

بررسی عددی عایق‌های چندلایه گرمایی با جداکننده‌های نانو الیاف کربن

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

سید عباس طالبی

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

امین بهزادمهر*

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

سمیرا پایان

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 و پیوسته بعنوان ماده جداکننده عایق‌های چند لایه گرمایی معرفی گردیده و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. انتقال گرمایی تابشی الیافها با فرض عایق ضخامت نوری ضخیم و استفاده از تقریب پخشی برای الیاف معمولی آلومینا و نانو الیاف کربن محاسبه شده است. برای مدل کردن رسانایی گرمایی مؤثر الیافها، پارامترهای مورد نیاز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای الیاف معمولی آلومینا و نانو الیاف کربن تعیین گردیده است. در نتایج به دست آمده، ضریب استهلاک نوری نانو الیاف کربن در دمای متوسط ۵۰۰ کلوین حدود ۳۱ درصد نسبت به الیاف معمولی آلومینا بیشتر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نانو الیاف کربن به عنوان جداکننده عایق چند لایه باعث بهبود عملکرد عایق می‌شود. با توجه به این افزایش عملکرد، استفاده از نانو الیاف 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 گرمایی عبوری را به کمترین مقدار برساند. بین سپرها امکان وجود گاز با رسانایی گرمایی پایین هم ممکن نیست. سپرها دارای روکش‌هایی از موادی مانند طلا و یا آلومینیوم هستند که دارای گسینندگی 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 کرلن 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 میل و همکارش [۳] یک روش تحلیلی تقریبی را برای عایق‌های چندلایه به کار برداشت 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 نظری 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 جون 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 فضای 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

*نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: amin.behzadmehr@eng.usb.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۱۱

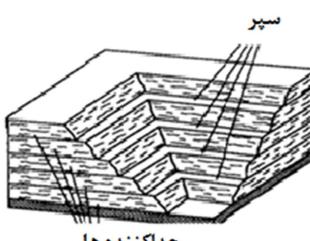
آن پرداختند. آن‌ها اصطلاح عایق گرمایی چند لایه خلاه‌دار را به کار بردن و از مواد فایبر گلاس و سلولز به عنوان جداکننده استفاده نمودند. میلن و همکارش به این نتیجه رسیدند که عایق‌های چندلایه دارای عملکرد بهتری نسبت به عایق‌های دیگر هستند. در سال ۱۹۹۲ کلر و همکاران [۴] به بررسی عایق‌های چند لایه دما بالا پرداختند. آن‌ها در ترکیب انتقال گرمایی 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 دریابیگی و همکاران [۵] عایق‌های چند لایه دما بالا، در دماهای بین ۳۰۰ تا ۱۳۰۰ کلوین را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از مدل دو شار با فرض پراکندگی غیر همسان و محیط حاکستری، برای حل معادلات مربوط به تابش استفاده کردند. آن‌ها از طلا به عنوان روکش سپرها و از الیاف آلومینا با نقطه‌ی ذوب بالای ۲۰۰۰ کلوین 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 ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ کلوین 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- نانوالیاف‌ها

الیاف‌ها دارای قطرهای کوچکی نسبت به طول شان 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 ماده‌ی الیاف‌ها، قطر الیاف‌ها، چگالی محیط متخلخل، تعداد و اندازه منفذهای 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 گفتنه 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

جدب و پراکندگی تابش در بین مواد الیافی به پارامترهای از



شکل ۱- نمایی از عایق چند لایه حرارتی

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

۴- مدل فیزیکی و معادلات حاکم

دو نمونه مطابق شکل شماره ۳ به عنوان مدل فیزیکی مورد بحث

^۱Saffil

جدول ۱- مشخصات نمونه عایق ۱ و ۲ دما بالا

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

۱-۴- معادلات حاکم

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

رسانایی گرمایی گاز در فضاهای خالی محیط متخلخل با ضربت 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 [۱۲].

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

که ضرایب φ و θ 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 بین نادسن می‌باشد.

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

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

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

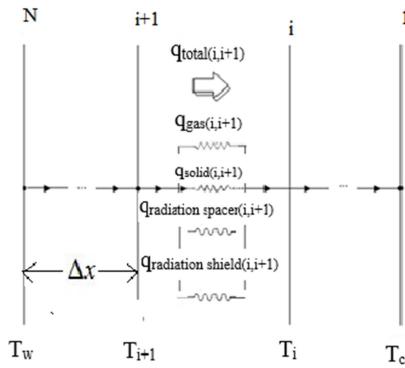
طول مشخصه برای الیافها به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

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

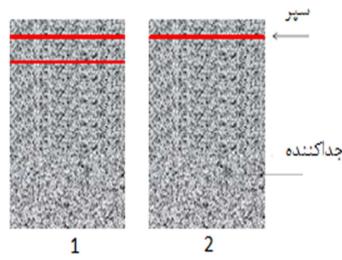
جدول ۲- مقادیر ثابت φ و θ

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

مد نظر قرار گرفته است. در مدل اول مسئله 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 $152/4 \times 152/4 \times 0.104 \text{ mm}$ جنس الیاف آلومینیم با میانگین قطر الیافی $10 \times 3 \times 6$ متر است. در کار حاضر از نانو الیاف کربن با میانگین قطر 900 nm نامن متر 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 متخال به صورت تصادفی می‌باشد.



شکل ۲- سازوکار انتقال گرمایی 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 273 K کلوین ثابت می‌ماند و دمای مرزی گرم در آزمایش‌های مختلف تغییر می‌کند. در مدل دوم مسئله جهت بررسی امکان استفاده از جداکننده نانو الیاف کربن در عایق دما پایین از عایقی که دارای $30 \text{ m}\lambda$ با فاصله $0.1/3 \text{ m}$ می‌باشد. در موز گرم با دمای 20 K کلوین و در موز گرم با دمای 300 K کلوین، استفاده شده است. در عایق دما پایین ماده‌ی جداکننده‌ها از جنس ماده‌ی پلی اتیلن ترفات 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 معادله گرما به صورت معادلات انتگرالی- دیفرانسیلی می باشد که حل آن مشکل می باشد. به همین دلیل با تقریب ها و فرضیاتی، مسئله را می توان ساده تر نمود. در بررسی های انجام شده عایق های چند لایه از ترفندهای مختلف در حل انتقال گرما تابش جدا کننده ها استفاده شده است. بررسی انتقال گرما تابش جدا کننده ها به روش های 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 مسئله بررسی شده است.

در محیط های دارای ضخامت نوری ضخیم، انتقال گرما تابش جدا کننده ها را می توان به صورت رسانش فرض نمود [۱۶]. ضخامت نوری، توانایی محیط در تضعیف کردن تابش عبوری را می رساند. هر چه ضخامت نوری بزرگ تر 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 می شود، در مقادیر خیلی بزرگ تر از یک، آن قدر جذب محیط زیاد می شود که تمام تابش ورودی را قبل از خروج در ضخامتی کمتر از ضخامت محیط جذب می کند. در ضخامت های نوری کم، جذب تابش در ضخامت های خیلی بزرگ تر از ضخامت محیط انجام می شود و جذب تابش در ضخامت محیط بسیار دارای مقدار ناچیزی می باشد.

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

که ρ, e, L به ترتیب چگالی جدا کننده ها، ضریب استهلاک نوری ویژه و ضخامت جدا کننده ها می باشد. با ضخامت نوری خیلی بزرگ تر از یک، انتقال گرمای تابشی را می توان 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 می آید و با قسمت انتقال گرمای رسانش جمع می شود و به صورت رابطه (۱۵) بیان می شود.

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

رسانایی گرمایی معادله گرما شامل رسانایی گرمایی ناشی از تابش جدا کننده ها هم می شود که این در رابطه (۱۶) بیان شده است.

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

محققان رسانایی گرمایی ناشی از تابش محیط متخلخل الیاف ها را به شکل های مختلف تعریف نموده اند که شکل کلی آن در رابطه (۱۷) نشان داده شده است.

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

که f_v شعاع الیاف، f_v^3 کسر حجمی الیاف ها و T_{me} دمای میانگین عایق الیافی می باشد [۱۸].

ضریب تناسب، پارامتری می باشد که استهلاک انتقال گرمای تابش را بیان می کند. 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 لایه ها با فرض ضخامت نوری ضخیم و

قطر برخورد گاز برای گازهای نیتروژن و هوا در مراجع آورده شده است که برای نیتروژن دارای مقدار $10^{-10} \times 3789$ متر می باشد و تغییرات بسیار ناچیزی با دما دارد [۱۴]. رسانایی گرمایی گاز در عایق دما پایین توسط رابطه (۵) مطرح می شود [۲۳].

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

در روابط ذکر شده α ، ضریب تطبیق حرارتی بین گاز و سطوح جامد می باشد و بیانگر درصد مولکول های گاز مجاور سطح جامد می باشد که با سطح جامد به تعادل حرارتی رسیده است. مقدار آن برای گازهای مختلف و سطوح مختلفی که گاز با آن در ارتباط می باشد، مختلف می باشد. مقدار C_1 توسط رابطه (۶) محاسبه می شود. P به ترتیب فشار و وزن مولکولی گاز می باشد.

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

نسبت گرمای ویژه گاز در فشار ثابت به حجم ثابت می باشد برای مدل سازی رسانایی گرمایی در عایق دما بالا و الیاف غیرصلب به عنوان جدا کننده رابطه تجربی (۷) پیشنهاد می شود [۷].

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

یک ضریب تجربی می باشد و با استفاده از آزمایش و یا تخمین پارامتر با استفاده از داده های آزمایشگاهی به دست می آید. رسانایی گرمایی ماده اصلی جدا کننده ها در حالت پیوسته و همگن می باشد

برای مدل سازی رسانایی گرمایی جدا کننده ها برای عایق دما پایین با الیاف صلب رابطه تجربی (۱۳-۴) پیشنهاد می شود [۶].

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

که در آن، k_1 رسانایی گرمایی ماده جدا کننده ها می باشد که به دما بستگی دارد. رابطه (۹) رابطه پیشنهادی برای رسانایی گرمایی الیاف داکرون می باشد که برای جدا کننده های عایق چند لایه دما پایین به کار می رود.

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

ضریب C_2 که به صورت تجربی به دست می آید، توسط رابطه (۱۰) برای الیاف داکرون محاسبه می شود [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 آن ها یک جدا کننده وجود دارد توسط رابطه (۱۱) محاسبه می شود [۱۵]. رابطه (۱۱) به صورت رسانایی گرمایی در رابطه (۱۲) آورده شده است.

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

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

جدا کننده های عایق در صورت کدر بودن، روی انتقال گرمای عبوری عایق تأثیر می گذارند و انتقال گرما را جذب و یا پراکننده می

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

رسانایی گرمایی مؤثر کل عایق چند لایه به صورت رابطه (۲۵) به دست می آید که L ضخامت کل عایق می باشد [۵].

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

۵- تعیین پارامترهای مجھول رسانایی های 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 وسیله‌ی داده‌های آزمایشگاهی می باشد که این کار برای الیاف معمولی آلومنیا و نانو الیاف کربن انجام شده است.

۵-۱- تعیین پارامترهای مجھول رسانایی های گرمایی الیاف آلومنیا

در این بخش برای الیاف معمولی آلومنیا، این ضرایب تخمین زده می شود. رسانایی گرمایی مؤثر در این بخش مجموع رسانایی گرمایی جامد، گاز و جذب تابش عایق می باشد. داده‌های آزمایشگاهی عایق های الیافی با الیاف آلومنیا در حالت پایا در سه چگالی 48 kg/m^3 , 24 kg/m^3 , 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 می باشد. مقادیر چگالی، ضخامت و کسر جامد نمونه های آزمایشگاهی در جدول ۴ آمده است [۱۱].

جدول ۴- مشخصات نمونه های عایق آلومنیا در مرجع [۱۱]

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

جدول ۵- مشخصات الیاف آلومنیا

نحوه قرار گیری الیافها	چگالی ماده آلومنیا (kg/m^2)	متوسط قطر الیاف آلومنیا (m)
تصادفی	۳۳۱۵	۳×۱۰-۶

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

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

$$e = a + bT$$

که n ضریب شکست نور و e ضریب استهلاک نور ویژه می باشد که به صورت تابعی از دما در نظر گرفته می شود. این ضریب مجموع ضریب های جذب و پراکندگی محیط تقسیم بر چگالی تعریف می شود. مقدار ضرایب مجھول e به صورت تجربی و یا با استفاده از روش تخمین پارامتر از داده های آزمایشگاهی یافت می شود.

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

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

شار گرمایی کل در هر لایه توسط رابطه (۱۹) به دست می آید که رسانایی گرمایی کل شامل رسانش گاز و جامد، تابش بین سپرها و جذب جدا کننده ها می باشد.

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

$$k_t(i:i+1) = \quad (20)$$

$$k_s-g(i:i+1) + k_{\text{Rshield}}(i:i+1) + k_{\text{Rspacer}}(i:i+1)$$

که در رابطه (۲۰)، k_s-g معادل رسانایی گرمایی جامد و گاز می باشد که در مسئله حاضر از مدل موادی طبق رابطه (۲۱) با ضریب $f=0/5$ استفاده شده است.

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

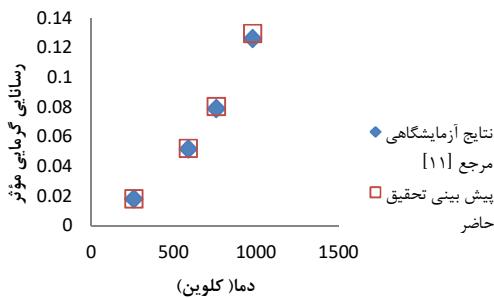
مقاومت گرمایی معادل در هر لایه توسط رابطه (۲۲) به دست می آید.

$$RE_{t(i:i+1)} = \frac{\Delta x(i:i+1)}{k_t(i:i+1)} \quad (22)$$

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

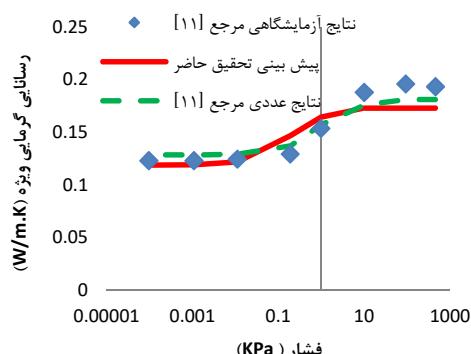
$$RE_{\text{TOTAL}} = \sum_1^N RE_{t(i:i+1)} \quad (23)$$

با توجه به این که مسئله حاضر با فرض حالت پایا می باشد، شار گرمایی کل از یک لایه به لایه بعدی ثابت می ماند و از رابطه (۲۴) به دست می آید.



شکل ۴- اعتبارسنجی رسانایی گرمایی پیش‌بینی شده از تخمین پارامتر برای عایق آلومینا با ضخامت ۳۹/۳ میلی متر-چگالی ۲۴- فشار ۰/۱۳۴ پاسکال

در نمودار شکل ۵ اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده از تخمین 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 می‌باشد که قابل قبول می‌باشد.



شکل ۵- اعتبارسنجی رسانایی گرمایی پیش‌بینی 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

همان‌طور که در نمودارهای بالا مشاهده شد، خطاهای بین مقادیر پیش‌بینی شده از تخمین پارامتر با نتایج آزمایشگاهی دارای دقت‌های قابل قبولی می‌باشد و تخمین پارامتر با فرض ضخامت نوری ضخیم دارای اعتبار و می‌توان برای نانوالیاف کربن به کار برد.

۲-۵- تعیین پارامترهای مجھول رسانایی‌های گرمایی نانوالیاف کربن

از آن جا که در این تحقیق قصد بر این است که رفتار نانوالیاف‌ها بر روی عایق بررسی شود، نیاز به رسانایی‌های گرمایی انتقال گرمای نانوالیاف‌ها می‌باشد. محیط مخلخل نانوالیاف‌ها همانند الیاف معمولی آلومینا متشكل از سه مکانیزم انتقال گرمای تابش، رسانش گاز و رسانش جامد (الیاف‌ها) می‌باشد و این سه مکانیزم انتقال گرمای تحت تأثیر محیط مخلخل نانوالیاف‌ها می‌باشد. برای مدل کردن رسانایی گرمای مؤثر نانوالیاف‌ها، از داده‌های آزمایشگاهی نانوالیاف کربن [۱۷] استفاده

نسبت کسر جامد، همان‌طور که در فصل‌های گذشته بیان شد، نسبت چگالی عایق به چگالی ماده الیاف می‌باشد. در جدول ۵ مشخصات الیاف آلومینا نشان داده شده است.

رابطه ضریب استهلاک نوری ویژه با دما یکتابع 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 پیش‌بینی شده از مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد که به صورت رابطه (۲۶) تعریف می‌شود.

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

که می‌تعداد داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد که جهت روش تخمین پارامتر مورد استفاده قرار گرفته است و S مجموع مربع خطاهای رسانایی گرمایی آزمایشگاهی و پیش‌بینی می‌باشد.

جدول ۶- پارامترهای تخمین زده شده‌ی رسانایی گرمایی مؤثر آلومینا

a	b	m
۵۷/۳۲	۰/۰۰۸۵۷	۱/۳۲۳

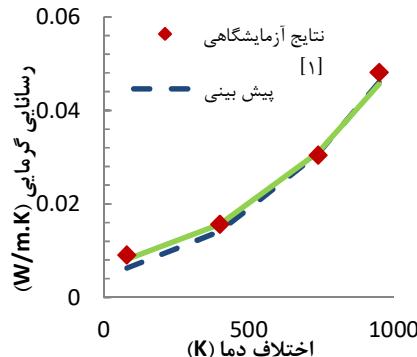
جدول ۷- خطای تخمین پارامترهای رسانایی گرمایی مؤثر آلومینا

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

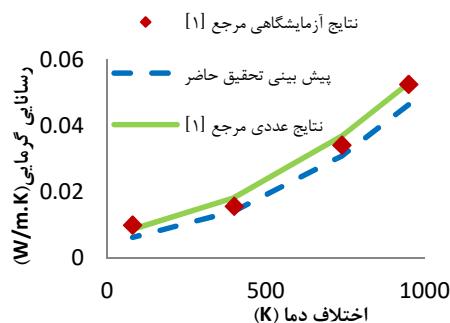
نتایج به دست آمده از کد محاسباتی با داده‌های آزمایشگاهی و عددی مرجع [۱۱] اعتبارسنجی شده است. این اعتبارسنجی در اختلاف دما، چگالی و فشارهای مختلف انجام شده است. در نمودار شکل ۴ اعتبارسنجی مقادیر نتایج پیش‌بینی شده تخمین پارامتر با نتایج آزمایشگاهی برای نمونه با چگالی ۲۴ kg/m³ نشان داده شده است که دارای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

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

در اعتبارسنجی‌های دو نمودار قبل، در اختلاف دماهای پایین مرزی خطاهای 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 کیلوپاسکال 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 آلومینیا، مورد مقایسه قرار گرفته است.

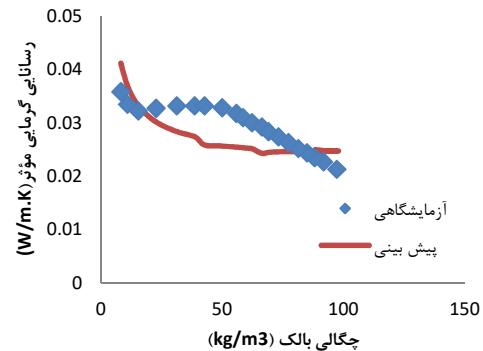
در نمودار شکل ۶ مقایسه نتایج پیش‌بینی شده‌ی رسانایی گرمایی مؤثر نانوالیاف کربن با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۷] آن نشان داده شده است که دارای میانگین خطای ۹/۶٪ می‌باشد که دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.

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

پارامتر	مدل موازی تخمینی نانوالیاف کربن	مدل موازی تخمینی آلومینیا
a	۳۲/۳۹۹	۵۷/۳۴
b	۰/۰۹۶۸	۰/۰۰۸۵۷
m	۸/۲۰۵	۱/۳۲۳
S	$۳/۰۶ \times 10^{-4}$	$۷/۹۶ \times 10^{-4}$
RMS	$۳/۹۰ \times 10^{-3}$	$۵/۵۳ \times 10^{-3}$

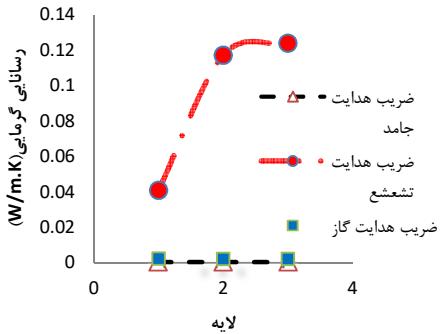
۶- اعتبارسنجی عایق چند لایه گرمایی

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 دماهای پایین که مقدار رسانایی گرمایی بسیار کم می‌باشد و خطای در آن کمی زیاد می‌شود، در دیگر اختلاف دماهای میانگین خطای حدود ۵ درصد می‌باشد و با مجموع خطای اختلاف دماهای کم حدود ۱۱ درصد می‌شود.

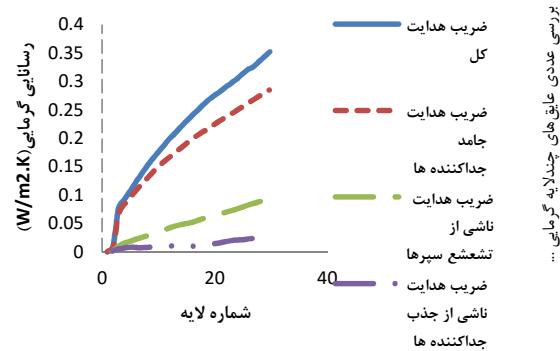


شکل ۶- رسانایی گرمایی مؤثر پیش‌بینی شده نانوالیاف کربن و نتایج آزمایشگاهی مرجع [۷]

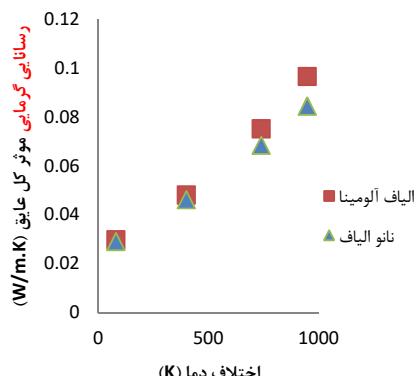
در نمودار شکل ۸ رسانایی‌های گرمایی مؤثر کل عایق نمونه شماره‌ی دو در اختلاف دماهای مختلف و فشار ۰/۰۱۳ کیلو پاسکال با نتایج تجربی و عددی مرجع [۵] مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی دارای میانگین خطای حدود ۱۰٪ می‌باشد.



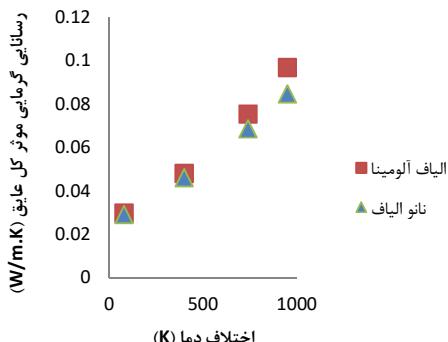
شکل ۱۱- رسانایی گرمایی عایق نمونه شماره ۱ با فشار گاز ۱۳ پاسکال



شکل ۹- مقادیر رسانایی گرمایی عایق دما پایین با جداکننده پلی اتیلن ترفلات و سپر آلمینیومی



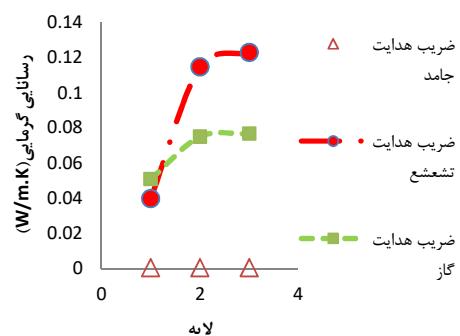
شکل ۱۲- رسانایی گرمایی مؤثر عایق با دو جداکننده آلمینیا با قطر در حد میکرو و نانوالياف کربن برای نمونه شماره ۱ با فشار گاز ۱۳/۳ کیلو پاسکال



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

نانوالياف کربن در فشار ۱۳/۳ کیلو پاسکالی نشان داده شده است که رسانایی گرمایی مؤثر نانوالياف در اختلاف دمای متری مختلف، دارای مقدار کمتری نسبت به الیاف معمولی آلمینیا میباشد و دلیل آن همانطور که ذکر شد، تأثیر مؤثر نانواليافها در جذب انتقال گرمای تابش میباشد. ضریب استهلاک نوری نانوالياف کربن در مقایسه با

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 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 مقادیر 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 نانوالياف کربن که دارای جذب بالا از انتقال گرمای 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 گرمای عایق نمونه شماره ۱ با فشار ۱۳/۳ کیلو پاسکال

در شکل های ۱۲ و ۱۳ برای نمونه های شماره یک و دو رساناییهای گرمایی مؤثر عایق چند لایه برای الیاف معمولی آلمینیا و

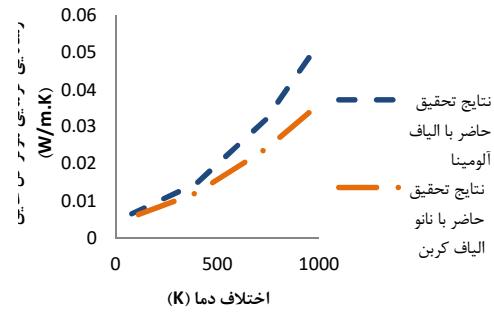
۸- نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی عددی عایق‌های چند لایه گرمایی با جداکننده‌های الیاف 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 پایین‌گازی 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 جداکننده‌ای 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 کل‌کمتری نسبت به عایق چند لایه با آلومینیا (به عنوان جداکننده) می‌باشد و مسلماً با پایین بودن رسانایی گرمایی مؤثر عملکرد عایق بهبود می‌یابد.

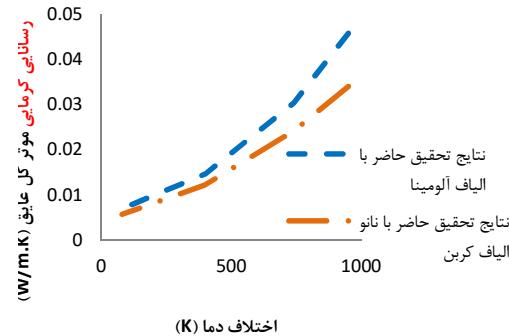
الیاف آلومینیا در دمای متوسط ۵۰۰ کلوین حدود ۳۱ درصد بیشتر می‌باشد و این افزایش ضریب استهلاک نوری، عملکرد عایق چند لایه دما بالا را بهبود می‌بخشد. در دو نمودار شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نتایج عددی مقایسه‌ی نانوالیاف با الیاف معمولی آلومینیا برای دو نمودارهای مقایسه‌پایین ۰/۰۱۳ کیلوپاسکال نشان داده شده است. در نمودارهای مقایسه‌ی دو الیاف آلومینیا 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 آلومینیا کاهش دارد. نکته قابل توجه در نمودارهای مقایسه نانو الیاف کربن و الیاف آلومینیا 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 ضعیف نماید، مطمئناً عملکرد بهتری خواهد داشت، پس طبق نتایج نانو الیاف کربن نسبت به الیاف آلومینیا به عنوان جداکننده عایق دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

۹- فهرست عالیم

سطح سپرها (m^2)	A
قطر الیافها (m)	D_f
قطر برخورد گاز (m)	d_g
ضریب استهلاک نوری ویژه (m^2/kg)	e
تراکم نسبی جداکننده در مقایسه با ماده	f
کسر حجمی الیافها	f_v
رسانایی گرمایی در حالت پیوسته و همگن ($W/m.K$)	k
ضخامت عایق (m)	L
طول فیزیکی (m)	L_c
شار گرمایی (W/m^2)	q
مقاومت گرمایی ($m^2 K/W$)	Re
خطای جذر میانگین مربعات	RMS
شعاع الیافها (m)	r
مجموع مربع خطاهای رسانایی‌های گرمایی آزمایشگاهی و پیش‌بینی	S
دما گاز (K)	T
زمان (s)	t
مختصات (m)	x
فاصله بین دو سیر (m)	Δx
علایم یونانی	α
ضریب تطبیق 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 آلومینیا و نانوالیاف کربن برای نمونه شماره ۱ با فشار گاز ۰/۰۱۳ کیلو پاسکال



شکل ۱۵. رسانایی گرمایی مؤثر عایق با جداکننده‌های آلومینیا 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 گاز بین الیافها در عایق دما بالا	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.	نسبت گرمای وینه گاز در فشار ثابت به حجم ثابت	γ
[13] Gebhart B., Heat Conduction and Mass Diffusion, <i>McGraw-Hill</i> , New York, pp. 442- 444, 1993.	مسافت آزاد میانگین مولکولی	λ
[14] Glassman I. and Harr B.I., collision diameters of some gases as functions of Temperature, <i>The journal of physical chemistry</i> , vol.56, pp.797-799, 1952.	تعداد داده‌های آزمایشگاهی تخمین پارامتر	μ
[15] Incropera, Dewitt, Bergman, Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, sixth edition, <i>Wiley</i> , 2006.	چگالی (kg/m^3)	ρ
[16] Modest M. F., Radiative Heat Transfer, <i>Mc Graw-Hill</i> , 1993.		
[17] Sparrow E.M., Cess R.D., Radiation Heat Transfer, Augmented Edition. <i>McGraw- Hill</i> , 1978.		
[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.		
[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.	ضخامت نوری جداکننده‌ها	τ
[20] Bankvall C. G., Heat Transfer in Fibrous Materials, <i>J. Test. Eval.</i> , Vol. 1,pp.235-243, 1973.	گاز	g
[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	R
[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 سطوح سپرها	R_{shield}
[23] Corruccini R. j, Gaseous heat conduction at low pressures and temperatores, <i>Journal of Vacuum</i> , Vol 7-8, April, 1959.	تابش ناشی از جذب جداکننده‌ها	R_{spacer}
	جامد	s
	جامد-گاز	$s-g$

مراجع -۱۰

- Cornell W.D.,Radiation Shield supports in Vacuum Insulated Containers, *U.S. Patent No. 2,643,022*,1947.
- Peterson,P.,Swedish Technical Research Council Report No.706,*Sartryck Ur TVF*,29,4.P.51.1958.
- 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," Moscowl, Translated from Inzhenerno-Fizicheskfi Zhurna, Vol.46, No.5, pp.754-760, May,1984.
- 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.
- Daryabeigi K., Miller S. D., Cunnington G.R., Heat transfer in high-temperature multilayer insulation, *Cryogenics*, Vol 45, pp. 221-229, 2000.
- 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
- 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.
- 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.
- 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
- 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.