



## بهینه‌سازی خواص مربوط به سپرهای تشعشعی در عایق‌های حرارتی چندلایه

محمد صدیقی<sup>۱\*</sup>، بهزاد قنبری اورنج<sup>۲</sup> و امیرحسین جباری مستحسن<sup>۳</sup><sup>۱</sup>استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران<sup>۲</sup>فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران<sup>۳</sup>دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۶/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۵

## چکیده

عایق‌های حرارتی چندلایه، از قرارگیری لایه‌های متوالی مواد عایق متخلخل و سپرهای تشعشعی در کنار یکدیگر ایجاد شده است و در دماهای بالا و نیز شرایط برودتی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع عایق‌ها، انتقال حرارت می‌تواند به سه حالت، هدایتی، جابه‌جایی و تشعشعی وجود داشته باشد؛ اما زمانی که چگالی مواد عایق متخلخل بیش‌تر از  $20 \frac{kg}{m^3}$  باشد، انتقال حرارت جابه‌جایی قابل چشم‌پوشی است. در این مقاله خواص مربوط به سپرهای تشعشعی از جمله، ضخامت، ضریب صدور، تعداد و فاصله‌ی سپرهای تشعشعی، مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفته است. جهت بررسی تأثیر خواص مذکور بر ضریب هدایت حرارتی مؤثر عایق چندلایه، از کد نرم‌افزاری نوشته شده استفاده گشته و نتایج با دیگر پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه مقایسه شده است؛ همچنین بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از روش پاول انجام پذیرفته است. نتایج نشان‌دهنده آن است که مقدار ضریب صدور سپرهای تشعشعی و نیز نحوه چیدمان آن‌ها، تأثیر بسزایی در مقدار ضریب هدایت حرارتی مؤثر عایق چندلایه دارد؛ همچنین در رابطه با فواصل بهینه‌سازی شده بین سپرهای تشعشعی، مشاهده گردید که با فاصله گرفتن از ناحیه گرم عایق (در جهت انتقال حرارت)، فاصله بهینه بین سپرها نیز بیش‌تر می‌شود.

**کلمات کلیدی:** عایق حرارتی چندلایه؛ سپر تشعشعی؛ عایق متخلخل؛ بهینه‌سازی.

## Optimization of Radiation Shields Parameters in Multi-Layer Thermal Insulations

M. Sedighi<sup>1,\*</sup>, B. Ghanbari Oranj<sup>2</sup>, A. H. Jabbari<sup>3</sup><sup>1</sup> Prof., Mech. Eng., Iran Univ. of Science and Technology, Tehran, Iran<sup>2</sup> M.Sc. Graduated, Mech. Eng., Iran Univ. of Science and Technology, Tehran, Iran<sup>3</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Iran Univ. of Science and Technology, Tehran, Iran

## Abstract

Multi-layer thermal insulations are fabricated by locating consecutive porous insulation and radiation shields, which could be used at high temperature and cryogenic applications. In this type of insulations, different heat transfer methods such as conduction, convection and radiation would be occurred, although by using high density insulation (more than  $20 \frac{kg}{m^3}$ ), convection could be neglected. In this paper, radiation shields parameters such as thickness, emissivity, distance and number of screens are studied and optimized. For investigating the effect of these parameters on effective thermal conductivity of multi-layer thermal insulation, a mathematical code has been improved in EES software. Then, the obtained results have been validated by another study. Moreover, Powell method has been applied in order to optimize the parameters. The results show that the amount of shield emissivity and shields arrangement have the most impact on the effective thermal conductivity of multi-layer thermal insulations. Also, the optimized distances between radiation shields indicate that this distance increased in the direction of heat transfer.

**Keywords:** Multi-Layer Thermal Insulation; Radiation Shield; Porous Insulation; Optimization.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: (۲۹۷۵) ۰۲۱-۷۷۲۴۰۵۴۰؛ فکس: ۰۲۱-۷۷۲۴۰۴۸۸

آدرس پست الکترونیک: [sedighi@iust.ac.ir](mailto:sedighi@iust.ac.ir)

## ۱- مقدمه

عایق‌های حرارتی چندلایه<sup>۱</sup> با توجه به گستره کاربرد آن‌ها از شرایط بروودی تا دماهای بسیار بالا، مورد توجه مهندسان علوم حرارتی قرار گرفته است. این دسته از عایق‌ها که بکارگیری آن‌ها برای پیشرفت تکنولوژی‌های انتقال حرارت ضروری است، طی دهه‌های اخیر در تکنولوژی‌های نوظهور مانند، صنایع پیشرفته هوافضایی کاربردهای فراوانی داشته است. عایق‌های حرارتی چندلایه در ابتدا برای کاربردهای بروودی برای نگه داشتن مایعات و گازها در دماهای بسیار پایین گسترش یافتند [۱]. در واقع این نوع عایق‌ها از موانع تشعشی و انتقال حرارتی چندگانه، برای ایجاد تأخیر در جریان انرژی حرارتی استفاده کرده، از لایه‌های متناوب سپرهای تشعشی<sup>۲</sup> و مواد عایق متخلخل<sup>۳</sup> و یا عایق‌های الیاف سرامیکی تشکیل شده‌اند [۲].

سپرهای تشعشی برای کاربردهای بروودی، معمولاً از جنس پلیمرهای بسیار نازک بوده، در کاربردهای دما بالا از مواد پیشرفته با روکش‌های خاص فلزی تشکیل می‌گردند [۲]. به منظور درک بهتر از مزیت‌های عایق حرارتی چندلایه، مکانیزم انتقال حرارت در محیط متخلخل به ویژه تشعشع و هدایت در دو فاز گاز و جامد باید در نظر گرفته شود؛ همچنین در بسیاری از عایق‌های حرارتی ساخته شده از مواد عایق با چگالی بالا، انتقال حرارت به روش جابه‌جایی قابل صرف نظر کردن است [۱].

در زمینه عایق‌های حرارتی چندلایه، اسپینلر<sup>۴</sup> و همکارانش [۳] در سال ۲۰۰۴ میلادی، مطالعات تئوری و عملی جهت محاسبه هدایت حرارتی مؤثر سیستم‌های عایق حرارتی چندلایه با طراحی خاص برای استفاده در سلول‌های سوختی دما بالا انجام دادند؛ همچنین آنها در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۰۴، مدلی تئوری را گسترش دادند که بر پایه ترکیب انتقال گرمای هدایتی و تشعشی در مواد متخلخل (با خواص جذب، صدور و پراکندگی) بود [۱]. این مدل توزیع دما و انتقال گرما را در عایق‌هایی شامل، سپرهای تشعشی

همراه با مواد عایق متخلخل پیش‌بینی می‌کرد. کلر<sup>۵</sup> و همکارانش [۴] موفق شدند، حداقل جرم عایق چندلایه تشکیل شده از مواد متخلخل مشخص را به همراه تعداد سپر تشعشی بهینه بدست آورند. باپات<sup>۶</sup> و همکارانش [۵]، آنالیزی در مورد انتقال حرارت در عایق‌های الیافی چندلایه برای کاربردهای بروودی ارائه دادند. دریابگی و همکارانش [۶]، چهار نمونه عایق حرارتی چندلایه را مورد بررسی قرار دادند که شامل سپرهای تشعشی از جنس طلا و عایق الیافی از جنس سافیل بودند.

اگرچه در پژوهش‌های انجام شده در زمینه عایق‌های حرارتی چندلایه، فاصله بین تمامی سپرهای تشعشی بدون انجام بهینه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده است [۶ و ۷]، اما شواهد نشان دهنده عدم برابری فاصله‌ها در عایق حرارتی چندلایه بهینه است. به علاوه هرچه دمای صفحه گرم عایق بالاتر رود، تأثیر استفاده از چیدمان بهینه نیز بیشتر خواهد بود. در این مقاله، پارامترهای مؤثر بر رفتار سپرهای تشعشی شامل، ضخامت، ضریب صدو، تعداد و فاصله‌ی سپرهای تشعشی در یک عایق حرارتی چندلایه استوانه‌ای شکل، مورد بررسی و بهینه سازی قرار گرفته است. جهت محاسبه انتقال حرارت در عایق حرارتی چندلایه شامل، مواد عایق متخلخل و سپرهای تشعشی، از روابطی با بالاترین دقت (که پارامتر-های مورد نیاز متعددی را در نظر می‌گیرند) استفاده شده است.

## ۲- مبانی تئوری

در عایق‌های حرارتی چندلایه، معمولاً انتقال حرارت هدایتی در فاز جامد و گاز و انتقال حرارت تشعشی در محیط متخلخل، دارای اهمیت فراوان است. در ادامه مبانی تئوری مورد استفاده توضیح داده شده است.

## ۲-۱- انتقال حرارت در مواد متخلخل با سپر تشعشی

ضریب هدایت حرارتی هر عایق سرامیکی، وابسته به دما بوده و این وابستگی بایستی به منظور افزایش دقت در محاسبات در نظر گرفته شود؛ در نتیجه ضریب هدایت حرارتی ابتدا باید

<sup>1</sup> Multi-Layer Thermal Insulation

<sup>2</sup> Radiation Shield

<sup>3</sup> Porous Material

<sup>4</sup> Spinnler

<sup>5</sup> Keller

<sup>6</sup> Bapat

نکته مهم اختلاف بسیار زیاد ضریب هدایت حرارتی در جسم جامد نسبت به جسم متخلخل (با همان ترکیب شیمیایی) است. جهت محاسبه ضریب هدایت حرارتی جسم متخلخل در شرایط خلأ (بدون حضور گاز) و با دانستن مقدار ضریب هدایت در جسم غیر متخلخل، می‌توان از رابطه ۵ استفاده کرد [۱].

$$\lambda_F = \frac{32(1 - v_p^2)\lambda_s}{\pi\left(3 + \frac{\pi}{4}(1 - v_p)\right)} \quad (5)$$

در این رابطه  $\lambda_F$  ضریب هدایت حرارتی ماده متخلخل و  $\lambda_s$  ضریب هدایت حرارتی جسم جامد بوده و  $v_p$  درصد تخلخل عایق متخلخل است؛ همچنین جهت محاسبه ضریب هدایت حرارتی گاز در دما و فشارهای مختلف، می‌توان از رابطه ۶ استفاده کرد [۶].

$$k_g = \frac{k_g^*}{\{\Phi + 2\Psi[(2 - \alpha)/\alpha][2\gamma/(\gamma + 1)](1/Pr)Kn\}} \quad (6)$$

که در آن  $k_g$  ضریب هدایت حرارتی مؤثر برای فشارهای مختلف،  $k_g^*$  ضریب هدایت حرارتی در فشار یک اتمسفر و  $Kn$  عدد نادسن است. ضرایب  $\Phi$  و  $\Psi$  وابسته به عدد نادسن بوده، برای عدد نادسن کوچکتر از ۰/۰۱، ضریب  $\Phi=1$  و ضریب  $\Psi=0$  است؛ همچنین برای عدد نادسن مابین ۰/۰۱ و ۱۰ ضریب  $\Phi=1$  و ضریب  $\Psi=1$  و برای عدد نادسن بزرگتر از ۱۰ ضریب  $\Phi=0$  و ضریب  $\Psi=1$  می‌باشند. ضریب  $\alpha$  برای آلومینا در مجاورت گاز نیتروژن برابر واحد در نظر گرفته می‌شود. ضریب نادسن از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$Kn = \lambda/L_c \quad (7)$$

ضریب  $\lambda$  که مسیر آزاد متوسط مولکولی است، از رابطه ۸ به دست می‌آید.

$$\lambda = \frac{K_B T}{\sqrt{2}\pi d_g^2 P} \quad (8)$$

و  $L_c$  نیز از رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$L_c = (\pi/4)(D_f/f) \quad (9)$$

در این رابطه  $f$  درصد حجمی فاز جامد و  $D_f$  قطر الیاف است. رابطه به دست آمده برای ضریب هدایت حرارتی گاز آرگون به صورت تابعی از دما در فشار ۱۰۰۰ اتمسفر به شکل معادله ۱۰ نوشته می‌شود [۱۰]. این رابطه برای فشارها و یا گازهای دیگر متفاوت خواهد بود.

به صورت تابعی بر حسب دما استخراج شود. در روابط ۱ تا ۳، ضریب هدایت حرارتی آلومینا، زیرکونیا و سیلیکا آورده شده است. در این روابط  $T$  دما بر حسب کلونین و  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی است. رابطه ۱ ضریب هدایت حرارتی در آلومینا را نشان می‌دهد [۸].

$$\lambda_{alumina} = 5.5 + 34.5 \times \exp(-0.0033 \times (T - 273)) \quad (1)$$

در رابطه ۲ ضریب هدایت حرارتی زیرکونیا آورده شده است [۹].

$$\lambda_{zirconia} = 2.59961289 \times 10^{-15} \times T^5 - 1.24931731 \times 10^{-11} \times T^4 + 2.23388034 \times 10^{-8} \times T^3 - 1.79536869 \times 10^{-5} \times T^2 + 6.54913498 \times 10^{-3} \times T + 1.21223568 \quad (2)$$

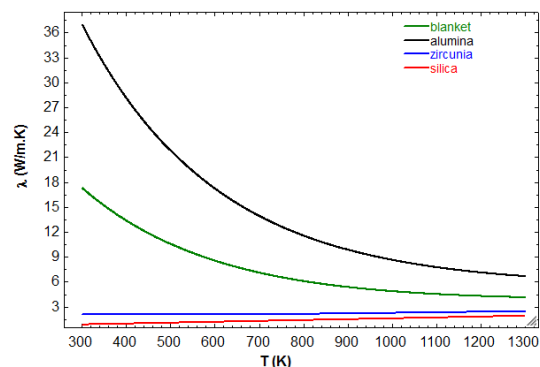
همچنین ضریب هدایت حرارتی سیلیکا با استفاده از معادله آورده شده در رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۹].

$$\lambda_{silica} = 1.05 \times 10^{-3} \times T + 0.54335 \quad (3)$$

با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ و با توجه به درصد وزنی هر یک از سرامیک‌ها در عایق سرامیکی، می‌توان ضریب هدایت حرارتی فاز جامد را از معادله ۴ به دست آورد. در این معادله پارامتر  $u$  نشان دهنده درصد وزنی هر یک از سرامیک‌های حاضر در عایق سرامیکی است.

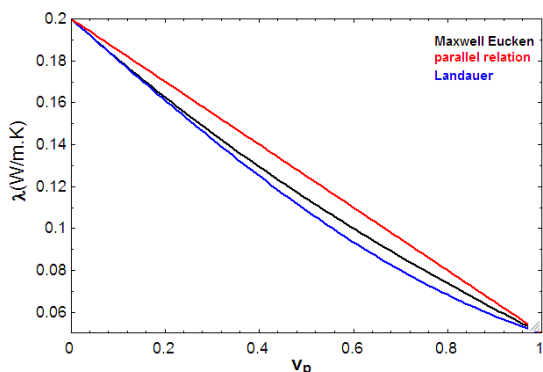
$$\lambda_s = u_{alumina} \times \lambda_{alumina} + u_{zirconia} \times \lambda_{zirconia} + u_{silica} \times \lambda_{silica} \quad (4)$$

نمودار شکل ۱ برای عایق سرامیکی با درصدهای وزنی ۴۵٪ آلومینا، ۴۰٪ سیلیکا و ۱۵٪ زیرکونیا و بدون در نظر گرفتن تخلخل رسم شده است.



شکل ۱- نمودار تغییرات ضریب هدایت حرارتی عایق سرامیکی جامد با دما بدون در نظر گرفتن تخلخل

انتقال حرارت تشعشی، نوع اصلی انتقال حرارت است. برای به دست آوردن ضریب هدایت حرارتی معادل با تشعشع در محیط متخلخل، از رابطه ۱۴ استفاده می‌شود. این رابطه تأثیر انتقال حرارت تشعشی از طریق تخلخل موجود در محیط متخلخل را به صورت ضریب هدایت حرارتی در می‌آورد [۱]. در معادله ۱۴،  $\beta$  ضریب کاهش نور محیط متخلخل و  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن است.



شکل ۲- مقایسه روابط ماکسول، لاندور و موازی

$$\lambda_{RadiationBlanket} = \frac{16 \sigma}{3 \beta} n^2 \left( \frac{(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{4} \right) \quad (14)$$

در عایق‌های چندلایه، از فلزات با ضریب صدور پایین به‌عنوان سپرهای تشعشی استفاده می‌شود. اگر فرض شود که سپرهای تشعشی بتوانند یکدیگر را از منافذ محیط متخلخل ببینند، در این صورت انتقال حرارت تشعشی بین این دو سپر وجود خواهد داشت. مساحتی که دو سپر یکدیگر را می‌بینند را می‌توان با استفاده از درصد تخلخل محیط متخلخل به دست آورد. جهت دستیابی به جواب دقیق‌تر، این انتقال حرارت نیز باید مورد توجه قرار گیرد [۵]. در رابطه ۱۵ که بیانگر مقاومت تشعشی مستقیم بین دو سپر تشعشی متوالی است،  $\varepsilon$  ضریب صدور سپر تشعشی،  $A$  مساحت سطح سپرها،  $A_p$  مساحت تصویر عایق متخلخل روی سپرها و  $r$  شعاع انحنای سپرهای تشعشی (در عایق‌های چندلایه استوانه‌ای) است.

$$R_{RadiationScreen} = \frac{\frac{1}{\varepsilon} + \left[ \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right] \frac{r_1}{r_2}}{\left[ (A - A_p) \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) \right]} \quad (15)$$

$$\lambda_{argon} = 2.93155384 \times 10^{-19} \times T^6 - 1.51156978 \times 10^{-15} \times T^5 + 3.24344853 \times 10^{-12} \times T^4 - 3.75792955 \times 10^{-9} \times T^3 + 2.52465160 \times 10^{-6} \times T^2 - 9.37194415 \times 10^{-4} \times T + 0.201649028 \quad (10)$$

برای محیط‌های متخلخل در مجاورت با گاز روش‌هایی تحلیلی برای توصیف هدایت حرارتی مؤثر  $\lambda$  به صورت تابعی از هدایت حرارتی محیط جامد  $\lambda_s$  هدایت حرارتی گاز موجود در منافذ  $\lambda_p$  و نسبت حجمی منافذ  $v_p$  وجود دارد. برای  $v_p < 0.65$  رابطه‌ی ماکسول<sup>۱</sup> برای تخلخل‌های بسته و رابطه‌ی لاندور<sup>۲</sup> برای تخلخل‌های باز با نتایج عملی تطابق خوبی دارند. این دو رابطه برای  $v_p < 0.15$  تقریباً بر هم منطبق هستند. برای محیط‌هایی که از دو فاز تشکیل شده است، ساده‌ترین رابطه، رابطه‌ی موازی<sup>۳</sup> است، هر چند نتایج آن دارای دقت بالایی نیست [۱۱]. معادلات ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب، معادله ماکسول، معادله لاندور و معادله موازی می‌باشند.

$$\lambda = \lambda_s \left[ \frac{\lambda_p + 2\lambda_s + 2v_p(\lambda_p - \lambda_s)}{\lambda_p + 2\lambda_s - v_p(\lambda_p - \lambda_s)} \right] \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \lambda_p(3v_p - 1) + \lambda_s(2 - 3v_p) + \left( \left( \lambda_p(3v_p - 1) + \lambda_s(2 - 3v_p) \right)^2 + 8\lambda_s\lambda_p \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (12)$$

$$\lambda = \lambda_s(1 - v_p) + v_p\lambda_p \quad (13)$$

شکل ۲ روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ را با یکدیگر مقایسه می‌کند. در این مقاله چون پتوی سرامیکی دارای منافذ باز با درصد تخلخل بالا است، از رابطه لاندور برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل استفاده می‌شود.

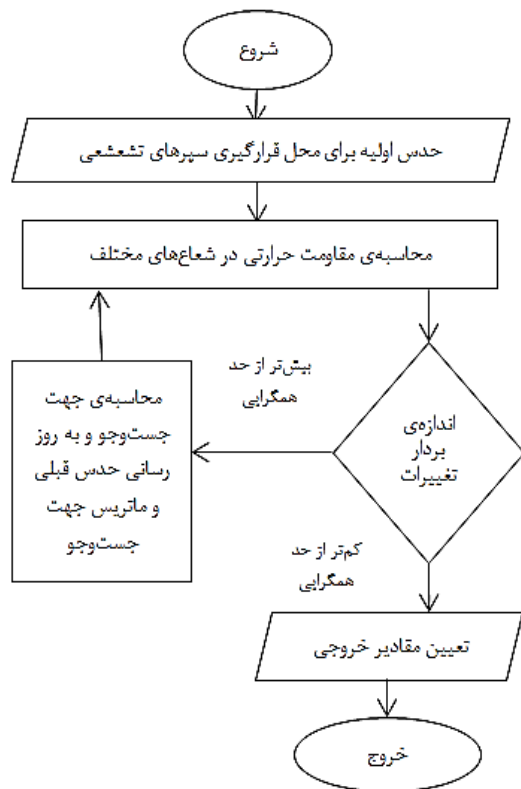
در یک محیط متخلخل، فضای خالی باعث انتقال حرارت تشعشی از این محیط می‌شود. در عایق‌های سرامیکی که دارای تخلخل بالا بوده و در دماهای بالا استفاده می‌شوند،

<sup>1</sup> Maxwell Relation

<sup>2</sup> Landauer Relation

<sup>3</sup> Parallel Relation

استفاده برای محل قرارگیری سپرهای تشعشی در یک عایق حرارتی چندلایه استوانه‌ای شکل آورده شده است.



شکل ۳- فلوچارت مراحل بهینه‌سازی

### ۳- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده با استفاده از این روش، نتایج با نتایج تئوری حاصل از پژوهش انجام شده توسط دریابگی و همکاران [۶] مقایسه شده است. در این پژوهش مطابق شکل ۴، چهار عایق چندلایه با تعداد سپر تشعشی مختلف و ضخامت متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته است. گاز مورد استفاده، گاز نیتروژن در فشار ۱/۴ KPa است و مقایسه در ۴ اختلاف دمایی (بین دو سطح گرم و سرد) ۸۰، ۴۰۰، ۷۴۰ و ۹۵۰ کلوین صورت گرفته است. جنس پوشش سپرهای تشعشی از طلا بوده و ضخامت آن‌ها بسیار کم است، بطوریکه مقدار آن در محاسبات صفر در نظر گرفته شده است.

گاز موجود در منافذ محیط متخلخل در عایق‌های چندلایه علاوه بر انتقال حرارت هدایتی، دارای انتقال حرارت تشعشی نیز است که مقدار مقاومت حرارتی تشعشی حاصل از این گازها، از رابطه ۱۶ به دست می‌آید. این رابطه برای محیط متخلخلی است که در بین دو سپر تشعشی قرار گرفته باشند [۱۲]. پارامترهای موجود در رابطه ۱۶، در روابط ۱۷ تا ۱۹ آمده است.

$$R_{\text{RadiationBlanket}} = \frac{\frac{1}{\varepsilon} + \left[ \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right] \frac{r_1}{r_2} + \beta\tau}{A_p n^2 \sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2)} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{2SB + \alpha}{S + \alpha} \quad (17)$$

$$\tau = (S + \alpha)L \quad (18)$$

$$\omega = \frac{S}{S + \alpha} \quad (19)$$

در روابط ۱۶ تا ۱۹،  $S$  مربوط به مقدار پراکندگی محیط متخلخل،  $\alpha$  مربوط به مقدار جذب محیط متخلخل و  $\omega$  ضریب آلبدو<sup>۱</sup> نام دارد که از نسبت مقدار پراکندگی به مقدار استهلاکی (مجموع پراکندگی و جذب) کل محیط متخلخل به دست می‌آید.  $\tau$  نیز ضخامت نوری است.

### ۲-۲- فرآیند بهینه‌سازی

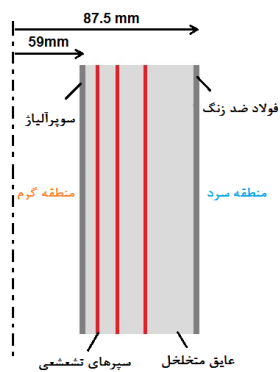
اگر درجه آزادی مسئله‌ای بیش‌تر از یک باشد، برای بهینه‌سازی آن بایستی از روش‌های چند بعدی استفاده گردد. در این مقاله فاصله بین سپرهای تشعشی متوالی (یا ضخامت عایق بین سپرهای تشعشی متوالی)، با استفاده از بهینه‌سازی تعیین شده است. اگر فاصله بین هر دو سپر تشعشی متوالی، یک بعد از بهینه‌سازی را تشکیل دهد، آنگاه به عنوان مثال برای  $n$  سپر تشعشی متوالی جهت رسیدن به مقدار کمینه ضریب هدایت حرارتی مؤثر،  $n$  بعد بهینه‌سازی وجود خواهد داشت که بایستی به صورت همزمان بهینه گردند؛ در نتیجه لازم است تا برای بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی چند بعدی استفاده شود.

در این مقاله از روش پاول برای بهینه‌سازی چندبعدی استفاده شده است. در شکل ۳، فلوچارت بهینه‌سازی مورد

<sup>۱</sup> Albedo

#### ۴- تعریف مسئله

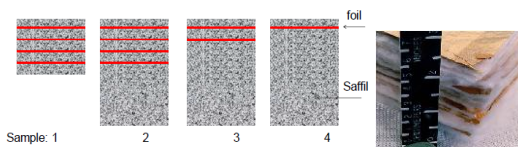
شکل شماتیک عایق حرارتی چندلایه مورد بررسی در این مقاله، در شکل ۶ نشان داده شده است. لایه داخلی از جنس سوپر آلیاژ هاستلوی ایکس بوده، جنس لایه خارجی و سپرهای تشعشی از فولاد ضدزنگ ۳۰۴ است؛ همچنین عایق حرارتی سرامیکی متخلخل مورد استفاده در بین لایه‌ها و سپرهای تشعشی، از ترکیب دو ماده آلومینا و سیلیکا با چگالی  $96 \frac{kg}{m^3}$  است. دمای سطح داخلی برابر با  $1200^\circ C$  و دمای سطح سرد خارجی، برابر با  $50^\circ C$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۶- شماتیک عایق حرارتی چندلایه

با توجه به آنکه هندسه عایق حرارتی به صورت متقارن محوری است، در حل مسئله فرض می‌شود، انتقال حرارت به صورت یک بعدی صورت می‌پذیرد؛ همچنین به دلیل آنکه چگالی عایق مورد استفاده بیش تر از  $20 \frac{kg}{m^3}$  در نظر گرفته شده است، از انتقال حرارت جابجایی صرف نظر شده است [۱].

لازم به ذکر است، مطابق با روابط ارائه شده، مقدار تشعشع و هدایت حرارتی عایق‌ها وابسته به چگالی و دمای کاری آن‌ها است. در دماهای بالا و چگالی کم‌تر، سهم انتقال حرارت تشعشع بیشتر بوده و در دماهای پایین و چگالی بالاتر، نقش انتقال حرارت هدایت پر رنگ‌تر است. با توجه به آنکه در این پژوهش مقاومت حرارتی مؤثر (و ضریب هدایت حرارتی مؤثر) ترکیبی از مقاومت هدایتی و مقاومت تشعشی در نظر گرفته شده است، جهت به دست آوردن مقاومت حرارتی مؤثر در ماده مورد نظر، ماده به المان‌های کوچک تقسیم‌بندی شده، مقاومت برای هر المان به صورت جداگانه



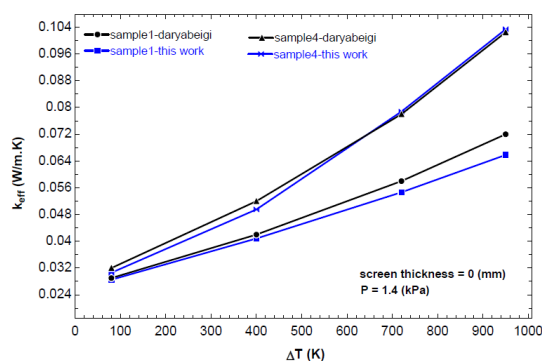
شکل ۴- تصویر عایق حرارتی چندلایه به همراه طرح شماتیک از ۴ نمونه عایق حرارتی چندلایه [۶]

همانطور که در جدول ۱ و شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از کد نرم‌افزاری نوشته شده تطابق خوبی با مقادیر تئوری ارائه شده در مرجع شماره [۶] دارد، بطوریکه حداکثر خطای مشاهده شده در اختلاف دمای ۹۵۰ کلوین، کمتر از ۱۰٪ است. علت اصلی وجود این خطا نیز می‌تواند مربوط به عدم دسترسی به خواص دقیق برخی از مواد مورد استفاده باشد که مقادیر آن‌ها در مرجع مورد نظر ذکر نگردیده است.

جدول ۱- مقایسه نتایج حاصل از کد نوشته شده

با نتایج مرجع [۶]

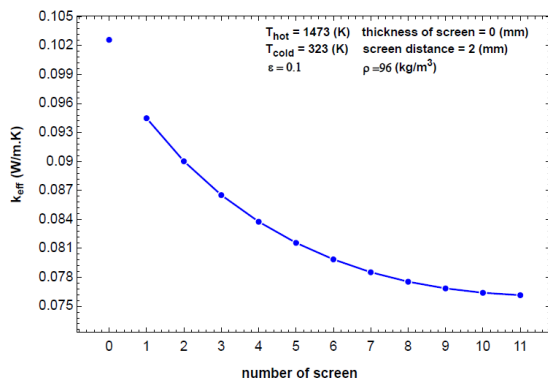
نمونه	اختلاف دما $\Delta T$ (K)	نتایج مرجع [۶] $K_{eff}$ (W/mK)	نتایج کد $K_{eff}$ (W/mK)	درصدخطا (%)
نمونه شماره ۱	۸۰	۰/۰۲۸	۰/۰۲۷	۳/۶
	۴۰۰	۰/۰۴۲	۰/۰۴	۴/۸
	۷۴۰	۰/۰۵۸	۰/۰۵۴	۶/۹
	۹۵۰	۰/۰۷۲	۰/۰۶۵	۹/۷
نمونه شماره ۴	۸۰	۰/۰۳۱	۰/۰۲۹	۶/۵
	۴۰۰	۰/۰۵	۰/۰۴۹	۲
	۷۴۰	۰/۰۷۸	۰/۰۷۹	۱/۳
	۹۵۰	۰/۱۰۲	۰/۱۰۳	۱



شکل ۵- اعتبارسنجی نتایج حاصل از کد نوشته شده با نتایج مرجع [۶]

برابر با ۲mm در نظر گرفته شده است؛ همچنین ضریب صدور سپرهای تشعشعی ۰/۱ فرض گردیده است.

مطابق شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سپرهای تشعشعی با فرض ناچیز گرفتن ضخامت سپرها، ضریب هدایت حرارتی مؤثر کل کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در عایق حرارتی چند لایه با یازده سپر تشعشعی در مقایسه با عایق بدون سپر، ضریب هدایت حرارتی مؤثر در حدود ۰/۲۶٪ کاهش می‌یابد. از آنجایی که در عمل امکان برقراری همچنین فرضی وجود ندارد، تأثیر ضخامت این لایه‌ها بر رفتار عایق حرارتی نیز باید مورد بررسی قرار بگیرد.



شکل ۷- تأثیر تعداد سپر تشعشعی بر ضریب هدایت مؤثر

#### ۵-۲- تأثیر ضخامت سپرهای تشعشعی

شکل ۸ تأثیر سپرهای تشعشعی با ضخامت‌های صفر، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ میلی‌متر را بر ضریب هدایت حرارتی مؤثر عایق چندلایه نشان می‌دهد. در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت سپرهای تشعشعی، ضریب هدایت حرارتی مؤثر کل عایق افزایش می‌یابد. وقتی برای سپرهای تشعشعی ضخامت در نظر گرفته می‌شود، محدودیتی در استفاده از تعداد سپرها (با در نظر گرفتن یک ضخامت ثابت) به وجود آمده و با افزایش بیش از حد آن‌ها، ضریب هدایت حرارتی مؤثر افزایش می‌یابد؛ در نتیجه با توجه به ضخامت سپرها، تعداد آن‌ها می‌تواند بهینه‌سازی گردد. بعلاوه هر چه ضخامت سپرهای تشعشعی افزایش می‌یابد، نقطه کمینه ضریب هدایت حرارتی در تعداد کمتر سپر تشعشعی رخ می‌دهد. این بدان جهت است که با افزایش ضخامت سپرها، تأثیر آن‌ها در انتقال حرارت به روش هدایتی پر رنگ‌تر

محاسبه گردیده است. دلیل اصلی این کار، وابستگی بالای مقاومت هدایتی و مقاومت تشعشعی به دما است؛ در نتیجه نسبت انتقال حرارت تشعشعی به هدایتی با توجه به دمای المان متفاوت خواهد بود. سپس مقاومت مؤثر این المان‌ها که به صورت متوالی قرار گرفته‌اند، با یکدیگر جمع شده تا مقاومت حرارتی کل به دست آید.

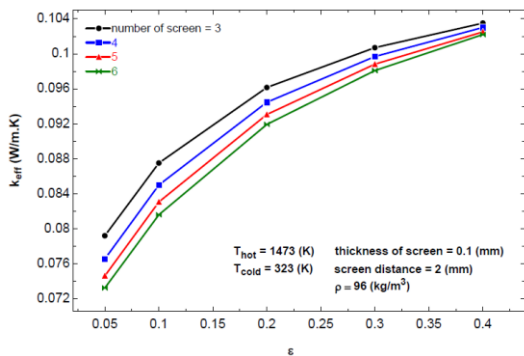
کد محاسباتی و بهینه‌سازی جهت حل مسئله مورد نظر در نرم‌افزار EES نوشته شده است. دقت محاسبات انجام شده تابعی از تعداد المان‌بندی و نیز معیار همگرایی در بهینه‌سازی است. جهت تعیین تعداد المان مناسب، حساسیت‌سنجی نتایج نسبت به تعداد المان با در نظر گرفتن همگرایی با اختلاف کمتر از ۱ درصد برای ضریب هدایت حرارتی مؤثر، انجام گرفته است؛ همچنین در مورد کد بهینه‌سازی، معیار همگرایی برای دستیابی به ضریب هدایت حرارتی مؤثر کمینه، رسیدن به دقت ۰/۱mm برای فاصله بین سپرها است.

#### ۵- نتایج و بحث

یکی از پارامترهای بسیار مهم در عایق‌های حرارتی چندلایه، ضریب هدایت حرارتی مؤثر کل عایق است. در واقع ضریب هدایت حرارتی مؤثر کل، در برگیرنده کلیه اثرات هدایتی و تشعشعی است. در ادامه تأثیر تعداد سپرهای تشعشعی، ضخامت، ضریب صدور و فاصله آنها بر ضریب هدایت حرارتی مؤثر کل عایق چندلایه، مورد بررسی قرار گرفته و در انتها نتایج برای فاصله بین سپرها بهینه می‌شود.

#### ۵-۱- تأثیر تعداد سپرهای تشعشعی

در عایق‌های حرارتی متخلخلی که در دماهای بالا کاربرد دارند، انتقال حرارت تشعشعی نوع اصلی انتقال حرارت می‌باشد. برای کاهش انتقال حرارت تشعشعی بین دو سطح اصلی عایق، از سپرهای تشعشعی با ضریب صدور کم (ضریب انعکاس زیاد) استفاده می‌شود. وجود سپر تشعشعی، مقاومت کل را افزایش داده، باعث کاهش نرخ انتقال گرمای تشعشعی می‌شود. تأثیر تعداد سپرهای تشعشعی بر ضریب هدایت حرارتی مؤثر کل عایق چندلایه در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است. در این نمودار جهت بررسی اثر تعداد لایه‌ها، ضخامت سپرهای تشعشعی ناچیز و فاصله‌ی بین آن‌ها ثابت و



شکل ۹- تأثیر ضریب صدور سپرها بر ضریب هدایت مؤثر

#### ۵-۴- تأثیر فاصله بین سپر تشعشی

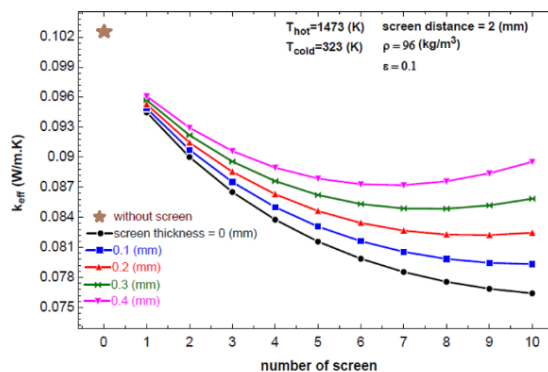
یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی عایق حرارتی چندلایه، تعیین فاصله چیدمان سپرهای تشعشی است. این فاصله تأثیر زیادی در ضریب هدایت حرارتی مؤثر دارد. ابتدا فرض می‌شود، فاصله بین تمامی سپرهای موجود در عایق حرارتی چندلایه، با یکدیگر یکسان باشد. در این حالت مطابق با نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که یک فاصله بهینه برای قرارگیری سپرهای تشعشی وجود داشته که در این فاصله کمترین مقدار ضریب هدایت حرارتی مؤثر قابل دسترسی است. اگرچه در فواصل کم سپرهای تشعشی تأثیر سپرها در انعکاس انرژی گرمایی تشعشی افزایش می‌یابد، اما ضخامت عایق سرامیکی مابین آن‌ها کم و باعث می‌شود، ضریب کاهش نور یا ضریب انهدام کاهش یابد؛ در نتیجه تأثیر عایق سرامیکی میان دو سپر در مقابل تشعشع کاهش یافته و تشعشع در میان سپرها افزایش می‌یابد؛ همچنین زمانی که فاصله میان سپرها بیش از حد افزایش یابد، ضخامت عایق سرامیکی میان سپرها نیز افزایش یافته و باعث افزایش ضریب کاهش نور می‌شود. با افزایش این ضریب اگرچه دید سپرها نسبت به هم کم شده، می‌تواند سبب کاهش گذر تشعشع از عایق متخلخل گردد، اما به دلیل قرارگیری سپرهای تشعشی در مناطقی با دمای پایین‌تر از تأثیر آنها در انعکاس انرژی گرمایی تشعشی کاسته می‌شود؛ در نتیجه ممکن است ضریب هدایت حرارتی مؤثر افزایش می‌یابد؛ بنابراین همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، با یکسان فرض کردن فاصله در بین تمامی سپرها، یک فاصله بهینه جهت دستیابی به ضریب هدایت حرارتی مؤثر کمینه وجود دارد. مطابق نتایج شکل ۱۰، بعنوان مثال ضریب هدایت

می‌شود. اگر ضخامت سپرهای تشعشی ناچیز در نظر گرفته شود، با افزایش تعداد سپرها همواره ضریب هدایت حرارتی مؤثر کاهش می‌یابد؛ اما برای سپرهایی با ضخامت ۰/۴mm، تعداد بهینه سپرها برابر با ۷ عدد خواهد بود.

#### ۵-۳- تأثیر ضریب صدور سپر تشعشی

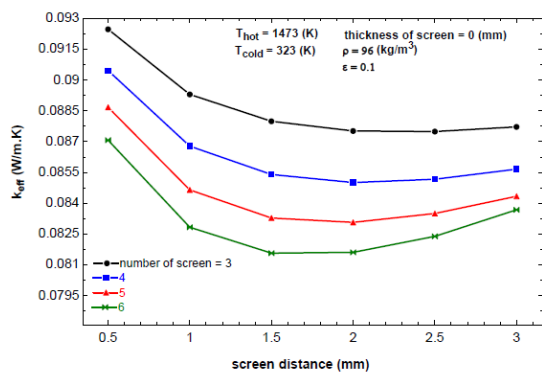
از مهم‌ترین خواص سپرهای تشعشی که باید مدنظر قرار گیرد، ضریب صدور آن است. بدیهی است که هر چه ضریب صدور سپر تشعشی کم‌تر باشد (یا ضریب انعکاس آن بیشتر باشد)، نرخ انتقال حرارت تشعشی به میزان بیشتری کاهش یافته و این امر باعث افزایش مقاومت حرارتی عایق چندلایه می‌شود. لازم به ذکر است، ضریب صدور طلا در دماهای بالا تا حدود دمای ۹۰۰ °C، در حدود ۰/۰۵ بوده و می‌تواند به عنوان پوشش روی سپرهای تشعشی مورد توجه قرار گیرد؛ اما استفاده از موادی که در دماهای بالا اکسید شده و یا شفافیت خود را از دست می‌دهند، در دماهای نسبتاً بالا تأثیر چندانی بر ضریب هدایت حرارتی مؤثر ندارد. در شکل (۹)، تأثیر ضریب صدور سپرها بر ضریب هدایت حرارتی مؤثر نشان داده شده است.

مطابق شکل ۹، اثر افزایش ضریب صدور بر افزایش ضریب هدایت حرارتی مؤثر عایق چندلایه کاملاً مشهود است. به عنوان مثال برای عایقی با شش سپر تشعشی، با افزایش ضریب صدور از ۰/۰۵ به ۰/۴، مقدار ضریب هدایت حرارتی مؤثر در حدود ۴۰٪ افزایش می‌یابد؛ همچنین در ضریب صدورهای بالاتر اختلاف ضریب هدایت حرارتی مؤثر برای عایق‌هایی با تعداد سپر مختلف کاهش یافته و در نتیجه تأثیر استفاده از سپرهای تشعشی کاهش می‌یابد.

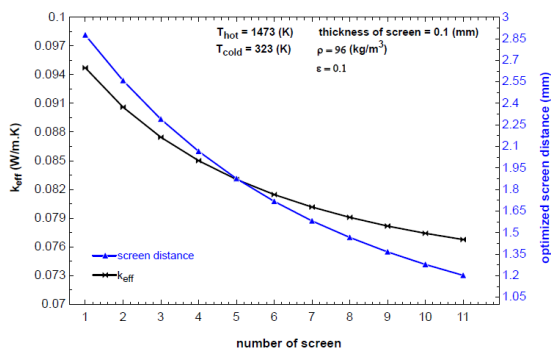


شکل ۸- تأثیر ضخامت سپر تشعشی بر ضریب هدایت مؤثر





شکل ۱۰- تأثیر فاصله بین سپرهای تشعشعی بر ضریب هدایت مؤثر



شکل ۱۱- بهینه‌سازی فاصله‌ی بین سپرهای تشعشعی

نکته قابل توجه در این قسمت آن است که با توجه به یکسان فرض کردن فاصله بین سپرهای تشعشعی، انجام چیدمان سپرها مطابق با شکل ۱۱ منجر به دستیابی به کمینه انتقال حرارت ممکن نخواهد شد؛ در نتیجه بهترین حالت ممکن زمانی بدست خواهد آمد که در یک عایق فاصله بین تمامی سپرهای تشعشعی نیز بصورت جداگانه بهینه‌سازی گردد. نتایج حاصل از این بهینه‌سازی، در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول که سپرهای تشعشعی از سمت ناحیه گرم به طرف ناحیه سرد چیده شده، بر خلاف شکل ۱۱ فاصله بین سپرها یکسان فرض نشده است. در نتیجه برای یک عایق حرارتی با  $n$  سپر تشعشعی، با حل یک مسئله بهینه‌سازی  $n$  بعدی، فاصله بین سپرها به منظور دستیابی به ضریب هدایت حرارتی مؤثر کمینه بهینه گشته است.

حرارتی مؤثر برای عایقی با سه سپر تشعشعی در چیدمان سپرها با فواصل ۰/۵mm، ۱/۵mm و ۳mm به ترتیب برابر با  $0.087 \frac{W}{mK}$ ،  $0.0815 \frac{W}{mK}$  و  $0.083 \frac{W}{mK}$  خواهد بود که نشان دهنده وجود یک فاصله بهینه در بازه مذکور است.

### ۵-۵- بهینه‌سازی فاصله‌ی بین سپرهای تشعشعی

در این بخش ابتدا فاصله بین سپرهای تشعشعی در عایق حرارتی چندلایه با فرض یکسان بودن فاصله بین تمامی سپرها بهینه‌سازی می‌شود. سپس فرآیند بهینه‌سازی بدون در نظر گرفتن قید یکسان بودن فاصله سپرها صورت می‌پذیرد. هدف بهینه‌سازی دستیابی به کمینه مقدار ضریب هدایت حرارتی مؤثر در عایق‌های حرارتی چندلایه با تعداد سپرهای مختلف است.

در شکل ۱۱ فاصله بین سپرهای تشعشعی با فرض یکسان بودن فاصله بین تمامی سپرها برای عایق‌هایی با تعداد سپرهای تشعشعی متفاوت بهینه‌سازی شده است. در واقع فاصله‌ی بین سپرها، مساوی با مقدار مجهول  $x$  در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی بصورت تک بعدی انجام شده است.

مطابق شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد سپرهای تشعشعی، فاصله بهینه بین سپرهای تشعشعی برای دستیابی به مقدار ضریب هدایت حرارتی کمینه، کاهش می‌یابد (هر چند با افزایش بیش از حد تعداد سپرهای تشعشعی، ضریب هدایت حرارتی مؤثر کل عایق دوباره افزایش خواهد یافت). در واقع ابتدا با افزایش تعداد سپرهای تشعشعی، با توجه به نقش قابل توجه این سپرها در کاهش انتقال حرارت تشعشعی، مقدار ضریب هدایت حرارتی مؤثر کل عایق کاهش می‌یابد. به مرور و با افزایش بیشتر تعداد سپرهای تشعشعی، از تأثیر آنها کاسته شده است و با افزایش بیش از حد تعداد سپرها (بعلت تأثیر نامطلوب آنها در افزایش انتقال حرارت هدایتی)، ضریب هدایت حرارتی مؤثر کل عایق دوباره افزایش خواهد یافت. از طرفی از آنجایی که انتقال حرارت تشعشعی در محیط‌هایی با دمای بالا چشمگیرتر است، در نتیجه نیاز به سپرهای تشعشعی در این نوع محیط‌ها نیز بیشتر خواهد بود. علت کاهش فاصله بهینه بین سپرها با افزایش تعداد آنها، فرارگرفتن و تمرکز بیشتر آنها در ناحیه گرم‌تر است.

جدول ۲- فاصله‌ی بهینه برای سپرهای تشعشی برای دستیابی به کمینه مقدار ضریب هدایت حرارتی مؤثر

تعداد سپرهای تشعشی										
۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
۰/۸۱۲۸	۰/۸۷۵۱	۰/۹۴۷۸	۱/۰۳۴	۱/۱۳۷	۱/۲۶۳	۱/۴۱۹	۱/۶۲۰	۱/۸۸۸	۲/۲۲۷	۲/۸۷۶
۰/۸۶۰۱	۰/۹۳۲۴	۱/۰۱۶	۱/۱۱۷	۱/۲۴۲	۱/۳۹۹	۱/۶۰۲	۱/۸۸۱	۲/۲۸۸	۲/۹۶۸	
۰/۹۱۶۱	۰/۹۹۹۲	۱/۰۹۸	۱/۲۲۲	۱/۳۷۷	۱/۵۸۰	۱/۸۶۲	۲/۲۸۶	۳/۰۲۷		
۰/۹۸۰۹	۱/۰۷۹	۱/۲۰۰	۱/۳۵۳	۱/۵۵۴	۱/۸۲۶	۲/۲۷۰	۳/۰۵۲			
۱/۰۵۹	۱/۱۷۸	۱/۳۲۹	۱/۵۲۸	۱/۸۰۷	۲/۲۴۲	۳/۰۵۴				
۱/۱۵۵	۱/۳۰۵	۱/۵۰۰	۱/۷۷۹	۲/۲۱۰	۳/۰۲۰					
۱/۲۷۸	۱/۴۷۴	۱/۷۴۵	۲/۱۷۹	۳/۰۰۲						
۱/۴۴۲	۱/۷۱۵	۲/۱۳۹	۲/۹۶۳							
۱/۶۷۷	۲/۰۹۹	۲/۹۱۵								
۲/۱۱۵	۲/۸۶۱									
۲/۸۱۰										

فاصله‌ی بهینه بین سپرهای تشعشی  
به ترتیب قرارگیری (mm)

تشعشی مورد بحث و بررسی قرار گرفت؛ همچنین فاصله سپرهای تشعشی به‌عنوان یکی از مهمترین عوامل در تعیین رفتار عایق حرارتی چندلایه، بهینه‌سازی شد.

نتایج نشان دهنده کاهش ضریب هدایت حرارتی مؤثر عایق چندلایه با کاهش ضریب صدور و ضخامت سپرهای تشعشی است. اهمیت مقدار ضریب صدور در تأثیر سپرهای سیر تشعشی بسیار زیاد بوده و بعنوان مثال برای عایقی با شش سپر تشعشی، با افزایش ضریب صدور از ۰/۰۵ به ۰/۴ مقدار ضریب هدایت حرارتی مؤثر در حدود ۴۰٪ افزایش می‌یابد. تعداد سپرها و نیز نحوه چیدمان آنها بایستی با توجه به مقدار دو عامل ضریب صدور و ضخامت سپرها، بهینه گردد. طبق نتایج حاصل از بررسی، تأثیر تعداد سپرهای استفاده شده بر روی ضریب هدایت حرارتی مؤثر مشاهده می‌شود، در عایق حرارتی با یازده سپر تشعشی در مقایسه با عایق بدون سپر، ضریب هدایت حرارتی مؤثر در حدود ۲۶٪ کاهش می‌یابد که مقداری قابل ملاحظه‌ای (مخصوصاً در مصارف فضایی که مقدار ضریب هدایت حرارتی مؤثر بسیار با اهمیت است) است. بهینه‌سازی فاصله بین سپرهای تشعشی با دو فرض یکسان بودن فاصله بین تمامی سپرها و نیز عدم در نظر گرفتن فرض مذکور انجام پذیرفت. مطابق با نتایج بهینه‌سازی

نتایج نشان‌دهنده آن است که در حالت بهینه در سمت گرم فاصله بین سپرهای تشعشی به یکدیگر نزدیک‌تر بوده، هر چه فاصله شعاعی از سمت صفحه گرم عایق بیشتر شود، فاصله سپرها نیز از یکدیگر افزایش می‌یابد. علت این امر تأثیر بیشتر سپرهای تشعشی در زمان قرارگیری در محیط‌هایی با دماهای بالاتر است. در واقع با کاهش دما از سمت منطقه گرم به سمت منطقه سرد، سهم انتقال حرارت تشعشی از کل انتقال حرارت موجود کمتر شده، در نتیجه نیاز به نزدیک بودن سپرهای تشعشی کاهش می‌یابد.

بعنوان مثال فاصله بهینه (با فرض یکسان بودن فاصله بین سپرهای تشعشی) برای عایقی با یازده سپر تشعشی مطابق با شکل ۱۱ برابر با ۱/۲mm است، در حالی که اگر فواصل بین تمامی سپرها مطابق با جدول ۲ بهینه‌سازی شود، این فاصله از ۰/۸۱mm در ناحیه گرم شروع و به ۲/۸۱mm در ناحیه سرد افزایش خواهد یافت.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پارامترهای مؤثر بر ضریب هدایت حرارتی مؤثر عایق حرارتی چندلایه در سپرهای تشعشی شامل تعداد، ضخامت، ضریب صدور و همچنین چیدمان سپرهای

- [5] Bapat SL, Narayankhedkar KG, Lukose TP (1990) Performance prediction of multilayer insulation. *Cryogenics* 30(8): 700-710.
- [6] Daryabeigi K, Miller S, Cunnington G (2006) Heat transfer in high-temperature multilayer insulation. *Thermal Protection Systems and Hot Structures* (1): 1-8.
- [۷] معرفت م، اسماعیلی ا (۱۳۹۳) تحلیل انتقال حرارت ترکیبی هدایت تابش در عایق های چندلایه ۵۶-۴۷ (۱): ۴۶.
- [8] Auerkari P (1996) Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics. *Tech Res Cent Finl* 1792: 26.
- [9] Shackelford JF, Alexander W (2001) *Materials science and engineering handbook*. 3rd edn. Boca Raton: CRC Press LLC.
- [10] Vargaftik NB (1975) *Handbook of physical properties of liquids and gases*. Moscow Aviation Institute.
- [11] Smith DS, Alzina A, Bourret J, Nait-Ali B, Pennec F, Tessier-Doyen N, Otsu K, Matsubara H, Elser P, Gonzenbach UT (2013) Thermal conductivity of porous materials. *J Mater Res* 28(17): 2260-2272.
- [12] Kaviany M (1995) *Principles of heat transfer in porous media, mechanical engineering series*. 2nd edn. Springer.

انجام شده، فاصله سپرهای تشعشعی در سمت گرم عایق حرارتی چندلایه بهینه به یکدیگر نزدیک تر بوده و هر چه فاصله شعاعی از سمت صفحه گرم عایق بیشتر شود، فاصله بهینه سپرها نیز از یکدیگر افزایش می یابد. این اتفاق به آن دلیل رخ می دهد که با کاهش دما از سمت صفحه گرم به سمت صفحه سرد، سهم انتقال حرارت تشعشعی از کل انتقال حرارت موجود کاهش یافته و در نتیجه نیاز به نزدیک بودن سپرهای تشعشعی کاهش می یابد.

## ۷- مراجع

- [1] Spinnler M, Winter ERF, Viskanta R, Sattelmayer T (2004) Theoretical studies on high-temperature multilayer thermal insulations using radiation scaling. *J Quant Spectrosc Radiat Transf* 84: 477-491.
- [2] Finckenor MM, Dooling D (1999) Multilayer insulation material guidelines. NASA/TP- 209263
- [3] Spinnler M, Winter ERF, Viskanta R (2004) Studies on high-temperature multilayer thermal insulations. *Int J Heat Mass Transf* 47(6-7): 1305-1312.
- [4] Keller K, Haffmann M, Zorner W, Blumenberg J (1992) Application of high temperature multilayer insulations. *Acta Astronaut* 26(6): 451-458.