

بررسی اثر قطر و جنس فیبر بر ضریب انتقال حرارت تابشی در عایق های فیبری

امین ترابی*^۱، سید محسن ایزد یار^۲

۱- دکتری، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- دکتری، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه کردستان، سنندج

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲)

چکیده

با توجه به عملکرد اثبات شده عایق های فیبری در صنایع مختلف از جمله صنایع حوزه ساخت و تولید، انرژی، هوافضا و ساختمان سازی توجه زیادی به این عایق ها در مطالعات مختلف می شود. آجرهای سرامیکی به کار برده شده بر روی سطح شاتل فضایی یکی از مشهورترین کاربردهای دما بالای عایق های فیبری است. با توجه به تخلخل بسیار بالای این عایق ها، روش اصلی انتقال حرارت در آنها زمانی که دمای کاری بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد باشد، تابشی است. در این پژوهش ضریب انتقال حرارت تابشی عایق های فیبری با استفاده از تئوری پراش غیرمتشابه (ADT) محاسبه شده است. در حقیقت تئوری پراش غیرمتشابه یکی از روش های تخمین ضریب تضعیف عایق های فیبری است. تئوری روزلند ضریب انتقال حرارت تابشی را با توجه به ضریب تضعیف تابشی محاسبه می نماید. نتایج بدست آمده از کد توسعه داده شده با نتایج مقاله دیگر مقایسه شد. در این مقاله اثر قطر فیبرها بر ضریب انتقال حرارت تابشی عایق بررسی شد. نتایج نشان می دهد که ضریب انتقال حرارت تابشی فیبرها با تغییر قطر آنها تغییر می کند و همچنین ضریب انتقال حرارت تابشی عایق سیلیکایی اگر قطر فیبر ۶ میکرومتر باشد، کمینه خواهد بود و با افزایش یا کاهش قطر فیبرها ضریب انتقال حرارت تابشی افزایش می یابد. در مورد عایق های فیبری سیلیکونی قطر فیبر ۴ میکرومتری کمترین ضریب انتقال حرارت تابشی را خواهد داشت.

واژه های کلیدی: عایق فیبری، ضریب انتقال حرارت تابشی، قطر فیبر، ضریب تضعیف تابشی

Investigating the effect of fiber diameter and type on radiative heat transfer thermal conductivity in fibrous insulations

Amin Torabi, Seyed Mohsen Izadyar

Abstract

Due to the proven performance of fibrous insulations in various industries, including manufacturing, energy, aerospace, and construction industries. These insulations were studied in several papers. Ceramic tiles used on the space shuttle are one of the most famous high temperature applications of this fibrous insulation. Due to high porosity of these insulations, the main method of heat transfer in these materials is radiation, especially when heat transfer occurred in more than 500 degrees of Celsius. Anomalous Diffraction Theory (ADT) is one of the theoretical methods to estimate extinction coefficient of fiber insulation. Roseland theory calculates the radiation heat transfer coefficient according to the radiation extinction coefficient. Results obtained from the developed code were validated with the results of other articles. In this article, the effect of fiber diameter on the radiative heat transfer coefficient is investigated. The results show that the radiant heat transfer coefficient of the fibers changes with the change of the diameter of the fibers and also the radiant heat transfer coefficient of silica insulation will be minimum if the fiber diameter is 6 micrometers, and with increasing or decreasing the fibers diameter, the radiant heat transfer coefficient will increase. In the case of silicon fiber insulation, the fiber diameter of 4 micrometers will have the lowest radiation heat transfer.

Key words: *Fibrous insulation, Radiative heat transfer coefficient, Fiber diameter, Fiber extinction coefficient*

مقدمه

عملکرد اثبات شده فیبرهای سیلیکایی در آجرهای سرامیکی شاتل فضایی باعث شد که در فضاپیماها قابل استفاده مجدد جدیدتر مانند X-37B نیز از همین آجرها استفاده شود [۱]. کاربرد عایق‌های فیبری، محدود به فضاپیماها نیست، این عایق‌ها در کوره‌هایی که تغییرات دمایی نزولی و صعودی سریع دارند و یا به منظور تولید مواد با درجه خلوص بالا استفاده می‌شوند نیز کاربرد دارد [۲].

فیبرهای سرامیکی کاربرد وسیعی در عایق‌های حرارتی مختلف از دمای کرایوژنیک تا دمای بسیار بالا دارند. کاربرد این عایق‌های متخلخل از عایق‌های ارزان ساختمانی تا عایق‌های بسیار گران استفاده شده در شاتل فضایی است. انتقال حرارت در این عایق‌ها به سه روش رسانش، همرفت و تابش است. روش انتقال حرارت همرفت در صورتی اتفاق می‌افتد که اندازه حفره‌های موجود در عایق متخلخل از مسافت آزاد حرکت ملکول‌های گاز موجود در عایق بیشتر باشد. معمولاً عایق‌های حرارتی به گونه‌ای طراحی می‌گردند که امکان حرکت هوا در آنها وجود نداشته باشد. بنابراین انتقال حرارت تابشی اصلی‌ترین روش انتقال حرارت در این عایق‌ها است که یکی از موضوعات متداول در مطالعات مختلفی است که تا به امروز به انتشار رسیده است [۳].

انتقال حرارت تابشی متأثر از خواص تابشی عایق حرارتی مانند ضریب پخش^۱، بازتاب^۲ و جذب^۳ آن است. انتقال حرارت رسانشی در عایق‌های حرارتی دما بالا و دما پایین وجود دارد. با توجه به اینکه هوا ضریب انتقال حرارت بسیار پایینی دارد عایق‌های حرارتی با تخلخل بسیار بالا تولید می‌شوند. به عنوان نمونه تخلخل آجرهای سرامیکی استفاده شده بر روی شاتل فضایی بیش از ۹۵٪ است. بنابراین این عایق‌ها وزن بسیار کمی دارند و لذا استفاده از آنها در کاربردهای هوافضایی توجیه بسیار مناسبی دارد [۴]. فیبرهای سیلیکایی با تضعیف (پخش یا جذب) انرژی تابشی، از انتقال حرارت تابشی جلوگیری می‌نمایند. ضریب تضعیف، که نشان دهنده پخش و جذب است، یک پارامتر کلیدی در مدل‌های انتقال حرارت تابشی است [۵].

پارامترهای مؤثر بر عملکرد تابشی این عایق‌ها ضریب شکست، اندازه، درصد حجمی و زاویه قرارگیری فیبرهای مورد استفاده و ضریب شکست ماتریسی است که این فیبرها درون آن قرار گرفته‌اند. ضریب تضعیف را می‌توان با مدل‌های تحلیلی و یا از روش‌های تجربی بدست آورد [۶-۹].

بر کاربردترین مدل تحلیل به منظور پیش‌بینی خواص تضعیف عایق حرارتی تئوری مای است. تئوری مای با در نظر گرفتن انرژی تابشی به صورت موج الکترومغناطیس، تضعیف انرژی تابشی در هنگام برخورد با فیبرهای شفاف با طول بی‌نهایت را محاسبه می‌نماید. از جمله معایب این تئوری می‌توان به پیچیدگی و وقت گیر بودن آن اشاره نمود. همچنین این تئوری در مورد ذرات غیرکروی محدودیت‌های زیادی دارد. به عنوان نمونه در این تئوری نمی‌توان اثر طول محدود فیبرها را در محاسبه ضریب تضعیف در نظر گرفت [۷]. یک تقریب مناسب برای نظریه مای، تئوری پراش غیرمتشابه^۴ (ADT) است که توسط ون [۱۰] معرفی شده است. این تئوری می‌تواند ضریب تضعیف ذرات کروی، غیر کروی و استوانه‌ای را با دقت قابل قبولی محاسبه نماید [۱۱].

در پژوهش حاضر از تئوری فوق جهت محاسبه ضریب تضعیف فیبرهای سیلیکایی استفاده شده است. نتایج این تئوری با نتایج حاصل از تئوری مای مقایسه شده است که این تئوری دقت بسیار بالایی را نشان می‌دهد. اثر قطر، طول، زاویه قرارگیری و خواص اپتیک فیبرها در بخش بعد بررسی شده است.

تاریخچه

مسئله انتقال حرارت تابشی در یک محیط فیبری از دهه ۱۹۷۰ تا به امروز مورد توجه بوده است. به عنوان نمونه آقای لی در سال ۲۰۰۰ مدل نظری بهبود یافته‌ای برای پیش‌بینی خواص تابشی و انتقال حرارت تابشی در عایق‌های فیبری با تخلخل بالا ارائه کرده و اعتبار آن را با بررسی نتایج آزمایشگاهی سنجیده است [۱۲].

همچنین لی در سال ۱۹۹۰ نشان داد که برخلاف ذرات کروی که تابش را به همه جهات پراکنده می‌کنند، تابش پراکنده شده توسط الیاف استوانه‌ای فقط در محدوده‌های

¹ Scattering² Reflection³ Absorption⁴ Anomalous Diffraction Theory

و در نتیجه قطر فیبر بهینه برای کمترین ضریب انتقال حرارت تابشی را می‌توان محاسبه نمود.

تئوری

تئوری پراش غیرمتشابه یک تکنیک کلی برای محاسبه ضریب تضعیف ذرات است. این تکنیک با ترکیب تقریب ریلی-دیبا با دیگر تئوری‌های پراش غیرعادی توسعه یافته است. انتخاب تئوری مناسب برای محاسبه خواص تابشی فیبرها به اندازه آنها بستگی دارد. اندازه فیبرها معمولاً با پارامتر هندسی α معرفی می‌شوند. $(\alpha = \frac{\pi d_f}{\lambda})$ که در آن d_f قطر فیبر و λ طول موج تابش فرودی است. زمانی که پارامتر هندسی فیبرها بزرگ است ($\alpha \gg 1$)، ضریب تضعیف ذرات را می‌توان به روش‌های اپتیک هندسی تقریب زد و زمانی که پارامتر هندسی فیبرها کوچک است ($\alpha \ll 1$) می‌توان از تقریب ریلی استفاده کرد. تئوری پراش غیرمتشابه با ترکیب دو تقریب فوق در یک عبارت کلی برای توصیف جذب و پراکندگی الیاف با ابعاد مختلف توسعه یافته است. ضریب شکست m خاصیتی از ماده است که بر ضریب تضعیف فیبرها تأثیر گذار است. این ضریب $(m = n - ik)$ به نوع ماده بستگی دارد و در تئوری پراش غیرمتشابه محدوده $0 \leq n \leq 3$ و $k \leq 2$ برای آن قابل پذیرش است. بخش حقیقی m میزان پخش و بخش موهومی آن میزان جذب ماده را تعیین می‌نماید [۱۰].

لیو ضریب تضعیف فیبرهای به طول محدود را از رابطه (۱) محاسبه نمود:

$$Q_{ext.large} = Q_{ad} + \frac{Q_{ad}}{2 + \frac{1}{c_1(Q_{ad} + 1)}} \quad (1)$$

که در آن $c_1 = |m - 1|$ ، Q_{ad} رابطه استاندارد ضریب تضعیف فیبر به طول بینهایت در تئوری پراش غیرمتشابه و Q_{edge} اثر لبه فیبر به طول محدود بر ضریب تضعیف کل است [۲۰].

$$Q_{edge} = \frac{4c_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\chi) d\chi + 2c_0}{(\alpha r_f \sin \theta)^{\frac{2}{3}} [2 + \pi \left(\frac{r_f}{L}\right) \cot \theta]} \quad (2)$$

زاویه‌ای محدود منتشر می‌شود. از اینرو، حداکثر مقدار پراکندگی توسط مجموعه‌ای از الیاف به جهت گیری الیاف نسبت به جهت تابش بستگی دارد [۱۳].

میلاندردی در سال ۲۰۰۲ یک روش عددی جدید توسعه داده است، که قادر به شبیه سازی انتقال حرارت در عایق‌های نامتقارن محوری است. با استفاده از این مدل می‌توان اثرات توزیع الیاف و تغییرات دما را بر رفتار حرارتی عایق‌های فیبری نشان داد. مدل به دست آمده به خواص اپتیک، پارامترهای هندسی و چگالی عایق حرارتی بستگی دارد [۱۴].

تانگ ۶ روش مختلف پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت تابشی را جمع بندی و ارائه نموده است و مدلی برای پیش بینی شار حرارتی تابشی در عایق‌های فیبری سبک وزن به روش دو شار و پراکندگی ناهمسانگرد ارائه نموده است [۱۵].

ژاو یک مدل عددی ترکیبی از انتقال حرارت تابشی و رسانشی برای تخمین ضریب انتقال حرارت مؤثر عایق فیبری در دما و فشارهای مختلف توسعه داد. ضریب تضعیف روزلند به روش تجربی و در دماهای مختلف برای محاسبه انتقال حرارت تشعشی در عایق فیبری به دست آمد. داده‌های عددی و تجربی با هم مقایسه شدند [۱۶].

ترابی یک مدل تقریبی به منظور محاسبه انتقال حرارت تابشی در عایق‌های حرارتی چند لایه توسعه داد و نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود [۱۷].

یکی از روش‌های اندازه گیری ضریب تضعیف استفاده از قانون بیپر و ضریب تضعیف در طیف‌های طول موج مختلف است. ژاو در سال ۲۰۰۷ خواص انتقال حرارت در عایق‌های فیبری آلومینایی را به همین روش بررسی نمود و ضریب تضعیف روزلند را دمای مختلف محاسبه نمود [۱۸].

در سال ۲۰۲۳ اثر درصد حجمی و مشخصات هندسی فیبرها و زاویه قرار گیری آنها بر انتقال حرارت در عایق حرارتی بررسی شد. در این مطالعه از تئوری مای به منظور تخمین ضریب تضعیف فیبرهای سیلیکایی استفاده شده است [۱۹].

قطر فیبر بر انتقال حرارت تابشی در عایق‌های فیبری تأثیرگذار است. این موضوع از نتایج بدست آمده از پژوهش‌های آقای لی قابل برداشت است. تا به حال اثر قطر فیبر بر ضریب انتقال حرارت تابشی عایق‌های فیبری در دمای کاری مختلف، بررسی نشده است. در این پژوهش برای اولین بار از تئوری پراش غیرمتشابه به منظور انجام تحلیل فوق استفاده شده است

ضریب تضعیف عایق فیبری (مجموعه‌ای از فیبرها) در هر طول موج (β_λ) را می‌توان از طریق رابطه (۸) محاسبه نمود:

$$\beta_{f\lambda} = \frac{4f_v}{\pi d_f} \int_0^{\pi/2} Q_{ext}(\phi) \cos \phi d\phi \quad (۸)$$

که f_v درصد حجمی فیبر در عایق حرارتی است

[Error! Reference source not found.]

ضریب تضعیف روزلند میانگین ($\beta(T)$) با انتگرال گیری از رابطه فوق در محدوده کاملی از طول موج محاسبه می‌شود. با توجه به این موضوع که بیش از ۸۰٪ انرژی تابشی در محدوده طول موج ۰/۵ الی ۲۵ میکرومتر در دمای کمتر از ۱۰۰۰ درجه کلوین است، ضریب تضعیف میانگین را می‌توان از طریق رابطه (۹) محاسبه نمود.

$$\frac{1}{\beta(T)} = \frac{\int_0^\infty \frac{1}{\beta_\lambda} \frac{\partial E_{b\lambda}}{\partial T} d\lambda}{\int_0^\infty \frac{1}{\beta_\lambda} \frac{\partial E_b}{\partial T} d\lambda} = \int_0^\infty \frac{1}{\beta_\lambda} \frac{\partial E_{b\lambda}}{\partial E_b} d\lambda \quad (۹)$$

$$\approx \int_{0.5\mu m}^{25\mu m} \frac{1}{\beta_\lambda} \frac{\partial E_{b\lambda}}{\partial E_b} d\lambda$$

که در رابطه فوق $E_{b\lambda}$ قدرت تابش جسم سیاه طیفی ارائه شده توسط قانون پلانک است و E_b انتگرال $E_{b\lambda}$ در طول محدوده طول موج ۰/۵ الی ۲۵ میکرومتر است. توجه شود که در رابطه (۹) ضریب تضعیف میانگین تابعی از دما است.

$$E_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1 \right)} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰) h ثابت پلانک، K ثابت بولتزمن و c سرعت نور می‌باشد.

$$h = 6.62607015e^{-34} \text{ (Joul.s)}$$

$$K = 1.380649e^{-23} \text{ (Joul/Kelvin)}$$

$$c = 299702547 \text{ (meter/sec)}$$

با استفاده از تئوری روزلند (رابطه (۱۱))، مقدار ضریب انتقال حرارت تابشی از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [۲۱].

$$f(\chi) = \left(\frac{r_f}{L} \right) \left\{ (\cos^2 \theta \cos^2 \chi + \sin^2 \chi)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\cos^2 \chi}{\sin^2 \theta} + \sin^2 \chi \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

که در رابطه (۲) شعاع فیبر، L طول فیبر و θ زاویه بین شعاع نور تابیده شده بر فیبر و محور فیبر است و C_0 تابعی از ضریب شکست نور است که تقریباً برابر با ۰/۹۹۶۱۹۳ است [۱۱].
 Q_{ad} که رابطه استاندارد تئوری پراش غیرمتشابه برای فیبرهایی به طول بی‌نهایت است، به صورت رابطه (۳) است.

$$Q_{ad} = 2Re \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} [1 - e^{-i\rho^* \cos \gamma}] \cos \gamma d\gamma \right\} \quad (۳)$$

در رابطه فوق عملگر Re مقدار حقیقی عدد مختلط و $\rho^* = 2(m-1)\alpha / \sin \theta$ است.

ضریب تضعیف فیبرهای با قطر بسیار کوچک از طریق تقریب ریلی و رابطه (۴-۶) محاسبه می‌شود.

$$Q_{ext.small} = Q_{sca.small} + Q_{abs.small} \quad (۴)$$

$$Q_{sca.small} = \frac{\pi^2}{8} \alpha^3 \left(|m^2 - 1|^2 + 4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 \right) \quad (۵)$$

$$Q_{abs.small} = -\frac{\pi\alpha}{2} Im \left(\left(\frac{m^2 - 1}{2} \right) + \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right)^2 \right) \quad (۶)$$

در رابطه (۶) عملگر Im مقدار موهومی عدد مختلط است و $Q_{sca.small}$ و $Q_{abs.small}$ به ترتیب ضریب جذب و پخش فیبرهای با قطر کوچک هستند. ضریب تضعیف فیبرها از طریق رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$Q_{ext} = \frac{(Q_{ext.small} + c_1 Q_{sca.small}^{c_2}) Q_{ext.large}}{(Q_{sca.small} + c_1 Q_{sca.small}^{c_2}) + Q_{ext.large}} \quad (۷)$$

که در آن $c_2 = 2^{|m-1|}$

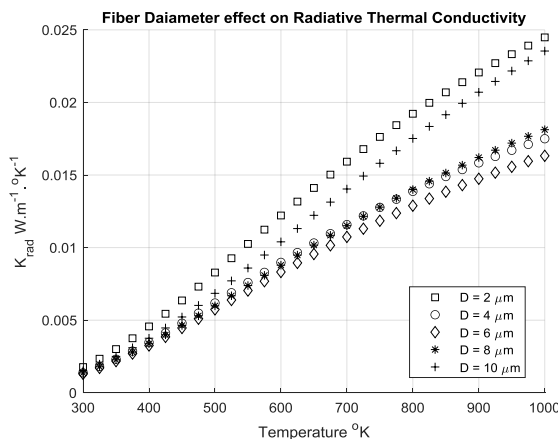
نتایج

به منظور بررسی اثر قطر فیبرها بر ضریب انتقال حرارت تابشی، در مرحله اول باید جنس فیبر را مشخص نمود. با توجه به معادلات ارائه شده در بخش تئوری مشخص است که ضریب شکست نور فیبر خاصیتی از ماده است که بر خواص انتقال حرارت تابشی ماده تأثیرگذار است. طول موج انرژی تابشی تابیده شده بر ماده بر ضریب شکست آن تأثیرگذار است. شکل ۲ نشان دهنده ضریب شکست فیبرهای سیلیکایی ارائه شده در مرجع [۲۲] است.

با فرض ضریب شکست فوق برای فیبرهای سیلیکایی و زاویه ۹۰ درجه بین شعاع نور و فیبر، اثر قطر فیبر بر ضریب انتقال حرارت تابشی در شکل ۳ بررسی شده است.

با توجه به شکل ۳ مشخص است که ضریب انتقال حرارت تابشی عایق حرارتی با فیبرهای به قطر ۲ میکرومتر از $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ تا $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ۰/۰۰۱۵ در محدوده دمای محیط (۳۰۰ درجه کلوین) تا ۰/۰۲۴۵ در محدوده ۱۰۰۰ درجه کلوین افزایش می‌یابد. افزایش ضریب انتقال حرارت تابشی نشان دهنده دلیل افزایش اهمیت مکانیزم انتقال حرارت تابشی در این محدوده دمایی است.

همانگونه که در شکل ۳ مشخص است، با افزایش قطر فیبر از ۲ میکرومتر تا ۱۰ میکرومتر، ابتدا ضریب انتقال حرارت تابشی آن تا ۵۰٪ کاهش و سپس افزایش می‌یابد. کمترین ضریب انتقال حرارت تابشی در قطر فیبر ۶ میکرومتر رخ می‌دهد.

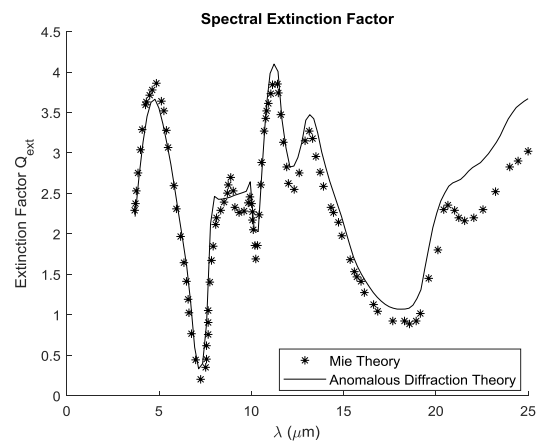


شکل ۲ - بررسی اثر قطر فیبرهای سیلیکایی بر ضریب انتقال حرارت تابشی $f_v = 0.02$

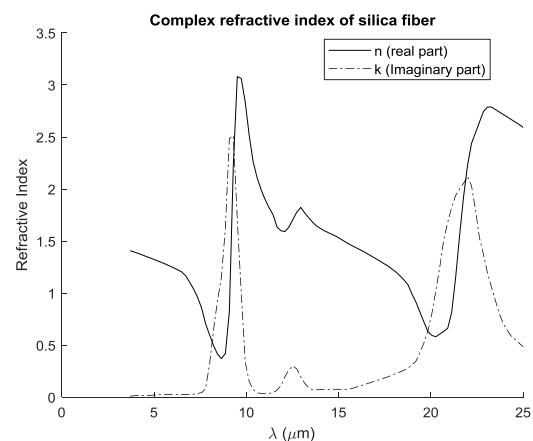
$$K_{rad} = \frac{16\sigma T^3}{3\beta(T)} \quad (11)$$

صحه گذاری نتایج

به منظور بررسی صحت نتایج، ضریب تضعیف محاسبه شده به روش پراش غیرممتشابه با نتایج حاصل از تئوری مپه ارائه شده در مرجع [۲۲] مقایسه شده است. شکل ۱ نشان می‌دهد که کد توسعه یافته شده با دقت بسیار بالایی می‌تواند ضریب تضعیف و در نهایت ضریب انتقال حرارت تابشی عایق حرارتی را پیش بینی نماید.

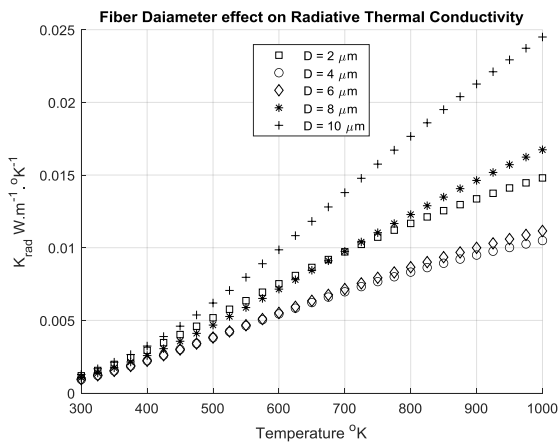


شکل ۱ - مقایسه نتایج تئوری مای ارائه شده در مرجع [۲۲] با نتایج مطالعه حاضر



شکل ۱ - ضریب شکست نور در فیبرهای سیلیکایی [۲۲]

همانطور که در جدول ۱ ارائه شده است، بیشترین ضریب انتقال حرارت تابشی در عایق حرارتی به قطر فیبر ۱۰ میکرومتر رخ می‌دهد و ضریب انتقال حرارت تابشی در حالتی که قطر فیبر ۶ میکرومتر باشد، با عایق حرارتی به قطر فیبر ۴ میکرومتر یکسان است.



شکل ۴- بررسی اثر قطر فیبر بر ضریب انتقال حرارت تابشی
فیبرهای سیلیکونی $f_v = 0.02$

جدول ۱- مقایسه درصد تفاوت ضریب انتقال حرارت تابشی با عایق حرارتی به قطر ۴ میکرومتر

قطر فیبر دما	۲ μm	۶ μm	۸ μm	۱۰ μm
۴۰۰ کلوین	۳۲	۰	۱۵	۴۵
۶۰۰ کلوین	۳۸	۱	۳۱	۸۱
۸۰۰ کلوین	۴۰	۴	۴۸	۱۱۲
۹۰۰ کلوین	۴۰	۵	۵۴	۱۲۴
۱۰۰۰ کلوین	۴۱	۶	۶۰	۱۳۳

بررسی اثر زاویه قرار گیری فیبر

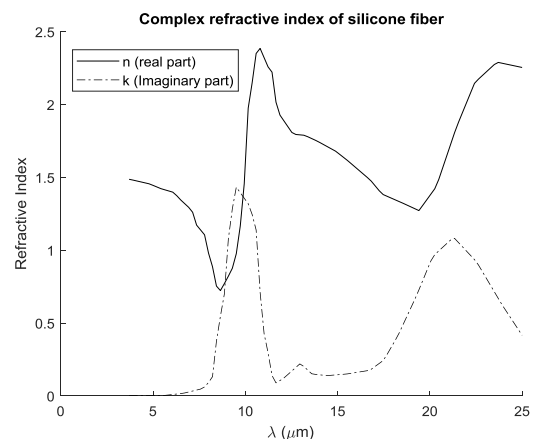
تا به این مرحله فرض بر این بود که فیبرها عمود بر شعاع نور تابیده شده هستند. با تغییر زاویه قرار گیری فیبر، میزان انرژی تابیده شده تغییر خواهد کرد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، شعاع نور پخش شده بر روی سطح مخروطی قرار می‌گیرد که زاویه رأس آن دو برابر زاویه بین شعاع نور تابیده شده و فیبر است [۲۳].

همانطور که پیشتر بیان شد، اندازه فیبرها بر انتخاب تئوری مناسب برای تخمین ضرایب تضعیف ذرات تأثیر گذار است. با توجه به رابطه (۵) در شرایطی که قطر فیبرها کوچک باشند، ضریب پخش عایق‌های فیبری با مکعب قطر فیبر مرتبط است. بنابراین مطابق با رابطه (۸) ضریب تضعیف عایق فیبری با مربع قطر فیبر مرتبط است. ولی با توجه به روابط (۳) و (۸) در صورتی که اندازه فیبرها بزرگتر شود، ارتباط قطر فیبرها با ضریب تضعیف عایق فیبری متناسب با $\frac{Re(e^{-id_f})}{d_f}$ خواهد بود که یک تابع نزولی است. با توجه به تئوری روزلند (رابطه (۱۱))، ضریب انتقال حرارت تابشی نسبت معکوس با ضریب تضعیف عایق فیبری دارد و در نتیجه قاعدتا با افزایش قطر فیبر از ۲ تا ۶ میکرومتر ضریب انتقال حرارت تابشی کاهش و سپس با افزایش بیشتر آن افزایش می‌یابد.

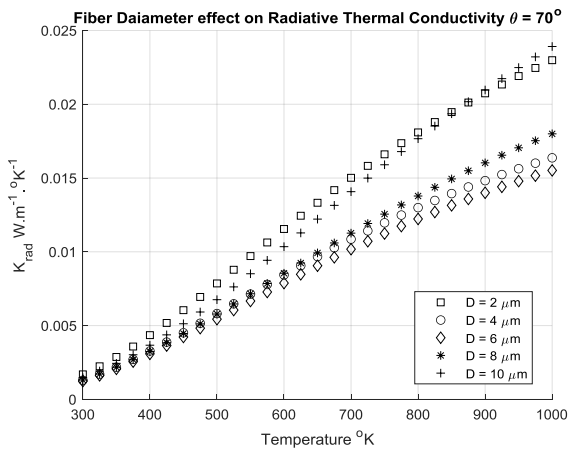
بررسی اثر تغییر جنس فیبر

ضریب شکست فیبرهای سیلیکونی در مرجع [۲۳] ارائه شده است. به منظور بررسی اثر جنس فیبر، اثر قطر فیبر بر ضریب انتقال حرارتی تابشی، مجدداً بر اساس ضریب شکست ارائه شده در شکل ۴ بررسی شده است.

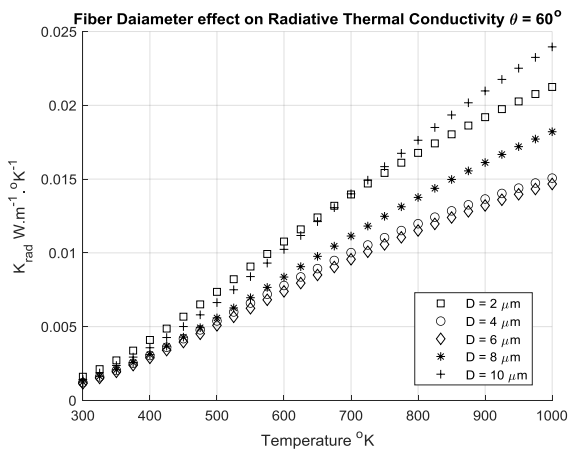
با توجه به شکل ۵ کمترین ضریب انتقال تابشی در مورد فیبرهای سیلیکونی زمانی رخ می‌دهد که قطر فیبرها برابر ۴ میکرومتر باشد. با افزایش یا کاهش قطر فیبر، ضریب انتقال حرارت تابشی افزایش می‌یابد.



شکل ۳- ضریب شکست فیبرهای سیلیکونی



شکل ۷ - بررسی اثر قطر فیبرهای سیلیکایی بر ضریب انتقال حرارت تابشی با فرض زاویه تابش ۷۰ درجه



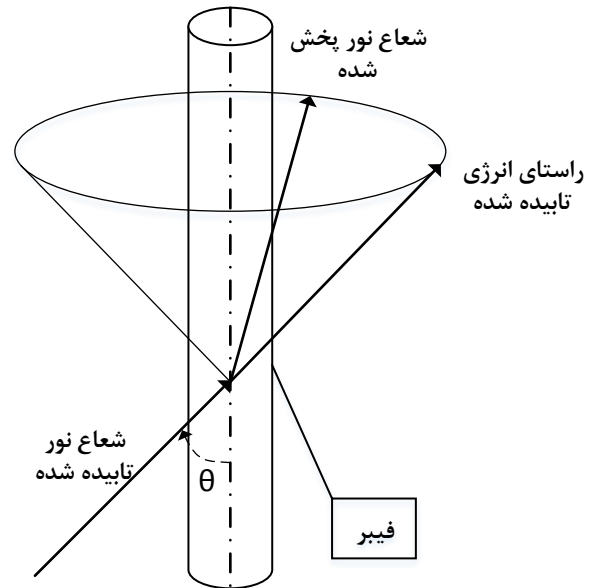
شکل ۸ - بررسی اثر قطر فیبرهای سیلیکایی بر ضریب انتقال حرارت تابشی با فرض زاویه تابش ۶۰ درجه

همانطور که در شکل ۲، شکل ۶، شکل ۷ و شکل ۸ نمایش داده شده است، زاویه تابش اثری بر قطر فیبرهای با ضریب انتقال حرارت تابشی کمینه ندارد. با کاهش زاویه تابش از ۹۰ تا ۶۰ درجه، کمترین ضریب انتقال حرارت تابشی در فیبرهای با قطر ۶ میکرومتر رخ می‌دهد.

نتیجه گیری

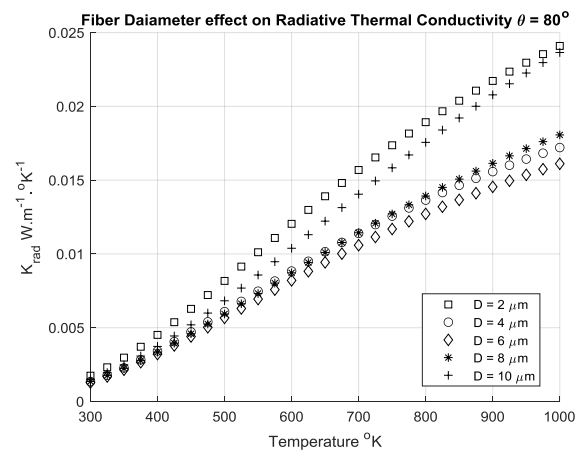
در این مقاله اثر قطر فیبر بر ضریب انتقال حرارت تابشی عایق‌های فیبری دما بالا بررسی شد. این بررسی با مدل سازی ضریب تضعیف انرژی تابشی توسط تئوری پراش غیرمتشابه انجام شد.

نتایج کد توسعه داده شده با نتایج مقاله مشابه که از تئوری مای به منظور محاسبه ضریب تضعیف انرژی تابشی



شکل ۵ - نحوه پخش شعاع نور تابیده شده به فیبر [۲۴]

با تغییر زاویه فیبرها، ضریب تضعیف عایق حرارتی و در نتیجه ضریب انتقال حرارت تابشی آن تغییر خواهد کرد. ادامه اثر تغییر زاویه و قطر فیبرها بر ضریب انتقال حرارت تابشی بررسی خواهد شد. با کاهش زاویه فیبرها از ۹۰ تا ۶۰ درجه میزان ضریب انتقال حرارت تابشی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد با انحراف فیبرها، مخروط نشان داده شده در شکل ۵ به گونه‌ای منحرف می‌شود که میزان انرژی تابشی تضعیف شده افزایش یابد.



شکل ۶ - بررسی اثر قطر فیبرهای سیلیکایی بر ضریب انتقال حرارت تابشی با فرض زاویه تابش ۸۰ درجه

[6] Torabi, A., et al., "Axiomatic design of a reflective multilayer high-temperature insulator," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 233, no. 2, pp. 457-471, 2019.

[7] Zhao, J. J., et al., "Radiative properties and heat transfer characteristics of fiber-loaded silica aerogel composites for thermal insulation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, no. 19-20, pp. 5196-5204, 2012.

[8] Daryabeigi, K., "Heat transfer in high-temperature fibrous insulation," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 17, no. 1, pp. 10-20, 2003.

[9] Zhang, B. M., Zhao, S. Y., and He, X. D., "Experimental and theoretical studies on high-temperature thermal properties of fibrous insulation," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 109, no. 7, pp. 1309-1324, 2008.

[10] Hulst, H. C. and Van De Hulst, H. C., "Light scattering by small particles," *Courier Corporation*, 1981.

[11] Zhao, J. Q., and Hu, Y. Q., "Bridging technique for calculating the extinction efficiency of arbitrary shaped particles," *Applied Optics*, vol. 42, no. 24, pp. 4937-4945, 2003.

[12] Lee, S. C., and Cunnington, G. R., "Conduction and radiation heat transfer in high-porosity fiber thermal insulation," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 14, no. 2, pp. 121-136, 2000.

[13] Lee, S. C., "Scattering phase function for fibrous media," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 33, no. 10, pp. 2183-2190, 1990.

استفاده کرده بود مقایسه شد و نتیجه دقت بالای کد را نشان می‌دهد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت تابشی عایق‌های فیبرهای سیلیکایی زمانی که قطر فیبرها ۶ میکرومتر باشد، کمینه خواهد بود و با افزایش یا کاهش قطر فیبرها ضریب انتقال حرارت تابشی افزایش می‌یابد. در مورد عایق‌های فیبری سیلیکونی ضریب انتقال حرارت تابشی در شرایطی که قطر فیبرها ۴ میکرومتر باشد کمینه است. همچنین بررسی اثر زاویه تابش نشان می‌دهد که قطر فیبر متناظر با ضریب انتقال حرارت تابشی کمینه با تغییر زاویه تابش ثابت خواهد بود.

منابع و مراجع

[1] Halberg, E. E., "Crew Configuration, Ingress/Egress Procedures, and In-Flight Caregiving Capacity in a Space Ambulance Based on the Boeing X-37B," *University of California, Davis*, 2017.

[2] Rodriguez, A. C. and C. G. Snapp, "Orbiter Thermal Protection System Lessons Learned," *AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition, Long Beach, California*, 2011.

[3] Arambakam, R., Tafreshi, H. V., and Pourdeyhimi, B., "A simple simulation method for designing fibrous insulation materials," *Materials & Design*, vol. 99, no. 2, pp. 99-106, Feb. 2013.

[4] Behrens, B., "Technologies for thermal protection systems applied on re-usable launcher," in *54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law*, 2004,

[5] Huang, C., and Zhang, Y., "Calculation of high-temperature insulation parameters and heat transfer behaviors of multilayer insulation by inverse problems method," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 27, no. 4, pp. 791-796, 2014.

Insulation Materials," *A A*, vol. 1, no. 1, pp. 1, 2012.

[23] Lee, S. C., "Effect of fiber orientation on thermal radiation in fibrous media," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 32, no. 2, pp. 311-319, 1989.

[24] Lee, S. C., "Radiation heat-transfer model for fibers oriented parallel to diffuse boundaries," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 2, no. 4, pp. 303-308, 1988.

[14] Milandri, A., et al., "Heat transfer by radiation and conduction in fibrous media without axial symmetry," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 74, no. 5, pp. 585-603, 2002.

[15] Tong, T. W., and Tien, C. L., "Analytical models for thermal radiation in fibrous insulations," *Journal of Thermal Insulation*, vol. 4, no. 1, pp. 27-44, 1980.

[16] Zhao, S. Y., Zhang, B. M., and He, X. D., "Temperature and pressure dependent effective thermal conductivity of fibrous insulation," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, no. 2, pp. 440-448, 2009.

[17] Torabi, A., Abedian, A., and Farsi, M. A., "An approximate methodology to simulate combined conduction-radiation heat transfer for multi-layer insulator," *Scientia Iranica*, vol. 27, no. 6, pp. 2924-2932, 2020.

[18] Zhang, B., et al., "High temperature thermal physical properties of high-alumina fibrous insulation," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 23, no. 6, pp. 860, 2007.

[19] Liu, H., et al., "Investigation of high temperature thermal insulation performance of fiber-reinforced silica aerogel composites," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 183, 2023.

[20] Liu, Y., Arnott, W. P., and Hallett, J., "Anomalous diffraction theory for arbitrarily oriented finite circular cylinders and comparison with exact T-matrix results," *Applied Optics*, vol. 37, no. 21, pp. 5019-5030, 1998.

[21] Howell, J. R., et al., "Thermal radiation heat transfer," *CRC press*, 2020.

[22] Xie, T., et al., "Theoretical and Numerical Study on Thermal Properties of Fibrous