

بررسی عددی عایق‌های چندلایه گرمایی با جداکننده‌های نانو الیاف کربن

سید عباس طالبی

امین بهزادمهر*

سمیرا پایان

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک تبدیل انرژی- دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

در تحقیق حاضر مطالعه عددی عایق‌های چند لایه گرمایی با استفاده از مواد الیافی انجام شده است. نانو الیاف‌ها با توجه به نسبت سطح به حجم بالا و در نتیجه خصوصیات تابشی ویژه بعنوان ماده جداکننده عایق‌های چند لایه گرمایی معرفی گردیده و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. انتقال گرمای تابشی الیاف‌ها با فرض عایق ضخامت نوری ضخیم و استفاده از تقریب پخش برای الیاف معمولی آلومینا و نانوالیاف کربن محاسبه شده است. برای مدل کردن رسانایی گرمایی مؤثر الیاف‌ها، پارامترهای مورد نیاز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای الیاف معمولی آلومینا و نانوالیاف کربن تعیین گردیده است. در نتایج به دست آمده، ضریب استهلاک نوری نانوالیاف کربن در دمای متوسط ۵۰۰ کلوبین حدود ۳۱ درصد نسبت به الیاف معمولی آلومینا بیشتر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نانوالیاف کربن به عنوان جداکننده‌ی عایق چند لایه باعث بهبود عملکرد عایق می‌شود. با توجه به این افزایش عملکرد، استفاده از نانوالیاف بعنوان جداکننده پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: عایق‌های چندلایه گرمایی، سیستم حفاظت گرمایی، نانو الیاف‌ها، عایق دما بالا، عایق دما پایین.

Numerical Analysis of Thermal Multilayer Insulations with carbon nanofiber spacers

S. A. Talebi

Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

A. Behzadmehr

Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

S. Payan

Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Abstract

Multilayer insulation using nanofiber materials has been numerically investigated. High surface to volume ratio of nanofibers results an important effect on both the radiation heat transfer and conduction heat transfer. Thus it is considered as an effective spacer of the multilayer insulators for investigation. The radiation heat transfer is calculated considering the optically thick assumption on the fibers and using the diffusion approximation. Thermal conductivity of alumina fiber and carbon nanofiber are determined using experimental results available in the literature. It is presented that the specific extinction coefficient of carbon nanofiber is approximately 31 percent higher than the one of alumina fiber at 500 K. The results show that using carbon nanofiber as the spacer of multilayer insulation improves the insulation performance. Thus it is suggested to be used as the spacer material.

Keywords: Multilayer thermal insulation, Nanofibers, High temperature insulation, Low temperature insulation.

تا انتقال گرمای عبوری را به کمترین مقدار برساند. بین سپرها امکان وجود گاز با رسانایی گرمایی پایین هم میسر می‌باشد. سپرها دارای روکش‌هایی از موادی مانند طلا و یا آلومینیوم هستند که دارای گسیلندگی بسیار پایین می‌باشند. مواد جداکننده به دو حالت صلب و غیر صلب می‌باشند و جنس آنها از موادی مانند الیاف پلیمری و یا مواد نسوز می‌باشد.

بحث عایق‌های چندلایه دارای خلاً اولین بار در سال ۱۹۴۷ توسط کرنل مطرح شد. او برای عایق کاری یک مخزن مایع سرد مانند اکسیژن و هیدروژن، پیشنهاد عایقی که دارای صفحات بازتاب دهنده و خلاً بین صفحات باشد را داد تا انتقال گرما به کمترین مقدار خود برسد [۱]. عایق‌های چندلایه حرارتی در سال ۱۹۵۸ توسط پترسون پیشرفت داده شد [۲]. در سال ۱۹۸۴ میلین و همکارش [۳] یک روش تحلیلی تقریبی را برای عایق‌های چندلایه به کار بردند و نتایج خود را با نتایج آزمایشی مقایسه نمودند. آن‌ها با تبدیل معادلات انتقال گرمای تابشی و رسانشی به یک سیستم معادله انتگرالی-دیفرانسیلی به تحلیل

۱- مقدمه

سیستم‌هایی نظیر ماهواره‌ها وقتی در فضا قرار می‌گیرند، می‌توان گفت که نیمی از سطح آن در تماس مستقیم اشعه‌های خورشید قرار دارد و نیمی از آن در محیط سرد قرار می‌گیرد. ماهواره‌ها چون دارای قسمت‌های مختلفی از جمله مخازن سوخت و منابع الکتریکی و دیگر دستگاه‌ها می‌باشند، ممکن است که عملکرد آنها در این شرایط گرمایی دچار اختلال شود که برای جلوگیری از این اختلال از عایق‌های گرمایی برای سطوح آن استفاده می‌کنند تا این مشکلات به حداقل برسد. یکی از عایق‌های حرارتی که دارای عملکرد بالایی می‌باشد و در محیط خلاً فضا دارای کاربرد می‌باشد، عایق‌های چندلایه گرمایی می‌باشد که در نیم قرن گذشته کاربردهای فراوانی داشته است. عایق‌های چند لایه گرمایی از چندین سپر موازی تشکیل شده است که سپرها دارای ضریب بازتاب بالایی می‌باشند و برای جلوگیری از تماس سپرها، بین آن‌ها از مواد جداکننده با رسانایی گرمایی پایین استفاده می‌شود

جمله ویژگی‌های نوری مواد الیافی، اندازه الیافها، شکل الیافها، شکل و جهت قرار گرفتن الیافها بستگی دارد [۷]. خواص گرمایی نانوالیافها در دو حالت رسانایی گرمایی مؤثر بالا [۹] و پایین [۷] بررسی شده‌اند. در تحقیق حاضر بحث بر روی خواص نانوالیافهای رسانایی گرمایی مؤثر پایین می‌باشد. نانوالیافها دارای خواص خوبی به عنوان عایق حرارتی می‌باشند.

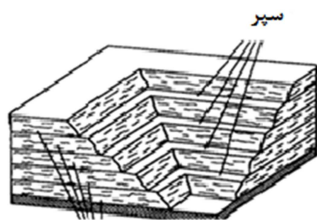
با کاهش قطر نانوالیافها، سطح الیافها افزایش می‌یابد و با افزایش سطح جذب بیشتری از انتقال گرمای تابشی انتظار می‌رود. همچنین با کاهش قطر نانوالیافها، تخلخل نانوالیافها افزایش می‌یابد و با افزایش تخلخل می‌توان نتیجه گرفت که رسانش گرمایی کاهش می‌یابد [۱۰].

چگالی سطح عبارت است از جرم در سطح واحد برای سطوح و ب‌ها که با افزایش کسر حجمی نانوالیافها در وب، چگالی سطح افزایش می‌یابد و با این افزایش، سطوح نانوالیافها زیاد می‌شود و با افزایش سطوح نانوالیافها انتقال گرمای تابش کاهش می‌یابد. دلیل دیگر این‌که با افزایش چگالی نانوالیافها، اندازه منافذهای بین نانوالیافها ریزتر می‌شود و عبور فوتون‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه رسانایی گرمایی کل کاهش می‌یابد.

با کاهش اندازه منافذهای محیط متخلخل، عبور فوتون‌ها در محیط سخت‌تر می‌شود و انتقال گرمای تابشی کاهش می‌یابد، در نتیجه انتقال گرمای عبوری کاهش می‌یابد.

۳- بیان مساله

هدف از این پژوهش، بررسی استفاده از جداکننده‌های عایق چند لایه از جنس نانو الیاف کربن در حالت دما پایین و دما بالا می‌باشد که رسانایی گرمایی مؤثر کل عایق چند لایه حرارتی نسبت به جداکننده‌های متداول که مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقایسه گردد تا در صورت امکان کارایی عایق بهبود یابد. همانطور که در شکل شماره ۱ مشاهده می‌شود، اجزای عایق‌های چند لایه گرمایی شامل سپرهای تابشی، جداکننده‌ها و گاز محصور داخل جداکننده‌ها می‌باشد.



شکل ۱- نمایی از عایق چند لایه حرارتی

جهت محاسبه مقدار رسانایی گرمایی مؤثر کل عایق نیاز به محاسبه مجموع انتقال گرماهای رخ داده در عایق، نشان داده شده در شکل شماره ۲، شامل انتقال گرمای رسانشی مواد جداکننده، رسانشی گاز، انتقال گرمای تابشی ناشی از جداکننده‌ها و انتقال گرمای تابشی ناشی از سپرهای تابشی می‌باشد.

۴- مدل فیزیکی و معادلات حاکم

دو نمونه مطابق شکل شماره ۳ به‌عنوان مدل فیزیکی مورد بحث

آن پرداختند. آن‌ها اصطلاح عایق گرمایی چند لایه خلاءدار را به کار بردند و از مواد فایبر گلاس و سلولز به عنوان جداکننده استفاده نمودند. میلن و همکارش به این نتیجه رسیدند که عایق‌های چندلایه دارای عملکرد بهتری نسبت به عایق‌های دیگر هستند. در سال ۱۹۹۲ کلر و همکاران [۴] به بررسی عایق‌های چند لایه دما بالا پرداختند. آن‌ها در ترکیب انتقال گرمای رسانشی و تابشی، تابش را با فرض ضخامت نوری ضخیم جداکننده‌ها بررسی نمودند و از ماده آلومینا به عنوان ماده جداکننده استفاده نمودند. آن‌ها در نتایج خود وزن بهینه عایق را با بهینه نمودن تعداد سپرها انجام دادند. در سال ۲۰۰۰، دریابگی و همکاران [۵] عایق‌های چند لایه دما بالا، در دماهای بین ۳۰۰ تا ۱۳۰۰ کلونین را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از مدل دو شار با فرض پراکندگی غیر همسان و محیط خاکستری، برای حل معادلات مربوط به تابش استفاده کردند. آن‌ها از طلا به عنوان روکش سپرها و از الیاف آلومینا با نقطه ذوب بالای ۲۰۰۰ کلونین با نام تجاری سافیل^۱ به عنوان ماده جداکننده استفاده نمودند. در آزمایش‌های آن‌ها نشان داده شد که استفاده از سپرها در بین عایق، رسانایی گرمایی مؤثر کل عایق را نسبت به حالتی که بدون سپر می‌باشد، کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۰۳، لیکسینگ گو معادلات کلی تابش و رسانش جامد و گاز را برای عایق‌های چندلایه برای محدوده ۲۰ تا ۳۰۰ کلونین به دست آورد. او هدف خود را تعیین توزیع دمایی و بهینه سازی سیستم عایق با تعداد لایه‌های عایق‌های چندلایه، چگالی لایه‌ها، وزن عایق و پیکربندی جداکننده‌ها با استفاده از ضرایب گرمایی به دست آمده تعیین کرد [۶]. در پژوهش‌های گذشته با استفاده از الیاف‌های معمولی و الیاف با ضخامت میکرو به بررسی عایق‌های چند لایه حرارتی پرداخته شده است و تاکنون از نانوالیافها به عنوان جداکننده استفاده نشده است. در تحقیق حاضر قصد بر این است که با استفاده از نانوالیاف کربن به عنوان جداکننده، عملکرد عایق چند لایه گرمایی بررسی شود.

۲- نانو الیافها

الیافها دارای قطرهای کوچکی نسبت به طولشان هستند که در محیط متخلخل شامل گاز و جامد از جنس موادی به شکل الیاف، به آرایش‌های مختلفی گذاشته می‌شوند. جداکننده‌های الیافی عایق‌های چند لایه شامل این محیط متخلخل می‌باشد که خاصیت گرمایی جداکننده‌ها تحت تأثیر ماده الیافها، قطر الیافها، چگالی محیط متخلخل، تعداد و اندازه منافذهای محیط متخلخل و آرایش قرار گرفتن الیافها می‌باشد. نانوالیافها در صنعت نساجی ایالت متحده آمریکا و مرکز تحقیقات استراتژیک کره و ژاپن، الیافهایی با قطر کمتر از یک میکرومتر تعریف می‌شود. در بنیاد ملی علم به الیافهایی با قطر کمتر از یک دهم میکرومتر، نانوالیاف گفته می‌شود [۷]. نانوالیافها دارای ساختار یک بعدی می‌باشند [۸] و به دلیل داشتن نسبت قطر به طول خیلی کم، نسبت سطح به حجم بالایی دارند.

۱-۲- خواص نانوالیافها

جذب و پراکندگی تابش در بین مواد الیافی به پارامترهایی از

^۱Saffil

جدول ۱- مشخصات نمونه عایق ۱ و ۲ دما بالا

نمونه ۲	نمونه ۱	
۲۶/۶	۲۶/۶	ضخامت (mm)
۱	۲	تعداد سپر
۱/۵۷	۱/۶۸	ضخامت جداکننده ۱ (mm)
۲۵/۰۴	۱/۷۳	ضخامت جداکننده ۲ (mm)
۰	۲۳/۲۲	ضخامت جداکننده ۳ (mm)
۴۸/۴	۴۸/۳	چگالی

۱-۴- معادلات حاکم

همان طور که قبل اشاره گردید، معادلات انتقال گرما در عایق چند لایه شامل سه نوع انتقال گرما تابش، رسانش گاز و رسانش جامد می‌باشد. انتقال گرما رسانشی گاز شامل رسانش گازهای بین سپرها می‌باشد. انتقال گرما رسانشی جامد هم به رسانش ماده‌ی جامد جداکننده‌ها اطلاق می‌شود. انتقال گرمای تابشی شامل تابش سطوح سپرها و تابش جداکننده‌ها که خود شامل جذب و پراکندگی می‌باشد. انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی در محیط الیافی با چگالی بیشتر از 20 kg/m^3 قابل صرف‌نظر می‌باشد، چون در چگالی‌های بالاتر، سوراخ‌های محیط الیافی به قدر کافی برای عبور گازها کوچک می‌باشد و فرصت جابه‌جایی آزاد برای گازها موجود نمی‌باشد [۱۱].

رسانایی گرمایی گاز در فضاهای خالی محیط متخلخل با ضریب تخلخل بالا تابعی از اندازه منفذهای محیط و میانگین فاصله آزاد می‌باشد [۱۲]. رسانایی گرمایی گاز بین الیاف‌ها در عایق دما بالا به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۳].

$$k_g = \frac{k_g^*}{\theta + 2\phi \frac{2-\alpha}{\alpha} \frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{Kn}{Pr}} \quad (1)$$

که ضرایب θ و ϕ ضرایب ثابتی هستند که طبق جدول شماره ۲ براساس عدد نادسن تعیین می‌شوند. k_g^* رسانایی گرمایی گاز در فشار اتمسفر و در حالت پیوسته و همگن می‌باشد و k_g رسانایی گرمایی مؤثر گاز در فشارهای مختلف می‌باشد. رابطه (۲) بیانگر عدد بی‌بعد نادسن می‌باشد.

$$Kn = \frac{\lambda}{L_c} \quad (2)$$

مسافت آزاد میانگین مولکولی به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$\lambda = \frac{K_B T}{\sqrt{2} \pi d_g^2 P} \quad (3)$$

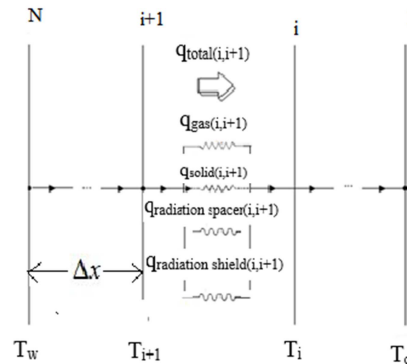
طول مشخصه برای الیاف‌ها به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$L_c = \frac{\pi D_f}{4 f} \quad (4)$$

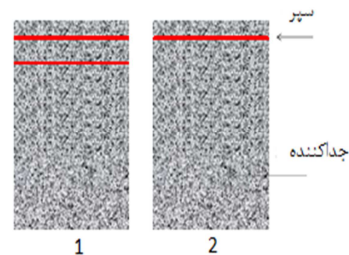
جدول ۲- مقادیر ثابت ϕ و θ

ϕ	θ	عدد نادسن (Kn)
۰	۱	$Kn < 0.1$
۱	۱	$0.1 < Kn < 10$
۱	۰	$Kn > 10$

مد نظر قرار گرفته است. در مدل اول مسأله جهت بررسی میزان کارایی استفاده از جداکننده نانو الیاف کربن در عایق‌های چند لایه دما بالا از دو نمونه مرجع [۵] با سپرهایی از جنس طلا و با ابعاد $10 \times 10 \times 10 \text{ nm}$ و با ماده‌ی جداکننده بین سپرها از جنس الیاف آلومینا با میانگین قطر الیافی $10 \times 10^3 \text{ nm}$ استفاده شده است. در کار حاضر از نانوالیاف کربن با میانگین قطر ۹۰۰ نانومتر به عنوان جداکننده استفاده شده است و قصد بر این است که نتایج عددی به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی نمونه‌های مرجع [۵] مورد مقایسه قرار گیرد. آرایش الیاف‌ها در محیط متخلخل به صورت تصادفی می‌باشد.



شکل ۲- سازوکار انتقال گرمای عایق چند لایه گرمایی



شکل ۳- نمونه ۱ و ۲ عایق‌های چند لایه گرمایی دما بالا [۵]

گاز بین الیاف‌ها نیتروژن می‌باشد. آزمایش‌ها بین دو شرط مرزی دمای ثابت انجام شده است که دمای مرزی سرد همیشه در دمای ۲۷۳ کلوین ثابت می‌ماند و دمای مرزی گرم در آزمایش‌های مختلف تغییر می‌کند. در مدل دوم مسأله جهت بررسی امکان استفاده از جداکننده نانو الیاف کربن در عایق دما پایین از عایقی که دارای ۳۰ لایه با فاصله بین لایه‌های ۰/۳ میلی‌متر و دارای شرایط مرزی ثابت مرز سرد ۲۰ کلوین و در مرز گرم با دمای ۳۰۰ کلوین، استفاده شده است. در عایق دما پایین ماده‌ی جداکننده‌ها از جنس ماده‌ی پلی اتیلن ترفنات با نام تجاری داکرون و جنس سپرها از آلومینیوم و گاز بین جداکننده‌ها نیتروژن می‌باشد. [۶]

در جدول ۱ مشخصات عایق‌های نمونه‌های عایق دما بالا نشان داده شده است.

کنند. قسمت مربوط به انتقال گرمای تابش در معادله‌ی گرما به صورت معادلات انتگرالی-دیفرانسیلی می‌باشد که حل آن مشکل می‌باشد. به همین دلیل با تقریب‌ها و فرضیاتی، مسأله را می‌توان ساده‌تر نمود. در بررسی‌های انجام شده‌ی عایق‌های چند لایه از ترفندهای مختلف در حل انتقال گرما تابش جداکننده‌ها استفاده شده است. بررسی انتقال گرما تابش جداکننده‌ها به روش‌های حل معادلات انتگرالی-دیفرانسیلی تابش [۳]، روش تقریب دوشار [۵] و تقریب پخشی [۴] انجام شده است. در تحقیق حاضر با استفاده از تقریب پخشی مسأله بررسی شده است.

در محیط‌های دارای ضخامت نوری ضخیم، انتقال گرما تابش جداکننده‌ها را می‌توان به صورت رسانش فرض نمود [۱۶]. ضخامت نوری، توانایی محیط در تضعیف کردن تابش عبوری را می‌رساند. هر چه ضخامت نوری بزرگ‌تر باشد، تابش عبوری بیشتر تضعیف خواهد شد و هر چه کمتر باشد، کمتر تضعیف خواهد شد [۱۷]. ضخامت نوری که به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود، در مقادیر خیلی بزرگ‌تر از یک، آن قدر جذب محیط زیاد می‌شود که تمام تابش ورودی را قبل از خروج در ضخامتی کمتر از ضخامت محیط جذب می‌کند. در ضخامت‌های نوری کم، جذب تابش در ضخامت‌های خیلی بزرگ‌تر از ضخامت محیط انجام می‌شود و جذب تابش در ضخامت محیط بسیار دارای مقدار ناچیزی می‌باشد.

$$\tau = \rho e L \gg 1 \quad (13)$$

که L ، e ، ρ به ترتیب چگالی جداکننده‌ها، ضریب استهلاک نوری ویژه و ضخامت جداکننده‌ها می‌باشد. با ضخامت نوری خیلی بزرگ‌تر از یک، انتقال گرمای تابشی را می‌توان به صورت انتقال گرمای رسانش فرض نمود و به صورت رابطه (۱۴) بیان کرد.

$$q_{Rspacer} = -k_{Rspacer} \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

در این صورت در معادله گرما، قسمت مربوط به انتقال گرمای تابش به صورت رسانش در می‌آید و با قسمت انتقال گرمای رسانش جمع می‌شود و به صورت رابطه‌ی (۱۵) بیان می‌شود.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{dT}{dx} \right) \quad (15)$$

رسانایی گرمایی معادله گرما شامل رسانایی گرمایی ناشی از تابش جداکننده‌ها هم می‌شود که این در رابطه‌ی (۱۶) بیان شده است.

$$k = k_s + k_g + k_{Rshield} + k_{Rspacer} \quad (16)$$

محققان رسانایی گرمایی ناشی از تابش محیط متخلخل الیاف‌ها را به شکل‌های مختلف تعریف نموده‌اند که شکل کلی آن در رابطه (۱۷) نشان داده شده است.

$$k_{Rspacer} \propto \frac{r}{f_v} T_{me}^3 \quad (17)$$

که r شعاع الیاف، f_v کسر حجمی الیاف‌ها و T_{me} دمای میانگین عایق الیافی می‌باشد [۱۸].

ضریب تناسب، پارامتری می‌باشد که استهلاک انتقال گرمای تابش را بیان می‌کند. روابط رسانایی گرمایی ناشی از جذب محیط متخلخل الیافی در جدول ۳ بیان شده است. در کار حاضر رسانایی گرمایی معادل رسانش جذب تابش بین لایه‌ها با فرض ضخامت نوری ضخیم و

قطر برخورد گاز برای گازهای نیتروژن و هوا در مراجع آورده شده است که برای نیتروژن دارای مقدار $10^{-10} \times 3789 \times$ متر می‌باشد و تغییرات بسیار ناچیزی با دما دارد [۱۴].

رسانایی گرمایی گاز در عایق دما پایین توسط رابطه (۵) مطرح می‌شود [۲۳].

$$k_g = C_1 \alpha P (T_w - T_c) \quad (5)$$

در روابط ذکر شده α ، ضریب تطابق حرارتی بین گاز و سطوح جامد می‌باشد و بیانگر درصد مولکول‌های گاز مجاور سطح جامد می‌باشد که با سطح جامد به تعادل حرارتی رسیده است. مقدار آن برای گازهای مختلف و سطوح مختلفی که گاز با آن در ارتباط می‌باشد، مختلف می‌باشد. مقدار C_1 توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود. P و M به ترتیب فشار و وزن مولکولی گاز می‌باشد.

$$C_1 = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{R}{4\pi M T}} \quad (6)$$

γ نسبت گرمای ویژه گاز در فشار ثابت به حجم ثابت می‌باشد برای مدل‌سازی رسانایی گرمایی در عایق دما بالا و الیاف غیرصلب به عنوان جداکننده رابطه‌ی تجربی (۷) پیشنهاد می‌شود [۱۷].

$$k_s = f m k_s^{**} \quad (7)$$

m ، یک ضریب تجربی می‌باشد و با استفاده از آزمایش و یا تخمین پارامتر با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید. k_s^{**} رسانایی گرمایی ماده اصلی جداکننده‌ها در حالت پیوسته و همگن می‌باشد

برای مدل‌سازی رسانایی گرمایی جداکننده‌ها برای عایق دما پایین با الیاف صلب رابطه‌ی تجربی (۴-۱۳) پیشنهاد می‌شود [۶].

$$k_s = C_2 \cdot f \cdot k_1 \quad (8)$$

که در آن، k_1 رسانایی گرمایی ماده جداکننده‌ها می‌باشد که به دما بستگی دارد. رابطه (۹) رابطه پیشنهادی برای رسانایی گرمایی الیاف داکرون می‌باشد که برای جداکننده‌ی عایق چند لایه دما پایین به کار می‌رود.

$$k_1 = 0.017 + 7 \times 10^{-6} (800 - T) + 0.0228 \times \ln(T) \quad (9)$$

ضریب C_2 که به صورت تجربی به دست می‌آید، توسط رابطه (۱۰) برای الیاف داکرون محاسبه می‌شود [۶]

$$k_1 = 0.017 + 7 \times 10^{-6} (800 - T) + 0.0228 \times \ln(T) \quad (10)$$

انتقال گرمای تابش بین دو لایه موازی دارای طول بی نهایت که بین آن‌ها یک جداکننده وجود دارد توسط رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شود [۱۵]. رابطه (۱۱) به صورت رسانایی گرمایی در رابطه (۱۲) آورده شده است.

$$q_{Rshield} = \frac{\sigma A (T_w^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (11)$$

$$k_{Rshield} = \frac{\sigma A}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} (T_w^2 + T_c^2) (T_w + T_c) \Delta x \quad (12)$$

جداکننده‌های عایق در صورت کدر بودن، روی انتقال گرمای عبوری عایق تأثیر می‌گذارند و انتقال گرما را جذب و یا پراکننده می‌-

$$q_{total} = \frac{T_w - T_c}{RE_{TOTAL}} \quad (24)$$

رسانایی گرمایی مؤثر کل عایق چند لایه به صورت رابطه (25) به دست می‌آید که L ضخامت کل عایق می‌باشد [5].

$$k_{effective} = \frac{q_{TOTAL} \times L}{T_w - T_c} \quad (25)$$

۵- تعیین پارامترهای مجهول رسانایی‌های گرمایی الیاف‌ها

برای یافتن مقدار ضریب استهلاک نوری ویژه و ضریب m رابطه رسانایی گرمایی جامد، برای مدل کردن رسانایی گرمایی مؤثر الیاف‌ها، نیاز به تخمین پارامترها به وسیله داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد که این کار برای الیاف معمولی آلومینا و نانوالیاف کربن انجام شده است.

۵-۱- تعیین پارامترهای مجهول رسانایی‌های گرمایی الیاف آلومینا

در این بخش برای الیاف معمولی آلومینا، این ضرایب تخمین زده می‌شود. رسانایی گرمایی مؤثر در این بخش مجموع رسانایی گرمایی جامد، گاز و جذب تابش عایق می‌باشد. داده‌های آزمایشگاهی عایق‌های الیافی با الیاف آلومینا در حالت پایا در سه چگالی 48 kg/m^3 ، 24 kg/m^3 و 48 kg/m^3 و در سه ضخامت $13/3$ ، $26/6$ و $39/9$ میلی متری و در محدوده فشار 0.133 پاسکال تا $99/98$ کیلو پاسکال می‌باشد. مقادیر چگالی، ضخامت و کسر جامد نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۴ آمده است [۱۱].

جدول ۴- مشخصات نمونه‌های عایق آلومینا در مرجع [۱۱]

نمونه	ضخامت (mm)	چگالی (kg/m^3)	نسبت کسر جامد (f)
۱	۱۳/۳	۲۴/۲	۰/۰۰۷۳
۲	۱۳/۳	۴۸/۶	۰/۰۱۴۷
۳	۲۶/۶	۲۴/۲	۰/۰۰۷۳
۴	۲۶/۶	۴۸	۰/۰۱۴۵
۵	۲۶/۶	۷۲	۰/۰۲۱۸
۶	۳۹/۹	۲۴/۲	۰/۰۰۷۳
۷	۳۹/۹	۷۲	۰/۰۲۱۸
۸	۲۶/۶	۲۴/۲	۰/۰۰۷۳
۹	۳۹/۹	۲۴/۲	۰/۰۰۷۳

جدول ۵- مشخصات الیاف آلومینا

متوسط قطر الیاف آلومینا (m)	چگالی ماده آلومینا (kg/m^3)	نحوه قرارگیری الیاف‌ها
3×10^{-6}	۳۳۱۵	تصادفی

به صورت تابعی از ضریب استهلاک نوری به صورت رابطه (۱۸) استفاده می‌شود. [۲۱ و ۲۲]

$$k_{Rspacer} = \frac{16\sigma \cdot n^2}{3\rho \cdot e} T_{me}^3 \quad (18)$$

$$e = a + bT$$

که n ضریب شکست نور و e ضریب استهلاک نور ویژه می‌باشد که به صورت تابعی از دما در نظر گرفته می‌شود. این ضریب مجموع ضریب‌های جذب و پراکندگی محیط تقسیم بر چگالی تعریف می‌شود. مقدار ضرایب مجهول e به صورت تجربی و یا با استفاده از روش تخمین پارامتر از داده‌های آزمایشگاهی یافت می‌شود.

جدول ۳- روابط رسانایی گرمایی ناشی از جذب محیط متخلخل الیافی

نویسنده	$k_{Rspacer}$	ضریب تجربی
ورسچورو گریبلر [۱۹]	$\frac{2\pi\sigma \cdot r T_{me}^3}{\zeta^2 \cdot f_v}$	$\frac{1}{\zeta^2}$ فاکتور کدری
بنکوال [۲۰]	$\frac{2\pi\sigma \cdot r T_{me}^3}{\zeta^2 \cdot f_v}$	$\frac{1}{\zeta^2}$ فاکتور کدری
وندرهلد [۲۱]	$\frac{16\sigma \cdot T_{me}^3}{3\rho \cdot e}$	$\rho \cdot e$ ضریب استهلاک نوری

شار گرمای کل در هر لایه توسط رابطه (۱۹) به دست می‌آید که رسانایی گرمایی کل شامل رسانش گاز و جامد، تابش بین سپرها و جذب جداکننده‌ها می‌باشد.

$$q_{total(ii+1)} = \frac{k_t(ii+1)}{\Delta x} (T_{i+1} - T_i) \quad (19)$$

$$k_{t(ii+1)} = k_{s-g(ii+1)} + k_{Rshield(ii+1)} + k_{Rspacer(ii+1)} \quad (20)$$

که در رابطه (۲۰)، k_{s-g} معادل رسانایی گرمایی جامد و گاز می‌باشد که در مسأله حاضر از مدل موازی طبق رابطه (۲۱) با ضریب $f=0/5$ استفاده شده است.

$$k_{s-g} = f k_s + (1-f) k_g \quad (21)$$

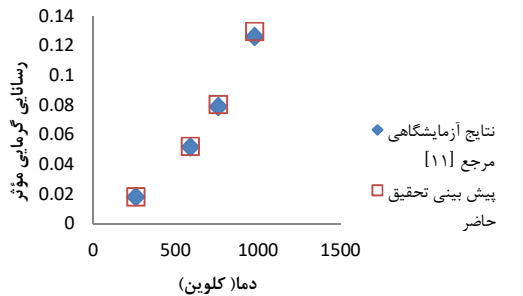
مقاومت گرمایی معادل در هر لایه توسط رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

$$RE_{t(ii+1)} = \frac{\Delta x(ii+1)}{k_{t(ii+1)}} \quad (22)$$

برای هر لایه مقاومت گرمایی محاسبه می‌شود و با جمع کردن تمام این مقاومت‌ها، مقاومت مؤثر کل عایق توسط رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

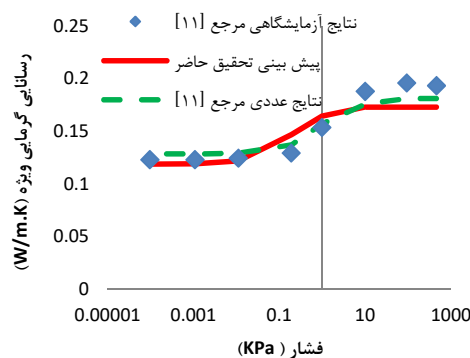
$$RE_{TOTAL} = \sum_{i=1}^N RE_{t(ii+1)} \quad (23)$$

با توجه به این‌که مسأله حاضر با فرض حالت پایا می‌باشد، شار گرمایی کل از یک لایه به لایه بعدی ثابت می‌ماند و از رابطه (۲۴) به دست می‌آید.



شکل ۴- اعتبارسنجی رسانایی گرمایی پیش بینی شده از تخمین پارامتر برای عایق آلومینا با ضخامت ۳۹/۳ میلی متر-چگالی ۲۴- فشار ۰/۱۳۳ پاسکال

در نمودار شکل ۵ اعتبارسنجی مقادیر پیش بینی شده ی تحقیق حاضر و نتایج آزمایشگاهی و عددی مرجع [۱۱] برای عایق نمونه با اختلاف دمای یکسان و فشارهای مختلف آمده است که دارای میانگین خطای ۷/۴ درصد می باشد که قابل قبول می باشد.



شکل ۵- اعتبارسنجی رسانایی گرمایی پیش بینی شده از تخمین پارامتر برای عایق آلومینا با ضخامت ۱۳/۳ میلی متر و چگالی ۲۴/۲ کیلوگرم بر متر مکعب و اختلاف دمای ۹۳۸ کلوین

همان طور که در نمودارهای بالا مشاهده شد، خطاهای بین مقادیر پیش بینی شده از تخمین پارامتر با نتایج آزمایشگاهی دارای دقت های قابل قبولی می باشد و تخمین پارامتر با فرض ضخامت نوری ضخیم دارای اعتبار و می توان برای نانوالیاف کربن به کار برد.

۲-۵- تعیین پارامترهای مجهول رسانایی های گرمایی نانوالیاف کربن

از آن جا که در این تحقیق قصد بر این است که رفتار نانوالیافها بر روی عایق بررسی شود، نیاز به رسانایی های گرمایی انتقال گرمایی نانوالیافها می باشد. محیط متخلخل نانوالیافها همانند الیاف معمولی آلومینا متشکل از سه مکانیزم انتقال گرمایی تابش، رسانش گاز و رسانش جامد (الیافها) می باشد و این سه انتقال گرما تحت تأثیر محیط متخلخل نانوالیافها می باشد. برای مدل کردن رسانایی گرمایی مؤثر نانوالیافها، از داده های آزمایشگاهی نانوالیاف کربن [۷] استفاده

نسبت کسر جامد، همان طور که در فصل های گذشته بیان شد، نسبت چگالی عایق به چگالی ماده الیاف می باشد. در جدول ۵ مشخصات الیاف آلومینا نشان داده شده است.

رابطه ضریب استهلاک نوری ویژه با دما یک تابع درجه یک در نظر گرفته شده است و نتایج حاصل از تخمین پارامتر در جدول ۶ آورده شده است. خطای جذر میانگین مربعات تخمین پارامتر کار حاضر با کار عددی [۱۱] که با فرض تقریب دو شار، تخمین پارامتر انجام داده است، در جدول ۷ نشان داده شده است. خطای جذر میانگین مربعات، معیاری برای سنجش خطای مقادیر پیش بینی شده از مقادیر آزمایشگاهی می باشد که به صورت رابطه (۲۶) تعریف می شود.

$$RMS = \sqrt{\frac{S}{\mu}} \quad (26)$$

که μ تعداد داده های آزمایشگاهی می باشد که جهت روش تخمین پارامتر مورد استفاده قرار گرفته است و S مجموع مربع خطاهای رسانایی گرمایی آزمایشگاهی و پیش بینی می باشد.

جدول ۶- پارامترهای تخمین زده شده ی رسانایی گرمایی مؤثر آلومینا

a	b	m
۵۷/۳۲	۰/۰۰۸۵۷	۱/۳۲۳

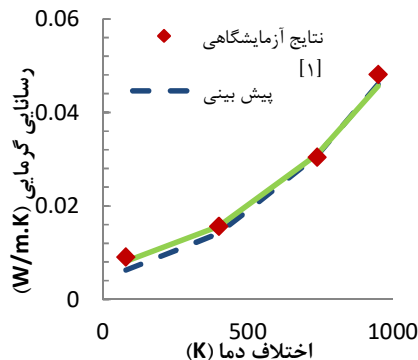
جدول ۷- خطای تخمین پارامترهای رسانایی گرمایی مؤثر آلومینا

پارامتر تخمینی	مدل کار حاضر	مدل دو شار محققان [۱۱]
S	۷/۸۹*۱۰	۹/۳۱*۱۰
RMS	۵/۵۳*۱۰	۵/۰۷۵*۱۰

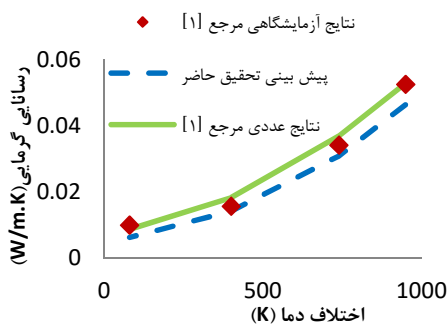
نتایج به دست آمده از کد محاسباتی با داده های آزمایشگاهی و عددی مرجع [۱۱] اعتبارسنجی شده است. این اعتبارسنجی در اختلاف دما، چگالی و فشارهای مختلف انجام شده است. در نمودار شکل ۴ اعتبارسنجی مقادیر نتایج پیش بینی شده ی تخمین پارامتر با نتایج آزمایشگاهی برای نمونه با چگالی ۲۴kg/m³ نشان داده شده است که دارای میانگین خطای ۱/۴ درصد می باشد که خطای آن از رابطه ی (۲۷) بدست می آید.

$$error = \left| \frac{(k_e - k_p)}{k_e} \right| \times 100 \quad (27)$$

در اعتبارسنجی‌های دو نمودار قبل، در اختلاف دماهای پایین مرزی خطاها بیشتر می‌باشد و دلیل آن به نظر تأثیر کمتر انتقال گرمای تابش جداکننده‌ها می‌باشد. چون از فرض ضخامت نوری ضخیم استفاده شده است، در دماهای پایین خطاهای ناشی از استفاده از این فرض بیشتر می‌شود.



شکل ۷- اعتبارسنجی کار با نتایج آزمایشگاهی و عددی مرجع [۵]. برای نمونه عایق ۱ در فشار ۰/۰۱۳ کیلوپاسکال گاز



شکل ۸- اعتبارسنجی کار با نتایج آزمایشگاهی و عددی مرجع [۵] برای نمونه ۲ در فشار ۰/۰۱۳ کیلوپاسکالی گاز

۷- نتایج و بحث

در نمودار شکل ۹ میزان رسانایی‌های گرمایی مختلف عایق دما پایین رسم شده است که ماده‌ی جداکننده‌ها از جنس ماده‌ی پلی اتیلن ترفنات با نام تجاری داکرون و جنس سپرها از آلومینیوم می‌باشد. در لایه‌های نزدیک سطح گرم به دلیل افزایش دما، رسانایی‌های گرمایی دارای مقدار بیشتری نسبت به لایه‌های نزدیک سطح سرد می‌باشد. همان‌طور که در نمودار قابل مشاهده می‌باشد، مقدار ضریب ناشی از جذب تابش جداکننده‌ها بسیار کمتر از دیگر مقادیر می‌باشد و این به دلیل پایین بودن دماها می‌باشد و تأثیر آن کم می‌شود چون تأثیر جذب تابش در عایق‌های دما پایین کم می‌باشد، نانوالیاف‌ها که دارای جذب بالایی می‌باشند در عایق‌های دما بالا بررسی می‌شوند.

شده است.

در جدول ۸ نتایج تخمین پارامتر نانوالیاف کربن با فرض خطی گرفتن ضریب استهلاک نوری با دما نشان داده شده است و با نتایج مربوط به تخمین پارامتر آلومینا، مورد مقایسه قرار گرفته است.

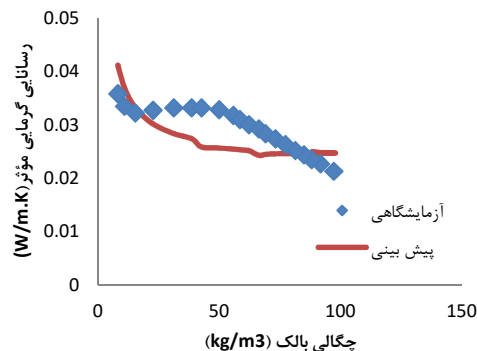
در نمودار شکل ۶ مقایسه‌ی نتایج پیش بینی شده‌ی رسانایی گرمایی مؤثر نانوالیاف کربن با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۷] آن نشان داده شده است که دارای میانگین خطای ۹/۶٪ می‌باشد که دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.

جدول ۸- پارامترهای تخمین زده شده‌ی رسانایی گرمایی مؤثر نانوالیاف کربن

پارامتر	مدل موازی نانوالیاف کربن	مدل موازی تخمینی آلومینا
a	۳۲/۳۹۹	۵۷/۳۲
b	۰/۰۹۶۸	۰/۰۸۵۷
m	۸/۲۰۵	۱/۳۲۳
S	$۳/۰۶ \times 10^{-۴}$	$۷/۹۶ \times 10^{-۴}$
RMS	$۳/۹۰ \times 10^{-۳}$	$۵/۵۳ \times 10^{-۳}$

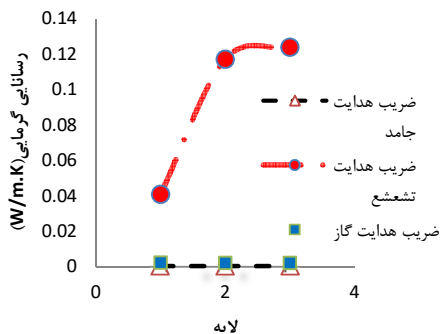
۶- اعتبارسنجی عایق چند لایه گرمایی

در نمودار شکل ۷ رسانایی‌های گرمایی مؤثر کل عایق نمونه شماره‌ی یک به دست آمده از حل عددی تحقیق حاضر در اختلاف دماهای مختلف مرزی و فشار ۰/۰۱۳ کیلو پاسکال با نتایج تجربی و عددی مرجع [۵] مورد مقایسه قرار گرفته است و نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی به جزء در اختلاف دمای پایین که مقدار رسانایی گرمایی بسیار کم می‌باشد و خطا در آن کمی زیاد می‌شود، در دیگر اختلاف دماها، میانگین خطا حدود ۵ درصد می‌باشد و با مجموع خطای اختلاف دمای کم حدود ۱۱ درصد می‌شود.

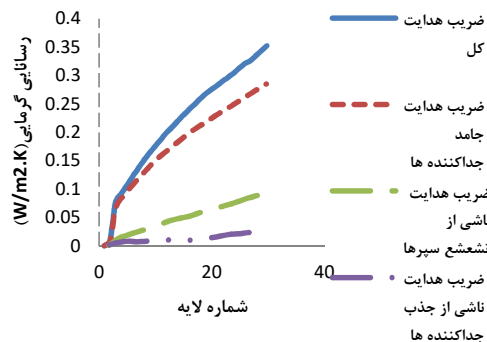


شکل ۹- رسانایی گرمایی مؤثر پیش بینی شده‌ی نانوالیاف کربن و نتایج آزمایشگاهی مرجع [۷]

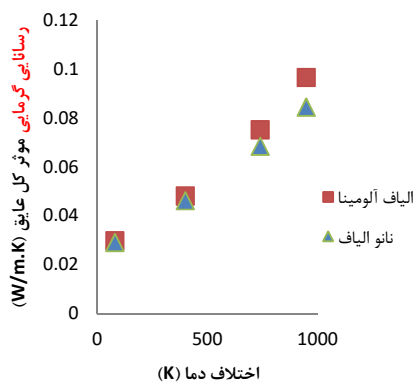
در نمودار شکل ۸ رسانایی‌های گرمایی مؤثر کل عایق نمونه شماره‌ی دو در اختلاف دماهای مختلف و فشار ۰/۰۱۳ کیلو پاسکال با نتایج تجربی و عددی مرجع [۵] مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی دارای میانگین خطای حدود ۱۰٪ می‌باشد.



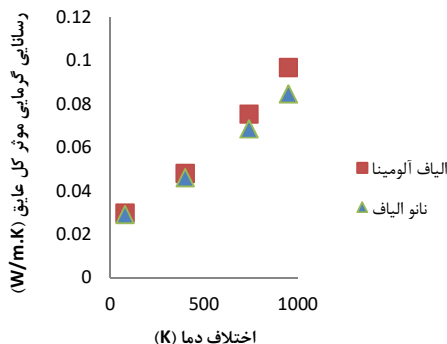
شکل ۱۱- رسانایی گرمایی عایق نمونه شماره ۱ با فشار گاز ۱۳ پاسکال



شکل ۹- مقادیر رسانایی گرمایی عایق دما پایین با جداکننده پلی اتیلن ترفتالات و سپر آلومینیومی

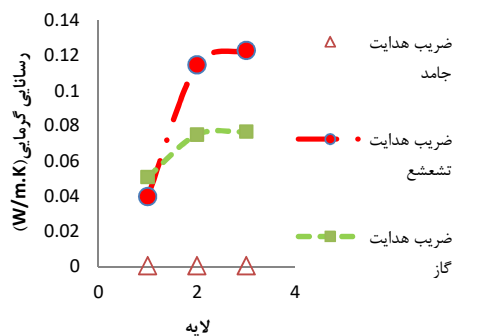


شکل ۱۲- رسانایی گرمایی مؤثر عایق با دو جداکننده آلومینا با قطر در حد میکرو و نانوالیاف کربن برای نمونه شماره ۱ با فشار گاز ۱۳/۳ کیلو پاسکال



شکل ۱۳- رسانایی گرمایی مؤثر عایق با جداکننده آلومینا و نانوالیاف کربن- نمونه شماره ۲ با فشار گاز ۱۳/۳ کیلو پاسکال

برای مقایسه رسانایی‌های گرمایی ناشی از هر مکانیزم در عایق دما بالا، در نمودارهای اشکال ۱۰ و ۱۱ مقادیر رسانایی‌های گرمایی هر قسمت از انتقال گرمایی برای عایق نمونه شماره ۱ یک در دو فشار بالا و پایین رسم شده است. در نمودارها مقادیر رسانایی گرمایی ناشی از جذب تابش دارای بیشترین مقدار می‌باشد و دلیل آن دمای بالای عایق می‌باشد. در نمودار شکل ۱۰ مقدار رسانایی گرمایی ناشی از گاز به دلیل فشار زیاد دارای مقدار بالاتری نسبت به نمودار شکل ۱۱ می‌باشد و در هر دو نمودار، مقادیر رسانایی گرمایی ناشی از الیاف‌ها (جامد) به دلیل تخلخل بالا دارای کمترین مقدار می‌باشد. رسانایی گرمایی اصلی در عایق، رسانایی گرمایی تابش می‌باشد و به دلیل بالا بودن رسانایی گرمایی تابش در عایق دما بالا، می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از نانوالیاف کربن که دارای جذب بالای انتقال گرمایی تابش می‌باشد، چنانچه به عنوان جداکننده عایق مورد استفاده قرار گیرد، عملکرد عایق بهبود خواهد یافت که در ادامه مقاله بررسی خواهد شد.



شکل ۱۰- رسانایی‌های گرمایی هر بخش از انتقال گرمایی عایق نمونه شماره ۱ با فشار ۱۳/۳ کیلو پاسکال

نانوالیاف کربن در فشار ۱۳/۳ کیلو پاسکالی نشان داده شده است که رسانایی گرمایی مؤثر نانو الیاف در اختلاف دماهای مرزی مختلف، دارای مقدار کمتری نسبت به الیاف معمولی آلومینا می‌باشد و دلیل آن همانطور که ذکر شد، تأثیر مؤثر نانو الیاف‌ها در جذب انتقال گرمایی تابش می‌باشد. ضریب استهلاک نوری نانوالیاف کربن در مقایسه با

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ برای نمونه‌های شماره ۱ یک و دو رسانایی‌های گرمایی مؤثر عایق چند لایه برای الیاف معمولی آلومینا و

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی عددی عایق‌های چند لایه گرمایی با جداکننده‌های الیافی پرداخته شد. همچنین بررسی‌ها در فشارهای بالا و پایین گاز بین سپرها بررسی شده است. تاکنون بر روی الیاف‌های معمولی و در اندازه میکرومتر به عنوان جداکننده‌ی عایق تحقیقاتی انجام شده بود که در این تحقیق به بررسی نانوالیاف‌ها به عنوان جداکننده‌های عایق پرداخته شده است. نتایج حاصله بر روی نانوالیاف کربن بیانگر این است که نانوالیاف‌ها بیشتر بر روی خواص تابشی در دماهای بالا تأثیرگذار هستند و با جذب زیاد انتقال گرما عبوری از خود، عایق گرمایی مناسبی می‌باشد. به همین جهت توصیه می‌شود از نانوالیاف‌ها به عنوان جداکننده‌های عایق دما بالا که تأثیر تابش بر روی آن زیاد است، استفاده گردد. در نتایج به دست آمده، عایق چند لایه با نانوالیاف کربن (به عنوان جداکننده)، دارای رسانایی گرمایی مؤثر کل کمتری نسبت به عایق چند لایه با آلومینا (به عنوان جداکننده) می‌باشد و مسلماً با پایین بودن رسانایی گرمایی مؤثر عملکرد عایق بهبود می‌یابد.

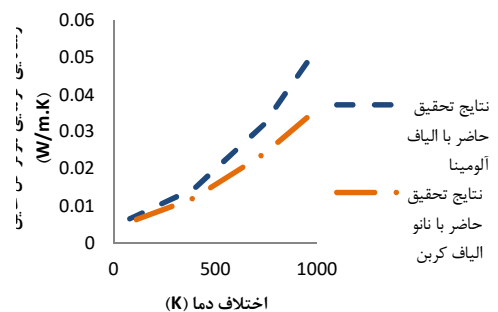
الیاف آلومینا در دمای متوسط ۵۰۰ کلون حدود ۳۱ درصد بیشتر می‌باشد و این افزایش ضریب استهلاک نوری، عملکرد عایق چند لایه دما بالا را بهبود می‌بخشد. در دو نمودار شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نتایج عددی مقایسه‌ی نانوالیاف با الیاف معمولی آلومینا برای دو نمونه عایق در فشار پایین ۰/۰۱۳ کیلوپاسکال نشان داده شده است. در نمودارهای مقایسه‌ی دو الیاف آلومینا و نانوالیاف کربن، تأثیر خوب عایق نانوالیاف کربن به عنوان جداکننده‌ی عایق نشان داده شده است که در فشار پایین رسانایی گرمایی مؤثر حدود ۲۸ درصد برای نمونه‌ی شماره یک و حدود ۳۲ درصد برای نمونه‌ی شماره دو نسبت به جداکننده‌ی آلومینا کاهش دارد. نکته قابل توجه در نمودارهای مقایسه‌ی نانو الیاف کربن و الیاف آلومینا این است که اختلاف رسانایی‌های گرمایی مؤثر جداکننده‌ها در اختلاف دماهای بالاتر بیشتر می‌شود و دلیل آن این است که با افزایش دما میزان انتقال گرمای تابش جداکننده‌ها بیشتر می‌شود و با این افزایش جداکننده‌ای که بیشتر بتواند این انتقال گرما را تضعیف نماید، مطمئناً عملکرد بهتری خواهد داشت. پس طبق نتایج نانو الیاف کربن نسبت به الیاف آلومینا به عنوان جداکننده عایق دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

۹- فهرست علائم

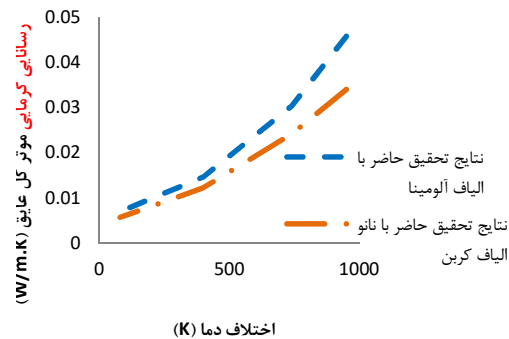
A	سطح سپرها (m ²)
D _f	قطر الیاف‌ها (m)
d _g	قطر برخورد گاز (m)
e	ضریب استهلاک نوری ویژه (m ² /kg)
f	تراکم نسبی جداکننده در مقایسه با ماده
f _v	کسر حجمی الیاف‌ها
k	رسانایی گرمایی در حالت پیوسته و همگن (W/m.K)
L	ضخامت عایق (m)
L _c	طول فیزیکی (m)
q	شار گرمایی (W/m ²)
Re	مقاومت گرمایی (m ² K/W)
RMS	خطای جذر میانگین مربعات
r	شعاع الیاف‌ها (m)
S	مجموع مربع خطاهای رسانایی‌های گرمایی
T	آزمایشگاهی و پیش بینی دمای گاز (K)
t	زمان (s)
x	مختصات (m)
Δx	فاصله بین دو سپر (m)

علائم یونانی

α	ضریب تطابق گاز و جامد
ε	ضریب نشر تابشی
θ	ضریب ثابت در رابطه رسانایی گرمایی گاز بین الیاف‌ها در عایق دما بالا



شکل ۱۴. رسانایی گرمایی مؤثر عایق با جداکننده‌های آلومینا و نانوالیاف کربن برای نمونه شماره ۱ با فشار گاز ۰/۰۱۳ کیلو پاسکال



شکل ۱۵. رسانایی گرمایی مؤثر عایق با جداکننده‌های آلومینا و نانوالیاف کربن برای نمونه شماره ۲ با فشار گاز ۰/۰۱۳ کیلو پاسکال

[11] Daryabeigi, K., Heat Transfer in High-Temperature Fibrous Insulation, <i>Journal of Thermophysics and Heat Transfer</i> , Vol. 17, No. 1, pp. 10-20, 2003.	ضریب ثابت در رابطه رسانایی گرمایی	ϕ
[12] Daryabeigi K., Cunnington G.R., Knutson J.R., Measurement of Heat Transfer in Unbonded Silica Fibrous Insulation and Comparison with Theory, <i>29th International Thermal Conductivity Conference (ITCC)</i> , Birmingham, United States, 24-27 Jun, 2007.	گاز بین الیاف‌ها در عایق دما بالا	γ
[13] Gebhart B., Heat Conduction and Mass Diffusion, <i>McGraw-Hill</i> , New York, pp. 442-444, 1993.	نسبت گرمای ویژه گاز در فشار ثابت به حجم ثابت	λ
[14] Glassman I. and Harr B.L., collision diameters of some gases as functions of Temperature, <i>The journal of physical chemistry</i> , vol.56, pp.797-799, 1952.	مسافت آزاد میانگین مولکولی	μ
[15] Incropera, Dewitt, Bergman, Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, sixth edition, <i>Wiley</i> , 2006.	تعداد داده‌های آزمایشگاهی تخمین پارامتر	ρ
[16] Modest M. F., Radiative Heat Transfer, <i>Mc Graw-Hill</i> , 1993.	چگالی (kg/m^3)	$\sigma=5.675 \times 10^{-8}$
[17] Sparrow E.M., Cess R.D., Radiation Heat Transfer, Augmented Edition. <i>McGraw-Hill</i> , 1978.	ثابت استفان بولتزمن ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)	τ
[18] Tong T.W, Tien C.L., Analytical models for thermal radiation in fibrous insulations, The Second International Conference on Thermal Insulation, Millbrae, California, May 27 to 29, 1980.	ضخامت نوری جداکننده‌ها	زیرنویس‌ها
[19] Verschoor J. D. and Greebler P., Heat Transfer by Gas Conduction and Radiation in Fibrous Insulations, <i>Trans., Am. Soc. Mech. Engrs.</i> , Vol. 74, pp 961-968, 1952.	گاز	g
[20] Bankvall C. G., Heat Transfer in Fibrous Materials, <i>J. Test. Eval.</i> , Vol. 1, pp.235-243, 1973.	تابش	R
[21] Van der Held E. F. M., The Contribution of Radiation to the Conduction of Heat, II. Boundary Conditions, <i>Appl. Sci. Res.</i> , Section A, Vol. 4, pp. 99-77, 1953.	تابش ناشی از سطوح سپرها	Rshield
[22] Hager N. E., Steere Jr. and R. C., Radiant Heat Transfer in Fibrous Thermal Insulation, <i>J. Appl. Phys.</i> , Vol. 38, pp. 4663-4668, 1967.	تابش ناشی از جذب جداکننده‌ها	Rspacer
[23] Corruccini R. j, Gaseous heat conduction at low pressures and temperatures, <i>Journal of Vacuum</i> , Vol 7-8, April, 1959.	جامد	s
	جامد-گاز	s-g

۱۰- مراجع

- [1] Cornell W.D., Radiation Shield supports in Vacuum Insulated Containers, *U.S. Patent* No. 2,643,022, 1947.
- [2] Peterson, P., Swedish Technical Research Council Report No. 706, *Sartryck Ur TVF*, 29, 4, P. 51, 1958.
- [3] Mil'man S.B. and Kaganer M.G., Heat transfer by combined radiation and conduction in cryogenic vacuum-multilayer thermal insulation, Scientific-Industrial Union "Geli-mssh," Moscow, Translated from *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurna*, Vol. 46, No. 5, pp. 754-760, May, 1984.
- [4] Keller K., Hoffmann M., Zorner W., Blumenberg J. Application of high temperature multilayer insulations, *Journal of Acta Astronautica*, Vol. 26, No. 6, pp. 451-258, 1992.
- [5] Daryabeigi K., Miller S. D., Cunnington G.R., Heat transfer in high-temperature multilayer insulation, *Cryogenics*, Vol 45, pp. 221-229, 2000.
- [6] Gu L., Generalized equation for thermal conductivity of MLI at temperatures from 20k to 300k, 2003 *ASME International Mechanical Engineering Congress*, Washington, D.C., November 15-21, 2003
- [7] Gibson P.W., Lee C., Ko F., Reneker D., Application of Nanofiber Technology to Nonwoven Thermal Insulation, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Volume 2, Issue 2, 2007.
- [8] Demko M.T., Dai Z., Yan H., King W.P., Cakmak M. and Abramson A.R., Application of the thermal flash technique for low thermal diffusivity micro/nanofibers, *Review of Scientific Instruments*, 2009.
- [9] Shen S., Henry A., Tong J., Zheng R., Chen G., Polyethylene nanofibres with very high thermal conductivities, *Nature Nanotechnology*, Vol. 5, pp. 251-255, 2010, DOI: 10.1038/NNANO.2010.27
- [10] Sabetzadeh N., Bahrambeygi H., Rabbi A., Nasouri K., Thermal conductivity of polyacrylonitrile nanofibre web in various nanofibre diameters and surface densities, *Micro & Nano Letters*, Vol. 7, Iss. 7, pp. 662-666, 2012.