

واژه‌های کلیدی:

آبرعایق چندلایه
چگالی لایه
ایروژل
جداکننده نانو ساختار

اسلوب انتقال حرارت در آبرعایق‌های چندلایه نوین

بابک ولی‌پور گودرزی، احمدرضا بهرامیان*

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

نسل جدید آبرعایق‌های چندلایه، در سال‌های اخیر اهمیت فراوانی در صنایع مختلف، به خصوص صنعت هوافضا پیدا کرده‌اند. این آبرعایق‌ها متشکل از لایه‌های بازتابشی بسیار نازک (Foil) آلومینیوم هستند که بین آن‌ها جداکننده‌های ایروژل نانومتخلخل قرار دارد. به دلیل اهمیت این عایق‌ها تلاش زیادی برای مدل‌سازی انتقال حرارت در آن‌ها صورت گرفته، تا بتوان با استفاده از معادلات مربوط، عایق را با توجه به کاربرد دمایی لازم طراحی کرده، آزمون‌های عملی را به حداقل رساند. عملکرد این عایق‌ها به شدت به چگالی، تخلخل و ابعاد حفرات جداکننده‌های ایروژل و همچنین تعداد لایه در ضخامت کل عایق وابسته است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که در شرایط دمایی مختلف، چگالی جداکننده ایروژل در هر درجه حرارت، مقداری بهینه خواهد داشت که در آن کمترین رسانایی حرارتی موثر در عایق احراز می‌شود. از طرفی، با در نظر گرفتن ضخامت ثابت عایق، تعداد لایه‌ها در واحد ضخامت عایق که به عنوان چگالی لایه شناخته می‌شود، مقدار بهینه‌ای تحت تأثیر شرایط مرزی دمایی خواهد داشت. در چگالی لایه بهینه، شار حرارت عبوری از عایق کمترین میزان را دارد. بنابراین برای طراحی مطلوب عایق و کاهش ضخامت عایق تا حد ممکن، محاسبه عوامل بهینه چگالی جداکننده ایروژل و همچنین چگالی موثر، چالش اصلی طراحی است. بررسی و رفع این مشکل نیاز به و مدل‌سازی‌هایی دارد که رفتار حرارتی عایق چند لایه و ایروژل جداکننده را با دقت مناسب پیش‌بینی کند. در این مقاله علاوه بر تبیین روش مدل‌سازی آبرعایق چندلایه و بهینه‌سازی ساختار ایروژل جداکننده آن، نتایج طراحی آبرعایق چندلایه نسل جدید برای کاربرد دمایی مشخص، مطالعه و مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

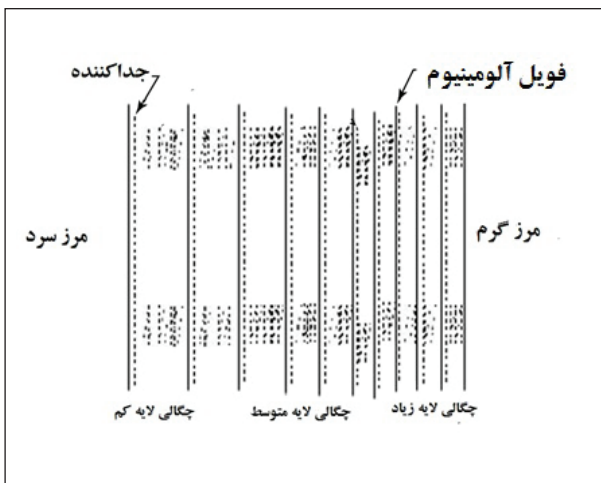
*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

abahramian@modares.ac.ir

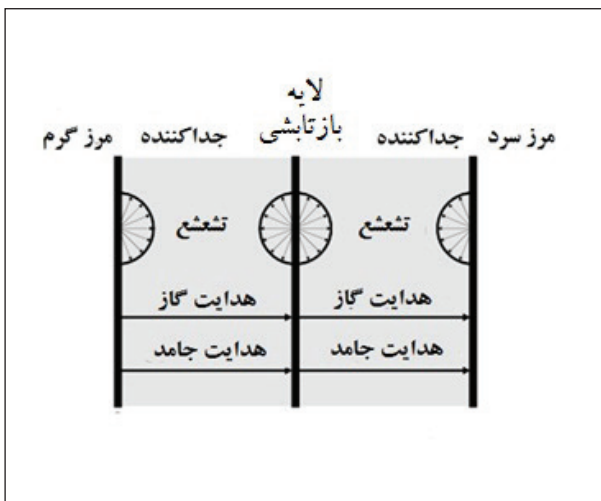
امقدمه

جلوگیری از اتلاف انرژی یکی از چالش‌های پیش‌رو برای بهبود سطح کیفیت زندگی است. امروزه ابر عایق‌های چند لایه (Multilayer Super Insulator) در انواع مختلف، کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، پتروشیمی، ساختمان و ... دارند. پیشرفت و بهبود عملکرد این ابر عایق‌ها از نظر ضخامت، عملکرد، هزینه و کارایی، موضوع بسیاری از پژوهش‌های روز دنیا است. در چند سال اخیر این عایق‌ها از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی ناسا برای پیش‌برد اهداف سامانه‌های لازم برای سفرهای طولانی مدت فضایی بوده است. به طور مشخص، کپسول‌های سوختی بروندی با هدف نگهداری طولانی مدت گازهای سوختی در دمای ثابت، عایق‌کاری می‌شوند. برای افزایش کارایی این کپسول‌های سوختی، ابر عایق‌های چندلایه توسعه زیادی یافته‌اند.

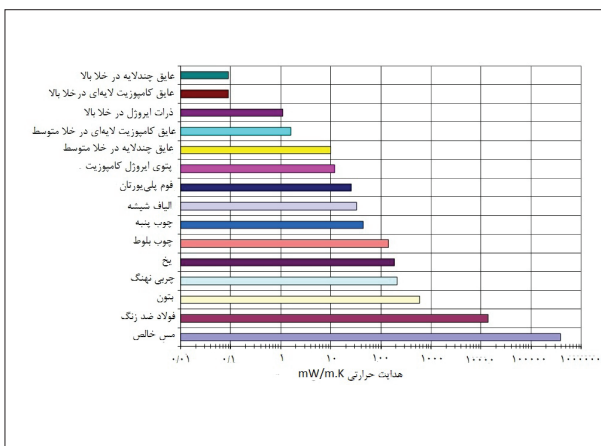
عایق‌های چندلایه، از لایه‌های بازتابشی و جداکننده‌های متخلخل بین آن‌ها تشکیل شده است. شکل‌های ۱ و ۲ نمایشی از ساختار عایق چندلایه و اسلوب انتقال حرارت در آن را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، سه نوع کلی انتقال حرارت تشعشعی، هدایتی و جابه‌جایی در عایق‌های چندلایه رخ می‌دهد [۲]. برای بررسی هر یک از روش‌های انتقال حرارت در ساختار عایق چندلایه مذکور، مدل‌ها و روابط مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی در عایق‌های چندلایه نوین، به دلیل ایجاد شرایط خلأ یا داشتن شرایط نزدیک به خلأ، ناشی از وجود حفرات ریز در جداکننده‌های متخلخل که حرکت مولکول‌های گاز را محدود می‌کنند، انتقال حرارت جابه‌جایی کاملاً حذف شده، در مجموع هدایت حرارتی موثر به میزان قابل توجهی نسبت به سایر عایق‌ها کاهش می‌یابد. در شکل ۳ هدایت حرارتی عایق‌های چند لایه نسبت به مواد مختلف مقایسه شده است.



شکل ۱ ساختار و اجزای عایق چندلایه [۱]

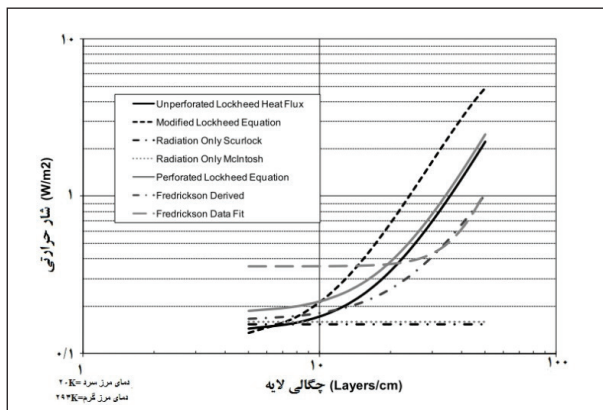


شکل ۲ نمای کلی انواع انتقال حرارت در عایق چندلایه [۲]

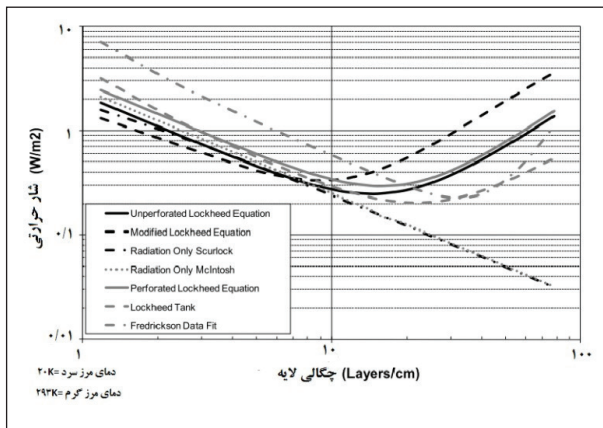


شکل ۳ نمودار هدایت حرارتی مواد مختلف

و n برای انواع عایق‌ها به ترتیب $0/52$ و $2/63$ و ثابت در نظر گرفته شده، که عامل خطا است. تفسیر انتقال حرارت با عامل چگالی لایه، به دو صورت انجام می‌شود. اگر تعداد لایه‌ها را ثابت در نظر بگیریم، هر چه چگالی لایه‌ها کمتر باشد، انتقال حرارت هم کمتر خواهد بود. این نتیجه در شکل ۴ قابل مشاهده است. در حالت دیگر، اگر چگالی لایه‌ها در ضخامت عایق ثابت در نظر گرفته شود، انتقال حرارت در رابطه با چگالی دارای مقدار کمینه است. این پدیده در شکل ۵ نشان شده است [۵].



شکل ۴ نمودار تغییرات انتقال حرارت بر حسب چگالی لایه در تعداد لایه ثابت [۵]



شکل ۵ نمودار تغییرات انتقال حرارت بر حسب چگالی لایه‌ها در ضخامت ثابت [۵]

برای تعیین چگالی لایه بهینه، می‌توان از رابطه لاک‌هید استفاده کرد، چرا که با نوشتن معادله و اعمال تغییراتی مختصر در آن، می‌توان آن را بر اساس عامل چگالی لایه بازنویسی کرده، عامل تعداد لایه را حذف کرد. برای این کار ابتدا سعی می‌کنیم رابطه ضریب هدایت حرارتی موثر را طبق رابطه ۲ محاسبه کنیم. برای این منظور فرض می‌کنیم به طور استاندارد و معمول تعداد لایه‌ها زیاد است، به

انتقال حرارت تشعشعی از طریق انتقال فوتون‌ها در فضا صورت می‌گیرد. مواد مختلف، خاصیت جذب، انتشار یا عبوردهی فوتون مختلفی دارند. در عایق‌های چندلایه، جنس هر لایه بازتابشی از موادی انتخاب می‌شود که قابلیت جذب فوتون را داشته، از عبور فوتون‌های انرژی در ضخامت عایق جلوگیری کنند. برای جلوگیری از انتقال حرارت تشعشعی، لایه‌های بازتابش باید به گونه‌ای انتخاب شوند که بازتاب انرژی تشعشعی خوبی داشته باشند. با توجه به مسائل اقتصادی، استفاده از لایه‌های نازک آلومینیومی بسیار رایج است. تحقیقات نشان داده که انتقال حرارت جابه‌جایی در منافذ جسم نانومتخلخل بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر است [۳]. بنابراین برای حذف اثر انتقال حرارت جابه‌جایی یا باید عایق خلأ شده، یا این که منافذ جداکننده در ابعاد نانو کنترل شوند. روش دوم راحت‌تر و به صرفه‌تر است. زیرا ایجاد خلأ هزینه بیشتری می‌طلبد و دشواری بیشتری برای ساخت و کاربرد عایق ایجاد می‌کند.

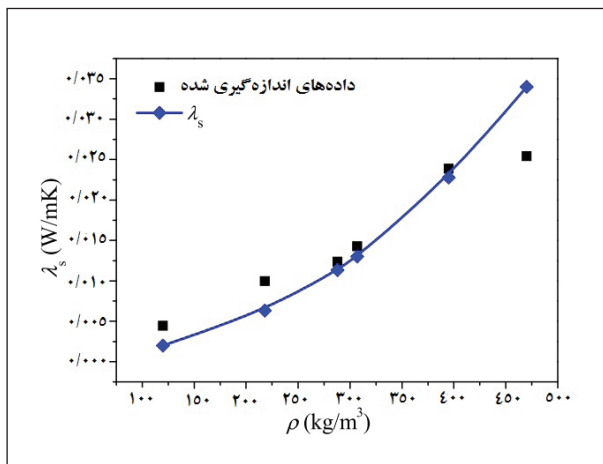
۲ طراحی ابر عایق چندلایه

۲-۱ نسبت بهینه تعداد لایه به ضخامت

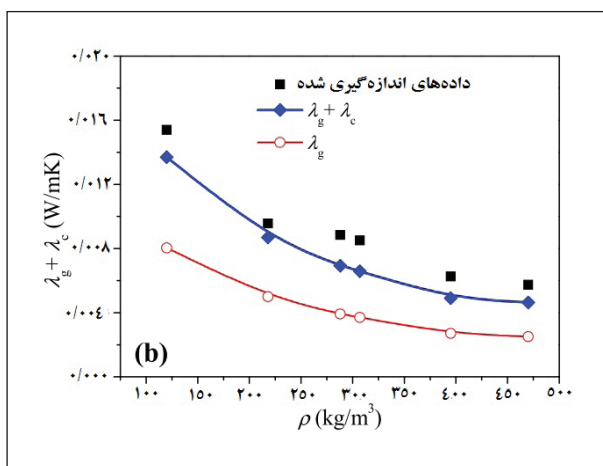
پدیده‌ی است که با تغییر ضخامت عایق و تعداد لایه‌های آن، عملکرد و کارایی عایق تغییر خواهد کرد. اما با توجه به شرایط مرزی و کاربردی سامانه عایق چندلایه، محدودیت‌هایی برای تغییر ضخامت وجود دارد. به این ترتیب هر چه ضخامت کمتر باشد، با حفظ کارایی، عملکرد عایق مطلوب‌تر خواهد بود. از طرفی ساخت و تغییر ضخامت و تعداد لایه‌های عایق و آزمون کارایی آن‌ها برای هر سامانه بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. رابطه‌ای که به طور تجربی در طی آزمون‌ها و تحلیل‌های سازمان ناسا به دست آمده، برای بررسی چگالی لایه‌ها، کاربردی شده، به رابطه لاک‌هید اصلاح شده (Modified Lockheed) معروف است، رابطه ۱ [۴]:

$$q'' = \frac{C_s \bar{N}^n (T_H - T_C)(T_H + T_C)}{2(N+1)} + \frac{C_R \epsilon (T_H^{4.67} - T_C^{4.67})}{N} + \frac{C_G P (T_H^{m+1} - T_C^{m+1})}{N} \quad (1)$$

در این رابطه، N تعداد لایه‌ها، \bar{N} چگالی لایه‌ها، P فشار، ϵ ضریب گسیل، و سایر ثابت‌ها با توجه به نوع و جنس اجزای عایق چندلایه از طریق آزمایش و برازش برای هر لایه بازتابش و جداکننده مشخص به دست می‌آید. لازم به ذکر است که در معادله لاک‌هید اصلاح‌نشده، مقادیر $m+1$



شکل ۶ تغییرات هدایت حرارتی جامد با تغییرات چگالی ایزوژل [۶]



شکل ۷ تغییرات هدایت حرارتی گاز و گاز-جامد با تغییرات چگالی ایزوژل [۶].

بنابراین به دلیل تأثیرات متقابل تغییرات چگالی بر هدایت حرارتی جامد و گاز، در هر دما چگالی بهینه‌ای وجود دارد، که در آن کمترین هدایت حرارتی کل احراز می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن برآیند تمام آثار و فرآیندها، برای دستیابی به کمینه هدایت حرارتی، چگالی بهینه محاسبه می‌شود. برای محاسبه چگالی بهینه ایزوژل‌ها روابطی نظری و تجربی به دست آمده است که با تلفیق آن‌ها، هدایت حرارتی موثر در ایزوژل‌ها که نقش جداکننده در عایق‌های چندلایه نوین را دارند، با تقریب خوبی پیش‌بینی می‌شود. در شرایط دمایی مختلف، با استفاده از داده‌های حاصل از این روابط و رسم نمودار هدایت حرارتی موثر بر حسب چگالی، محاسبه چگالی بهینه میسر است.

طوری که $N+1 \approx N$ است.

$$k = q'' \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (2)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$k = \frac{C_s \bar{N}^n (T_H - T_C)(T_H + T_C) \Delta x}{2N (T_H - T_C)} + \quad (3)$$

$$\frac{C_R \varepsilon (T_H^{4.67} - T_C^{4.67}) \Delta x}{N (T_H - T_C)} + \frac{C_G P (T_H^{m+1} - T_C^{m+1}) \Delta x}{N (T_H - T_C)}$$

حال می‌توان همین رابطه را بازنویسی کرده، عامل تعداد لایه را حذف کرد، رابطه ۴:

$$k = \frac{C_s \bar{N}^{n-1} (T_H + T_C)}{2} + \quad (4)$$

$$\frac{C_R \varepsilon (T_H^{4.67} - T_C^{4.67})}{\bar{N} (T_H - T_C)} + \frac{C_G P (T_H^{m+1} - T_C^{m+1})}{\bar{N} (T_H - T_C)}$$

بنابراین از رابطه ۴ نسبت به چگالی لایه مشتق گرفته و برابر با صفر قرار داده می‌شود تا چگالی لایه بهینه به دست آید، رابطه ۵:

$$\bar{N}_{opt} = \left[\frac{2C_R \varepsilon (T_H^{4.67} - T_C^{4.67}) + C_G P (T_H^{m+1} - T_C^{m+1})}{(n-1)C_s (T_H^2 - T_C^2)} \right]^{\frac{1}{n-2}} \quad (5)$$

این رابطه، نشان دهنده چگالی لایه برای کمترین انتقال حرارت در ضخامت‌های مختلف است [۳ و ۶]. از آنجا که مشتق دوم رابطه ۵ مثبت است، چگالی لایه به دست آمده از برابر صفر قرار دادن مشتق اول، چگالی لایه کمینه است.

۲-۲ چگالی بهینه جداکننده

هرچه چگالی ایزوژل بیشتر باشد، انتظار می‌رود که اندازه حفرات کوچک‌تر شده، بخش جامد ایزوژل بیشتر باشد. بنابراین طبق نمودار شکل ۶، با افزایش چگالی، هدایت حرارتی جامد در ایزوژل بیشتر خواهد شد. از طرفی با افزایش چگالی و کوچک‌تر شدن حفرات، مطابق شکل ۷ هدایت حرارتی گاز درون حفرات و همچنین هدایت حرارتی بین گاز و جامد کاهش خواهد یافت [۶].

$$\lambda_s = \lambda_0 \frac{\rho v}{\rho_0 v_0} \quad (11)$$

که در این رابطه ρ چگالی ابروژل، p_0 چگالی بالک جامد ابروژل، v سرعت صوت در ابروژل، v_0 سرعت صوت در بالک جامد و λ_0 ضریب انتقال حرارت هدایتی در بالک جامد ابروژل است. چگالی، عاملی است که هنگام سنتز ماده قابل کنترل است. سرعت صوت در طول و عرض جسم متخلخل نیز به صورت تجربی یا به ترتیب از روابط ۱۲ و ۱۳ به دست می‌آید [۱۱]:

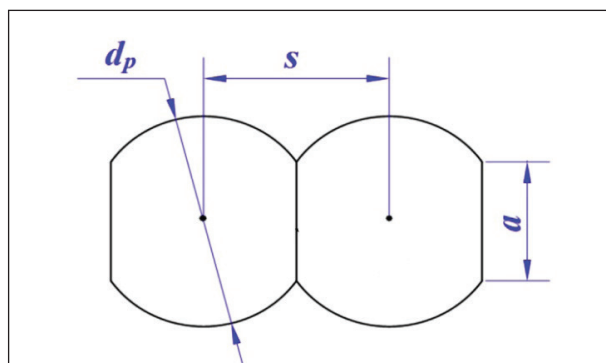
$$v_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (12)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (13)$$

در روابط فوق، E مدول یانگ و σ نسبت پواسون است. λ_0 را نیز به چند طریق می‌توان محاسبه کرد و در معادله ۱۱ جای‌گذاری کرد. یکی از راه‌ها این است که $\lambda_{bulk} = \lambda_0$ در نظر گرفته شود. در اینجا λ_{bulk} به معنی انتقال حرارت هدایتی در ماده جامد (Backbone) ابروژل است. در این حالت انتقال حرارت بیشتر از واقعیت خواهد بود، زیرا اثر منافذ در نظر گرفته نمی‌شود. راه دیگر استفاده از مدل چن (Chen Model) است که مطابق با رابطه ۱۴ ارائه شده است [۱۲]:

$$\lambda_0 = \lambda_p = \lambda_{bulk} \frac{3d_p}{3d_p + 8\Lambda_{bulk}} \quad (14)$$

در این رابطه d_p قطر هر جز، (طبق شکل ۸) و Λ_{bulk} پوش آزاد متوسط اتم‌ها و فوتون‌ها است. در این رابطه اثر اندازه منافذ در نظر گرفته شده، اما اثر مقاومت حرارتی اجزای ابروژل در نظر گرفته نشده است.



شکل ۸ تعریف عوامل هندسی جامدها با تخلخل نانومتری [۴]

۳ پیش‌بینی هدایت حرارتی موثر در ابروژل

مدل غیر کویل (Decouple) انواع انتقال حرارت در تخلخل‌ها را مستقل از هم در نظر گرفته، هدایت حرارتی موثر را برآبر با جمع انواع انتقال حرارت به صورت رابطه ۶ در نظر می‌گیرد [۴]:

$$\lambda_{eff} = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r \quad (6)$$

با توجه به این که نتایج حاصل از این مدل از مقادیر تجربی کمتر است، ریچ‌ناور (Reichenauer) این مدل را اصلاح کرده، به آن انتقال حرارت هدایت بین جامد و گاز را افزوده، به صورت رابطه ۷ تغییر داد. در این حالت نتایج به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود [۷]:

$$\lambda_{eff} = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r + \lambda_c \quad (7)$$

برای به دست آوردن هدایت حرارتی گاز درون حفرات، رابطه‌ای توسط زنگ (Zeng) ارائه شده، که با فرض یکسان بودن حفره‌ها و توزیع یکنواخت آن‌ها، مدل‌سازی انتقال حرارت در نانوساختار انجام می‌شود. این رابطه با در نظر گرفتن هوا به عنوان گاز بین حفرات، به صورت رابطه ۸ ارائه شده است [۸]:

$$k_g = \frac{60.22pT^{-0.5}}{0.25S_{ext}\rho\phi^{-1} + 4.01 \times 10^4 \times pT^{-0.5}} \quad (8)$$

در این رابطه p چگالی ابروژل، ϕ تخلخل ابروژل، S_{ext} سطح ویژه خارجی ابروژل، p فشار گاز درون حفره‌ها و T دمای گاز است. تخلخل را می‌توان از رابطه ۹ و سطح ویژه خارجی را از رابطه ۱۰ به دست آورد.

$$\phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \quad (9)$$

$$S_{ext} = \left(\frac{324.3}{\rho} + 5.03 \right) \times 10^5 \quad (10)$$

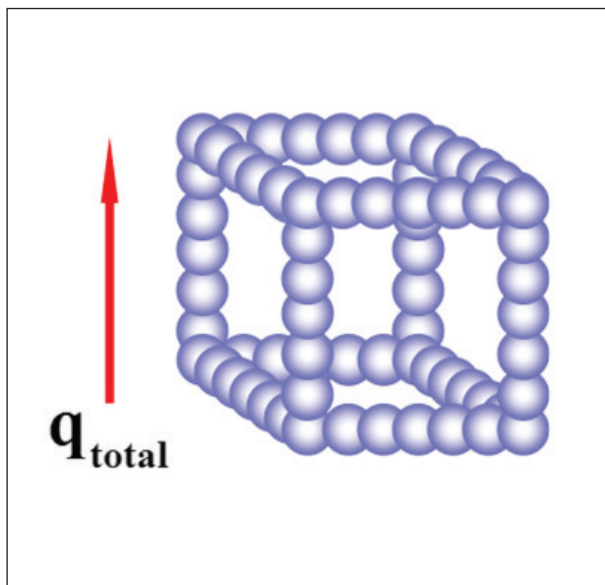
در این رابطه p چگالی ابروژل و p_0 چگالی ابروژل در فاز جامد است [۹].

انتقال حرارت هدایتی در جامد، بسیار بیشتر از فاز گاز است. از این رو در ملاحظات طراحی، پیش‌بینی دقیق‌تر آن مهم است. با توجه به این که سرعت صوت در جسم جامد وابسته به تحرکات اتمی است، رابطه ۱۱ برای ارزیابی هدایت حرارتی جامد، ارائه می‌شود [۱۰]:

اما این گونه محاسبات و اندازه‌گیری‌ها نیز دقیق نخواهد بود. برای رفع این مشکل، شکل ۱۰ مدل متخلخل ایده‌آل را در راستای انتقال حرارت نشان داده، بنابراین فقط چهار ضلع از دوازده ضلع در انتقال حرارت گاز-جامد نقش دارند. پس انتقال حرارت واقعی مجموعه‌ای (کوپلینگ) به صورت رابطه ۱۹ خواهد بود [۷].

$$\lambda_c = \frac{2}{3} \lambda_{g-s} \quad (19)$$

حال هر یک از حالات انتقال حرارت به غیر از انتقال حرارت تشعشی در ایروزل بدون انجام آزمون‌های عملی با تقریب خوبی قابل محاسبه است. بنابراین از انتقال حرارت تشعشی صرف‌نظر می‌شود. با تغییر اندازه حفرات در گستره نانومتری، تغییر چندانی در انتقال حرارت تشعشی رخ نمی‌دهد [۱۵]. به همین دلیل، برای یافتن چگالی بهینه، از وارد کردن انتقال حرارت تشعشی در رابطه ۷ صرف‌نظر می‌شود. در مجموع، کم شدن انتقال حرارت تشعشی تحت تأثیر تغییرات میکرومتری است، که معمولاً این کار با اضافه کردن الیاف یا ذرات میکرومتری در ایروزل نانو متخلخل انجام می‌شود [۱۶].



شکل ۱۰ ساختار کلی مدل ایده‌آل ایروزل و انتقال حرارت [۱۴]

با استفاده از رابطه ۵، برای مساله با شرایط مرزی دمایی عایق بین 70°C تا 200°C و فشار داخلی خلاء و جداکننده از جنس ایروزل نووالاک، چگالی لایه بهینه، طبق شکل ۱۱ با فشار تغییر می‌کند.

برای به دست آوردن Λ_{bulk} از رابطه ۱۵ استفاده می‌شود.

$$\Lambda_V = \Lambda_{bulk} = \frac{3\lambda_{bulk}}{C_V v_{bulk}} \quad (15)$$

محاسبه d_p دشوار است و برای به دست آوردن آن، نیاز به آزمون‌های عکس‌برداری الکترونی است. اما مطابق و همکاران مطالعات وی (Wei) [۱۳]، از رابطه ۱۶، این عامل با تقریب خوبی به دست می‌آید.

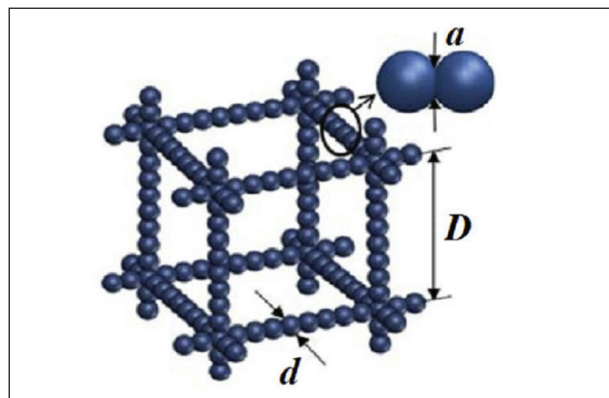
$$d = \frac{12(1-\phi)}{(2+a^2)\rho S_{ext}} \approx \frac{6}{S_{ext}\rho} \quad (16)$$

$$D \approx \frac{4V_{pore}}{S_{ext}} = \frac{4}{S_{ext}} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_s} \right) \quad (17)$$

انتقال حرارتی که بین فاز جامد و گاز رخ می‌دهد تحت عنوان مجموعه‌ای از انتقال حرارت (Coupling Thermal Conductivity) شناخته می‌شود. بسیاری از مدل‌سازی‌ها این اثر را در انتقال حرارت در نظر نگرفته‌اند. با در نظر گرفتن این انتقال حرارت، جواب‌ها به واقعیت نزدیک‌تر خواهند شد. مدل‌های پیچیده‌ای برای این انتقال حرارت ارائه شده، که به دلیل پیچیدگی محاسباتی، مناسب استفاده مهندسی نیستند. بی (Bi) [۶] مدلی جدید ارائه کرد که وابسته به انتقال حرارت هدایت گاز و جامد و ویژگی‌های ساختار هندسی فاز جامد است. این مدل برای کاربردهای مهندسی مناسب بوده و از دقت خوبی نیز برخوردار است و از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

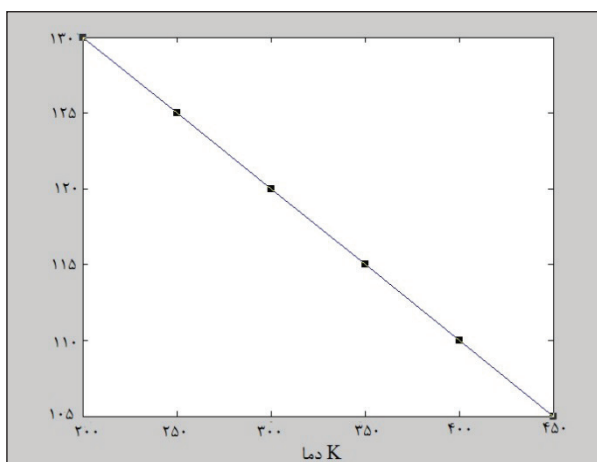
$$\lambda_{g-s} = \frac{D+d_p}{d_p} \frac{2\lambda_p\lambda_g}{\lambda_g-\lambda_p} \left[1 - \frac{D+d_p}{d_p} \frac{\lambda_p}{\lambda_g-\lambda_p} \ln \left(1 - \frac{\lambda_g-\lambda_p}{\lambda_p} \frac{d_p}{D+d_p} \right) \right] \quad (18)$$

که در رابطه بالا D و d_p در شکل ۹ مشخص شده‌اند.



شکل ۹ واحد مدل حفره نانومتری و ذرات [۴]

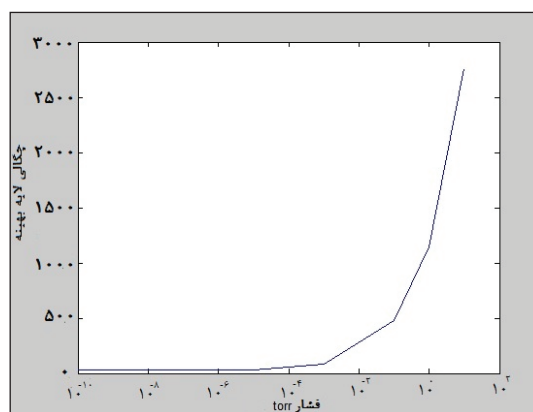
ظرفیت گرمایی ویژه آن 1100 J/kgK در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب هدایت حرارتی بالک جامد نووالاک، $0.5/0.65 \text{ W/mk}$ در نظر گرفته شده است. چگالی بهینه جداکننده، طبق شکل ۱۳، وابستگی خطی به دما نشان می‌دهد. در نتیجه برای پیش بینی چگالی بهینه در محدوده‌های دمایی دیگر می‌توان از برون‌یابی استفاده کرد. کاهش بیشتر در هدایت حرارتی، مشروط به تعویض جنس جداکننده یا اضافه کردن الیاف برای کاهش هدایت حرارتی تشعشعی است.



شکل ۱۳ تابعیت خطی چگالی بهینه جداکننده با تغییرات دما

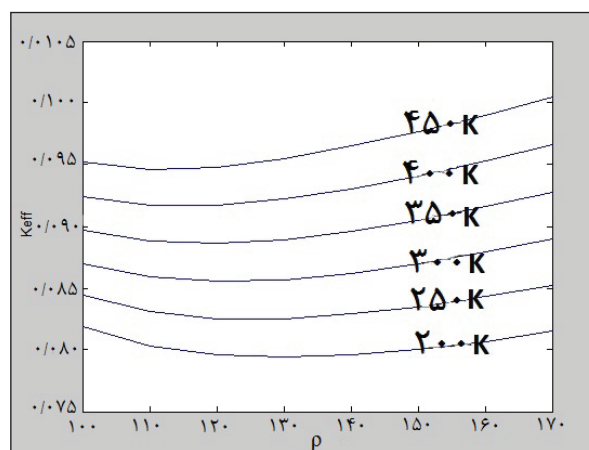
۴ نتیجه‌گیری

با استفاده از مدل‌سازی‌های انجام شده و انتخاب روابط مهندسی و تلفیق آن‌ها، می‌توان حدود عوامل بهینه برای ساخت عایق چندلایه را، قبل از شروع به ساخت آن به دست آورد و عملکرد عایق را تحت شرایط مرزی دمایی متفاوت، وابسته به جنس ابروژل پیش‌بینی کرد. مسیر ساخت عایق مطلوب با استفاده از نتایج حاصل از تلفیق مدل‌سازی برای سازنده روشن‌تر است و از این طریق آزمون‌های عملی تا حد زیادی کاهش می‌یابد. برای طراحی دقیق‌تر، می‌توان تقسیم‌بندی دمایی در طول عایق را محدودتر کرد، با توجه به محدوده کوچک‌تر در هر دما، برای هر بخش از تقسیم بندی عایق، چگالی لایه بهینه به دست آورد و برای هر لایه جداکننده، چگالی بهینه محاسبه کرد. این حالت ایده‌آل برای کاربرد در محدوده دمایی زیاد در دو طرف عایق اهمیت پیدا می‌کند.



شکل ۱۱ تغییرات چگالی لایه بهینه با فشار درون حفرات

وقتی اندازه حفرات از پویش آزاد متوسط ذرات گاز کمتر باشد و ذرات گاز تحرک خود را از دست دهند، شرایط معادل خلأ ایجاد خواهد شد. در شرایط خلأ فشار درون حفرات 10^{-5} torr در نظر گرفته شده و طبق شکل ۱۱، چگالی لایه بهینه در شرایط خلأ حدود 25 layer/cm محاسبه می‌شود. بنابراین، چگالی بهینه جداکننده، در بازه دمایی به صورت نمودار شکل ۱۲ تغییر خواهد کرد. سپس برای مشخص شدن چگالی بهینه ابروژل‌های جداکننده، با استفاده از معادلات ۷ تا ۱۹، در دماهای مختلف و در محدوده $200\text{K}-450\text{K}$ و در چگالی‌های مختلف هدایت حرارتی موثر، قابل محاسبه است که مجموع نتایج این محاسبات در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲ تغییرات هدایت حرارتی موثر با تغییر چگالی در دماهای مختلف در ضخامت عایق

در این محاسبات فشار محیط 100000 Pa ، سرعت صوت در ابروژل نووالاک جداکننده 3000 m/s ، مدول یانگ $3/8 \text{ GPa}$ چگالی بالک جامد نووالاک 1150 kg/m^3 و

مراجع

1. A. Hedayat., A. Hastings., T. Brown Analytical Modeling of Variable Density Multilayer Insulation for Cryogenic Storage. *NASA/TM*,-213175, **2004**.
2. M. Spinnler., E.F. Winter., R. Viskanta Studies on high-Temperature Multilayer Thermal Insulations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 1305–1312, **2004**.
3. C. H. Blomqvist., C. Abrahamsson., T. Gebäck. Pore Size Effects on Convective Flow and Diffusion Through Nanoporous Silica Gels., *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.*, 484, 288-298, **2015**.
4. G.H. Tang., C. Bi., Y. Zhao., W.Q. Tao. Thermal Transport in Nano-Porous Insulation of Aerogel: Factors Models and Outlook. *Energy.*, 90,701-721, **2015**.
5. W.L. Johnson., Optimization of Layer Densities for Spacecraft Multilayered Insulation Systems. *Cryogenics Test Laboratory, Kennedy Space Center.*, 321, 4865-4867, **2009**.
6. C. Bi. G.H., Tang., Z.J. Hu., H.L. Yang., J.N. Li. Coupling Model for Heat Transfer Between Solid and Gas Phases in Aerogel and Experimental Investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, 79,126-136, **2014**.
7. G.H. Tang., C. Bi., Y. Zhao., W.Q. Tao. Thermal Transport in Nano-Porous Insulation of Aerogel: Factors, Models and Outlook. *Energy.*, 90,701-721, **2015**.
8. T. Xie., Y. L. He., Z. J. Hu. Theoretical Study on Thermal Conductivities of Silica Aerogel Composite Insulating Material. *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, 58,540-552, **2013**.
9. Y. Zhao., G.H. Tang., M. Du. Numerical Study of Radiative Properties of Nanoporous Silica Aerogel. *International Journal of Thermal Sciences.*, 89, 110-120, **2015**.
10. Hrubesh LW., Pekala RW. Thermal Properties of Organic and inorganic aerogels. *Journal of Material Sciences.* , 9, 731-738, **1994**.
11. Gross J., Fricke J., Pekala RW., Hrubesh LW. Elastic Nonlinearity of Aerogels. *Phys.Rev B.*, 45, 12774-12777, **1992**.
12. Chen G., Nonlocal and Non-equilibrium Heat Conduction in the Vicinity of Nanoparticles. *ASME J Heat Transfer.*, 118,539-545, **1996**.
13. G. Wei., Y. Liu., X. Zhang., F.Yu., X. Du. Thermal Conductivities Study on Silica Aerogel and Its Composite Insulation Materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, 54, 2355-2366, **2011**.
14. S.Q. Zeng., A. Hunt., R. Greif. Geometric Structure and Thermal Conductivity of Porous Medium Silica Aerogel. *ASME J. Heat Transfer.*, 117, 1055–1058, **1995**.
16. G.H.Tang., Y.Zhao., J.F.Guo. Multi-layer Graded Doping in Silica Aerogel Insulation with Temperature Gradient. *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, 99, 192-200, **2016**.
17. Tao Xi., Ya Ling He. Heat Transfer Characteristics of Silica Aerogel Composite Materials: Structure Reconstruction and Numerical Modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, 95, 621-635, **2016**.