۱۲	۲۲	۱	نومکس	تفلون	پلی آمید	تفلون
۱۳	۱۲	۱	داکرون	نومکس	آلومینیوم	پلی استر
۱۴	۱۰	۱	داکرون	پارچه بتا	طلا	پلی استر
۱۵	۱۲	۳	نومکس	پارچه بتا	آلومینیوم	میلار
۱۶	۱۶	۱	نومکس	تفلون	آلومینیوم	تفلون
۱۷	۱۲	۲	پلی استر	نومکس	آلومینیوم	تفلون
۱۸	۱۰	۱	نومکس	تفلون	شیشه	کپتون طلائی
۱۹	۱۲	۰/۵	داکرون	نومکس	شیشه	کپتون طلائی
۲۰	۱۶	۱	داکرون	تفلون	شیشه	کپتون طلائی
۲۱	۱۲	۲	پلی استر	تدلار	شیشه	کپتون
۲۲	۲۵	۱	پلی استر	نومکس	پلی آمید	کپتون
۲۳	۲۳	۱	پلی استر	پارچه بتا	آلومینیوم	تفلون

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب ضریب نشر در حالت محیطی گرم و حالت محیطی سرد را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد



شکل ۱۴. تاثیر تعداد لایه بر عملکرد عایق در شرایط الف) گرم ب) سرد

#### ۶-۸. اثر ضخامت لایه بر عملکرد عایق‌های چندلایه

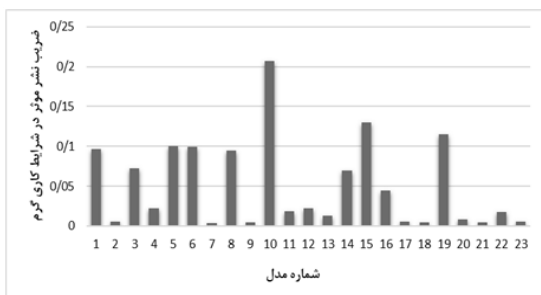
در حالت کلی محدوده ضخامت عایق چند لایه بین ۰٫۲۵ تا ۵ MIL است که هر MIL معادل ۱۲/۵ میکرون است. در این تحقیق ضخامت ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۱ و ۲ و ۳ و ۵ MIL مدلسازی شده است. شکل ۱۵-الف و ۱۵-ب تأثیر لایه‌های عایق با ضخامت‌های مختلف را بر تغییرات شار حرارتی می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضخامت لایه‌های بازتابنده، شار حرارتی کاهش می‌یابد ولی از طرفی با افزایش ضخامت سپرهای تشعشعی تأثیر انتقال حرارت هدایتی بیشتر می‌شود. لذا نتایج نشان می‌دهد که در ضخامت ۱ تا ۲ MIL بهترین عملکرد را دارد.

#### ۶-۹. بررسی تاثیر همزمان پارامترهای کاری

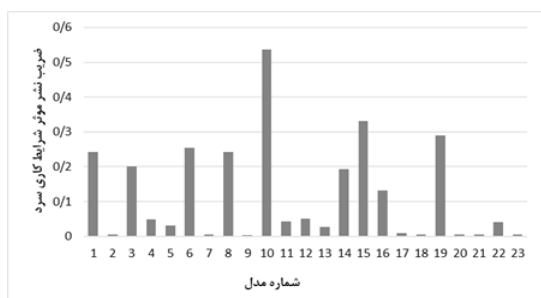
به منظور بهترین حالت ممکن برای عایق حرارتی چندلایه می‌توان از نرم‌افزار Design-Expert استفاده کرد. در این نرم افزار از مدل‌های Factorial و سپس optimal استفاده شده است. تابع هدف ضریب نشر مؤثر می‌باشد. به همین منظور ۶ متغیر را که شامل تعداد لایه، ضخامت لایه، جنس جداکننده، جنس بازتابنده، جنس لایه داخلی و جنس لایه بیرونی در نظر گرفته می‌شود. در بخش قبل اثر تک تک این پارامترها بررسی شد ولی در حالت کلی تأثیر همزمان پارامترها مدنظر می‌باشد. به

کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد عوامل مختلفی بر عملکرد حرارتی عایق چندلایه تأثیرگذار است. از مهمترین عوامل نحوه اتصال پتوهای عایق است که تأثیر قابل توجهی در میزان نشر حرارتی دارد. مهمترین نتایج به طور خلاصه به شرح زیر می‌باشد:

با در نظر گرفتن مقاومت تماسی بین جداکننده و لایه مجاور، شار حرارتی کاهش می‌یابد. از بین ۴ طرح اتصال بهترین طرح اتصال، مدل لایه به لایه است که دارای کمترین نشر حرارتی است. در محدوده ۱۰ تا ۳۰ لایه، بهترین تعداد لایه ۱۲ عدد می‌باشد. در محدوده ضخامت ۰/۲۵ تا ۵ MIL، بهترین ضخامت ۱ MIL است. بهترین جنس برای مواد جداکننده، پلی استر است. بهترین جنس برای لایه داخلی، آلومینیوم است. استفاده از هر جنس لایه بازتابنده بر طبق استاندارد، دارای عملکرد یکسانی است. بهترین جنس برای لایه بیرونی پارچه بتا است.



شکل ۱۶. ضریب نشر در شرایط گرم براساس حالات مختلف مدلسازی

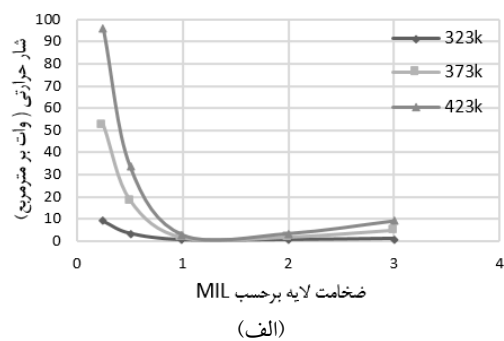


شکل ۱۷. ضریب نشر موثر در شرایط سرد براساس حالات مختلف مدلسازی

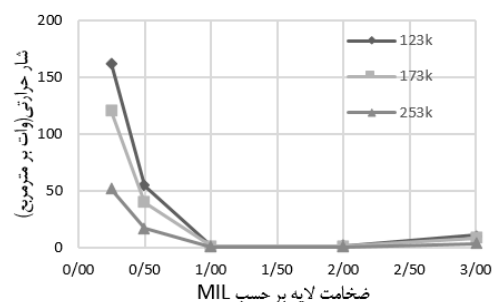
## ۸. تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت مادی و معنوی پژوهشگاه فضایی ایران- پژوهشکده مواد و انرژی اصفهان طی طرح شماره ۹۶/۱۰۵۰/۴۲۸ ق سپاسگزاری می‌گردد.

در هر دو حالت محیطی گرم و سرد بهترین حالت ممکن مدل شماره ۷، با ۱۲ لایه و با ضخامت ۱ MIL که مواد جداکننده پلی استر، مواد بیرونی نومکس، مواد لایه داخلی آلومینیوم و مواد لایه بازتابنده کیتون طلایی می‌باشد. سپس مدل های شماره ۹ و ۲۱ به ترتیب بهترین مدل‌ها هستند. در مدل شماره ۷ شار حرارتی حالت محیطی گرم ۲/۰۲۱۶ وات بر متر مربع و ضریب نشر ۰/۰۰۳۷ و در حالت محیطی سرد شار حرارتی ۲/۳۶۰ و ضریب نشر ۰/۰۰۴۸ می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵. تاثیر ضخامت لایه بر عملکرد عایق در شرایط الف) گرم ب) سرد

## ۷. جمع‌بندی

در این مقاله مدلسازی عددی و تجربی اثرات الگوهای دوجت بر عملکرد حرارتی عایق چند لایه بررسی شد. تمامی شبیه‌سازی‌ها در دو حالت شرایط محیطی گرم و شرایط محیطی سرد انجام شد و نتایج نشان داد که در دو حالت محیطی گرم و سرد ترتیب طرح‌های اتصال و همچنین اثر پارامترهای مختلف یکسان است. همچنین اثر مقاومت تماسی بین لایه و جداکننده بر طبق معادله که هولم پیشنهاد داد، اعمال شده است. از آنجاکه بین لایه‌های عایق و جداکننده مقاومت تماسی ایجاد می‌شود، شار حرارتی و ضریب نشر موثر کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن مقاومت تماسی، ضریب هدایت جداکننده کاهش یافته و انتقال حرارت رسانشی

- [1] D.G. Gilmore, *Spacecraft Thermal Control Handbook*, Second Edition, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics And Astronautics, 2002.
- [2] J. Meseguer, I. P. Grande and A. Sanz-Andres. *Spacecraft thermal control*. Woodhead publishing, 2012.
- [3] R. G. Scurlock, *History and Origins of Cryogenics*, Oxford University Press, NY, 1992.
- [4] W. D. Cornell, *Radiation Shield supports in Vacuum Insulated Containers*, U.S. Patent No. 2,643,022, 1947.
- [5] G.Lixing, Generalized equation for thermal conductivity of MLI at temperatures from 20k to 300k, *Proceedings of The International Mechanical Engineering Congress*, Washington, pp.15-21,2003.
- [6] G. Tanda, M. Misale, C. Pisoni, Thermal emittance of thin films for multilayer insulation systems, *International Conference on Heat Transfer*, pp.1-6, 2002.
- [7] H. Sugita, S. Okazaki, H. Kawasaki, Temperature dependence of thermal performance in space using multi-layer insulation, *Proceedings of The 22nd International Congress of Mechanical Engineering*, pp.1-20, California: San Diego, 2012.
- [8] D. Felip dasilva, E. Garcia, Experimental determination of the effective thermal properties of a multi-layer insulation blanket, *22nd International congress of Mechanical Engineering*, pp.5058-5066, 2013.
- [9] W.L. Johnson, N.T.van Dresar, D.J. Chato, G.R. Demers, Transmissivity testing of multilayer insulation at cryogenics temperatures, *Cryogenics*, Vol.86, pp.70-79, 2017.
- [10] J.E. Fesmire, W.L. Johnson, Cylindrical cryogenic calorimeter testing of six types of multilayer insulation systems, *Cryogenic*, Vol.89, pp.58-75, 2018.
- [11] M. Rahaghi, A. Jafari, M.Roshanfekar, Multi-layer Thermal Insulation (MLI) simulation using COMSOL Multiphysics software, *National Conference on the use of CFD in the oil and gas industry*, Vol.103,pp.865-878,2013.(in Persian)
- [12] M. Marefat, A. Esmaili, Analysis of combined conduction-Radiation Heat Transfer in Multi-layer insulation, *Amirkabir Journal of Science & Research*, Vol.46, pp.17-19, 2014. (in Persian)
- [13] H. Can, Z. Yue, Calculation of high-temperature insulation parameters and heat transfer behaviors of multi-layer insulation by inverse problems method, *Chinese Society of Aeronautics and Astronautics*, Vol.24, pp.791-796, 2014.
- [14] T. Miyakita, R. Hatakenaka, H. Sugita, M. Saitoh, T. Hirai, Development of a new multilayer insulation blanket with non-layer-contact spacer for space cryogenic, *Cryogenics*, Vol.64, pp.112-120, 2014.
- [15] C. Mengjun, Z. Ping, L. Qiang, Design and heat transfer analysis of a compound multilayer insulations for use in high temperature cylinder thermal protection systems, *Technological Sciences*, Vol.61, pp.1994-1002, 2018.
- [16] M. Spinnler, R.F. Winter, R. Viskanta, Studies on high-temperature multilayer thermal insulations, *International Journal of Heat and Transfer*, Vol.47, pp.1305-1312, 2004.
- [17] K. Daryabeigi, S. D. Miller, G.R. Cunnington, Heat transfer in high-temperature multilayer insulation, *Cryogenics*, Vol.45, pp. 221-229, 2000.
- [18] B. Wang, Y.H. Huang, P. Li, P.J. Sun, Z.C. Chen, Optimization of variable multilayer insulation for cryogenic application and experimental validation, *Cryogenics*, Vol.80, pp.154-163, 2016.
- [19] B.Deng, S.Yang, X.Xie, Study of the thermal performance of multilayer insulation used in cryogenic transfer lines, *Cryogenic*, Vol.100, pp.114-122, 2019.
- [20] E.M. Sparrow, R.D. Cess, *Radiation Heat Transfer*, Augmented Edition. McGraw- Hill, 1978.
- [21] R. j. Corruccini, Gaseous heat conduction at low pressures and temperatures, *Journal of Vacuum*, Vol.7-8, 1959.
- [22] B.Gebhart, *Heat Conduction and Mass Diffusion*, McGraw-Hill, New York, pp. 442-444, 1993.
- [23] A. Karamanos, A. Papadopoulos, D. Anastasellos, Heat transfer phenomena in fibrous insulating materials, *Laboratory of Heat Transfer and Environmental Engineering*, Department of Mechanical Engineering, 2004.
- [24] S.L. Bapat, K.G. Narayankhedkar, T.P. Lukose, Performance prediction of multilayer insulation, *Cryogenics*, Vol.30, pp.700-710, 1990.

پی نوشت

- 
1. Perforation
  2. Seam & sewing effect
  3. Adaptive
  4. Smoothness
  5. Skewness