

# بهبود کارایی و بررسی انتقال حرارت در ایروژل‌های ساختار گرادایانی سیلیکا با تغییر قطر حفرات

مینا نوروزی، مهیار پناهی سرمد، احمدرضا بهرامیان\*

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۱۴-۱۴۱۱۵

## چکیده

در ایروژل‌های با ساختار گرادایانی، تغییر قطر حفرات در ضخامت بر هدایت حرارتی مؤثر، تأثیرگذار است. از آنجا که قطر حفرات با چگالی رابطه‌ی عکس دارد، عامل نسبت هدایت حرارتی مؤثر به چگالی ایروژل (B) تعریف می‌شود. کمترین مقدار B نشان‌دهنده‌ی شرایط بهینه ایروژل است. هدف این پژوهش، بهبود و شبیه‌سازی انتقال حرارت در ایروژل‌های ساختار گرادایانی برای بررسی تأثیر تغییر ساختار در ضخامت نمونه نسبت به ساختارهای همگن است. بدین منظور از داده‌های خواص و ساختار ایروژل سیلیکا استفاده شده و همچنین اثر هدایت حرارتی به هم‌پیوستگی کلویدها در نظر گرفته شد. تغییرات انتقال حرارت با استفاده از نرم‌افزار کامسول برای ساختار همگن با کمترین چگالی (L)، بالاترین چگالی (H) و با کمترین مقدار عامل B که عنوان ساختار بهینه (OPT) معرفی شده، بررسی و با میزان انتقال حرارت در ایروژل‌های ساختار گرادایانی شبیه‌سازی شده، مقایسه شد. ایروژل‌های ساختار گرادایانی شبیه‌سازی شده در دو حالت از چگالی بالا به پایین (HtL) و چگالی پایین به بالا (LtH) طراحی و روند تغییرات دما با زمان در هر دو حالت مطالعه شده است. در نتایج به دست آمده، ایروژل ساختار گرادایانی LtH، کمترین میزان انتقال حرارت را نشان داده (افزایش بازده ۲ درصدی ساختار گرادایانی LtH نسبت به ساختار بهینه (OPT)) و به عنوان بهترین ساختار برای ایجاد عایق حرارتی پیشنهاد می‌شود.

پژوهش‌های کاربردی  
مهندسی شیمی - پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین‌رشته‌ای

سال دوم، شماره ۳، نسخه ۱،

پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۵۰-۴۱

## واژه‌های کلیدی

ایروژل سیلیکا  
ساختار گرادایانی  
انتقال حرارت  
شبیه‌سازی

\*مسئول مکاتبات:

abahramian@modares.ac.ir

## ۱ مقدمه

جلوگیری از اتلاف انرژی یکی از چالش‌های پیش‌رو برای بهبود سطح کیفیت زندگی است. امروزه ابرعایق‌های حرارتی در انواع مختلف با توجه به نوع ساخت آن و مواد به کار رفته، کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، پتروشیمی، ساختمان‌سازی و زمینه‌های دیگر دارند. پیشرفت و بهبود عملکرد این ابرعایق‌ها از نظر ضخامت، ساخت ارزان و کاربردی، موضوع بسیاری از پژوهش‌های روز در دنیا است [۱].

در سال‌های اخیر استفاده از ایروزل‌ها به عنوان عایق مورد توجه محققان قرار گرفته است. این مواد دسته‌ی جدیدی از جامدات هستند که توانایی به کارگیری در کاربردهای متنوع به ویژه عایق‌های حرارتی را دارند [۲]. ایروزل‌ها به مواد اَبَرمتخلخلی گفته می‌شود که به علت داشتن ویژگی‌های یکسان مانند تخلخل بالا (بیش از ۸۰٪)، حفرات نانومتری، ریزساختار متشکل از ذرات شبه کلوییدی به هم پیوسته با ابعاد مشخصه در مقیاس ۱۰ نانومتر، مساحت سطح ویژه بالا (بین ۴۰۰ تا ۱۴۰۰ متر مربع بر گرم)، رسانندگی حرارتی کم و امکان کنترل ریزساختار در مقیاس نانومتری در یک دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳]. ایروزل‌ها و اسفنج‌های کربنی یکی از مورد توجه‌ترین مواد اَبَرمتخلخل آلی هستند که برای اولین بار توسط پکالا و به روش پلیمری شدن تراکمی مونومرهای رزورسینول و فرمالدهید در محیط آبی در اواخر دهه ۸۰ میلادی سنتز شدند [۴]. عوامل گوناگونی از جمله نوع مواد اولیه، نسبت اولیه‌ی محلول و روش‌های خشک کردن بر خواص، ریزساختار و چگالی ایروزل نهایی تأثیرگذار است.

از طرفی، مواد گرادایانی دسته‌ای از مواد هستند که با تغییر در خواص، وابسته به تغییر در بعد توصیف می‌شوند. این مواد شامل یک یا چند ماده هستند که کسر حجمی، میزان تخلخل یا هر خاصیت دیگر آن‌ها به آرامی و به طور پیوسته در بعد مورد نظر تغییر می‌کند. این مواد به طور وسیعی شامل ترکیب مواد ناهمسان بدون هیچ گونه سطح میانی و به صورت یکپارچه برای ایجاد

ماده‌ی جدید با عملکرد جدید طراحی می‌شوند [۵]. در واقع گرادایان در سطح ریز ساختار جایگزین سطح میانی می‌شود که ناشی از انتقال آرام از یک خاصیت به خاصیت بعدی است [۶]. در حقیقت می‌توان این مواد را جایگزین مواد همگن در شرایط مشابه کرد که توانایی انجام وظایف پیچیده‌تری را دارند [۵و۶]. مواد گرادایانی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: الف) گرادایان در فاز توده ماده و ب) گرادایان در سطح ماده [۶]. به طور کلی روش‌های فرآوری مواد گرادایانی به سه دسته‌ی فرآوری حالت مایع، فرآوری حالت جامد و فرآوری چیدمان تقسیم می‌شوند [۵].

ایروزل‌های ساختار گرادایانی با هدف بهبود عملکرد عایق‌های حرارتی و با ترکیب این دو دسته، ایروزل‌ها و مواد ساختار گرادایانی، ایجاد می‌شوند. در ایروزل‌های ساختار گرادایانی تغییر قطر حفرات در ضخامت نمونه باعث ایجاد گرادایان تخلخل در نمونه می‌شود. با توجه به تغییر قطر حفرات و میزان تخلخل، خواص نمونه در طول گرادایان ایجاد شده تغییر می‌کند. در بررسی مقالات، دو روش برای ساخت ایروزل‌های گرادایانی معرفی شده است. در روش اول، در تحقیقی که توسط وینگفیلد و همکارانشان [۷] انجام شد، به وسیله‌ی نور مرئی و با استفاده از آغازگرهای نوری، پلیمری شدن از یک سطح انتخابی آغاز شده و بسته به قدرت نفوذ نور در ضخامت نمونه توسعه می‌یابد. نور مرئی به دلیل جذب نشدن و همچنین پراکنده نشدن توسط مولکول‌ها و تکه‌های موجود در ژل خیس، انتخاب شده و اجازه نفوذ کامل به داخل توده ماده را پیدا می‌کند [۷]. روش دوم توسط هیمبرگر و همکارانشان [۸] صورت گرفت. در این روش از نفوذ اسید به داخل محلول سل پلیمری به صورت تدریجی استفاده می‌شود. در این روش اسید به صورت یک لایه بر روی سطح بالایی محلول سل ریخته شده و با توجه به میزان نفوذ اسید به داخل محلول، پلیمری شدن انجام می‌شود [۸]. در هر دو روش در نهایت ایروزل‌های ساختار گرادایانی بدست می‌آید که ساختار به صورت پیوسته تابع نفوذ نور یا کاتالیزور

ایروزل است [۱۱]. در نهایت برای محاسبه سهم سازوکار تابش به طور گسترده از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\lambda_r = \frac{16n^2\sigma_B}{3\rho Es/ps} T^3 \quad (4)$$

$n$  ضریب شکست نور ماده (ضریب شکست نور ماده برای ایروزل‌ها تقریباً برابر یک است)،  $\sigma_B$  ثابت استفان-بولتزمن،  $Es/ps$  ضریب خاموشی ویژه و  $T$  دما است [۱۲].

جدیدترین مدل ارائه شده برای محاسبه هدایت حرارتی بین فاز گاز و جامد، مدل بی [۱۳] است و رابطه‌ی آن به صورت زیر است:

$$\lambda_{g-s} = \frac{D+d_p}{d_p} \frac{2\lambda_p\lambda_g}{\lambda_g-\lambda_p} \left[ 1 - \frac{D+d_p}{d_p} \frac{\lambda_p}{\lambda_g-\lambda_p} \ln\left(1 - \frac{\lambda_g-\lambda_p}{\lambda_p} \frac{d_p}{D+d_p}\right) \right] \quad (5)$$

که در رابطه‌ی بالا  $\lambda_p$  هدایت حرارتی تکه جامد،  $d_p$  اندازه‌ی متوسط تکه و  $D$  اندازه‌ی متوسط حفره در ایروزل است [۱۳]. اما هدایت حرارتی کوپلینگ، با توجه به مدل متخلخل ایده‌آل از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$\lambda_c = \frac{2}{3} \lambda_{g-s} \quad (6)$$

در مقاله‌ای که توسط بی و همکارانشان ارائه شده، تأثیر هدایت حرارتی کوپلینگ بر هدایت حرارتی مؤثر و نحوه‌ی محاسبه‌ی آن به طور کامل بیان شده است [۱۳]. با در نظر گرفتن معادله ۱، هدایت حرارتی مؤثر در ایروزل‌های گردانی بر حسب تغییر قطر حفرات، قابل بررسی است. در واقع تأثیر تغییر قطر حفره‌ها را می‌توان در عامل تأثیرگذار چگالی مشاهده کرد که با توجه به تحقیقات پیشین با افزایش قطر حفره‌ها، چگالی کاهش پیدا می‌کند و رابطه‌ی بین قطر حفره و چگالی با رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود [۱۳و۸]:

$$D \approx \frac{4V_{pore}}{S_{ext}} = \frac{4}{S_{ext}} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_s} \right) \quad (7)$$

در اینجا  $D$  قطر حفره،  $S_{ext}$  مساحت سطح ویژه‌ی ایروزل،  $\rho$  چگالی ایروزل و  $\rho_s$  چگالی توده جامد ایروزل است. همچنین در دماهای بالا تأثیر هدایت حرارتی

در آن‌ها تغییر کرده است.

با توجه به اینکه بررسی میزان انتقال حرارت در این نوع عایق‌ها چالش اصلی این پژوهش است، محاسبه‌ی هدایت حرارتی مؤثر ( $\lambda_{eff}$ ) بسیار مورد اهمیت است. هدایت حرارتی مؤثر در ایروزل‌ها با استفاده از مدل دیکاپلد [۹]، از جمع سه عامل هدایت حرارتی فاز گاز، هدایت حرارتی فاز جامد و هدایت حرارتی تشعشعی محاسبه می‌شد. اما با توجه به این که نتایج حاصل از این مدل از نتایج تجربی انحراف داشت، ریچمناور [۹] این مدل را اصلاح کرد. در نتیجه علاوه بر سه هدایت حرارتی که به آن اشاره شد، عاملی دیگر به نام هدایت حرارتی کوپلینگ که در واقع در اثر هدایت حرارتی بین فاز جامد و فاز گاز ایجاد شده است، نیز به رابطه اضافه شده و معادله به شکل زیر تغییر کرد [۹]:

$$\lambda_{eff} = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r + \lambda_c \quad (1)$$

در این رابطه  $\lambda_s$  هدایت حرارتی فاز جامد،  $\lambda_g$  هدایت حرارتی فاز گاز،  $\lambda_r$  هدایت حرارتی تشعشعی و  $\lambda_c$  هدایت حرارتی کوپلینگ است و هر کدام از عامل‌های معادله ۱ با روابط زیر تعریف می‌شوند. برای به دست آوردن هدایت حرارتی گاز درون حفره‌ها از مدل کاگنر [۱۰] استفاده می‌شود که رابطه‌ی آن به صورت زیر است:

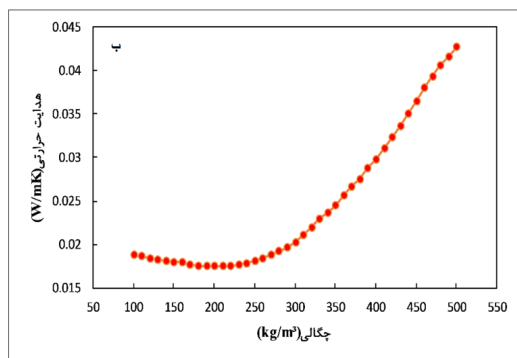
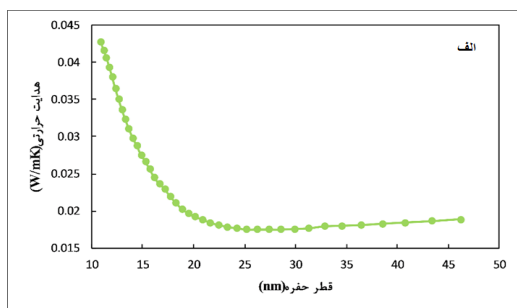
$$\lambda_g = \frac{\lambda_{g,0}}{(1 + 2\beta Kn)} \quad (2)$$

که در این رابطه  $\lambda_{g,0}$  رسانندگی حرارتی گاز آزاد،  $\beta$  ثابت دربرگیرنده اثر برهم‌کنش مولکول‌های گاز و دیواره حفره و  $Kn$  عدد نادسن است [۱۰]. هدایت حرارتی فاز جامد با استفاده از رابطه‌ای که توسط نیلسون و همکارانش [۱۱] گزارش شده است به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda_s = \lambda_0 \rho v / \rho_0 v_0 \quad (3)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی ایروزل،  $\rho_0$  چگالی توده جامد ایروزل،  $v$  سرعت صوت در ایروزل،  $v_0$  سرعت صوت در توده جامد ایروزل و  $\lambda_0$  هدایت حرارتی توده جامد

بی و همکارانشان [۱۳] برای نمونه‌های ابروژل سیلیکا، چهار نمودار شکل‌های ۱ و ۲ به دست آمده است. شکل ۱ تغییرات چگالی را بر حسب قطر حفره نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد با افزایش قطر حفرات چگالی به صورت غیرخطی (رابطه ۷) کاهش می‌یابد. در شکل ۲-الف هدایت حرارتی مؤثر بر حسب قطر حفره با استفاده از روابط ۱ تا ۶ رسم شده است. در این نمودارها با افزایش قطر حفره، هدایت حرارتی مؤثر تا قطر حفره ۲۵ نانومتر به علت هم پوشانی هدایت حرارتی چهار فاز ذکر شده روند کاهشی را طی کرده و پس از آن تقریباً ثابت باقی مانده است. تغییرات هدایت حرارتی مؤثر بر حسب چگالی نیز در شکل ۲-ب نشان داده شده است. در این منحنی هدایت حرارتی مؤثر با افزایش چگالی، باز هم به علت هم پوشانی هدایت حرارتی چهار فاز ذکر شده ابتدا کمی کاهش و سپس از چگالی  $(250 \text{ kg/m}^3)$  شروع به افزایش می‌کند. زیرا



شکل ۲ الف) تغییرات هدایت حرارتی مؤثر بر حسب قطر حفره،  
ب) تغییرات هدایت حرارتی مؤثر بر حسب چگالی برای ابروژل‌های سیلیکا (داده‌ها از مرجع ۱۳ استخراج شده است).

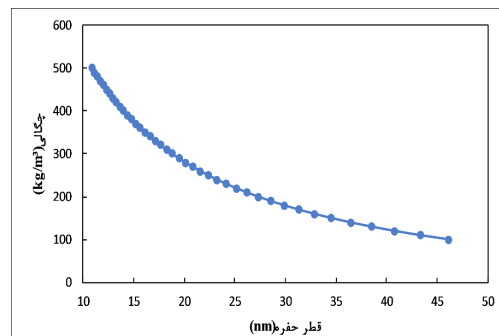
تشعشعی بسیار بیشتر از هدایت حرارتی فاز جامد بوده و انتقال حرارت تشعشعی با توان سوم دما متناسب است. در نهایت با افزایش دما، هدایت حرارتی مؤثر در چگالی ثابت افزایش می‌یابد، اما هرچه چگالی افزایش پیدا می‌کند تأثیر افزایش دما بر هدایت حرارتی مؤثر کمتر می‌شود [۱۳ و ۱۴ و ۱۵].

بنابراین ما در این پژوهش به دنبال بررسی میزان انتقال حرارت در ابروژل‌های ساختار گرادپانی هستیم که در آن‌ها ساختار به صورت یکنواخت تغییر می‌کند. روند تغییرات در میزان انتقال حرارت با استفاده از نرم‌افزار کامسول برای ساختار همگن با کمترین چگالی (L)، با بالاترین چگالی (H) و با کمترین مقدار عامل B که به عنوان ساختار بهینه (OPT) معرفی شده، بررسی و با میزان انتقال حرارت در ابروژل‌های ساختار گرادپانی شبیه‌سازی شده مقایسه می‌شود. ابروژل‌های ساختار گرادپانی شبیه‌سازی شده در دو حالت از چگالی بالا به پایین (HtL) و چگالی پایین به بالا (LtH) طراحی شده‌اند و روند تغییرات دما با زمان در هر دو حالت دیده شده است. نتایج به دست آمده از همه ساختارها با هم مقایسه شده‌اند تا بهترین ساختار برای ایجاد عایق حرارتی مناسب پیشنهاد گردد.

## ۲ نتایج و بحث

### ۲-۱ مدل‌سازی نانوساختار ابروژل

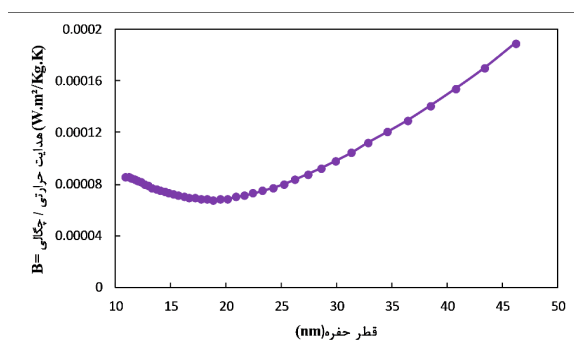
با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام شده توسط



شکل ۱ تغییرات چگالی بر حسب قطر حفره برای ابروژل‌های سیلیکا (داده‌ها از مرجع ۱۳ استخراج شده است).

بزرگتر در مجاورت منبع گرم باشند. ساختار دوم (HtL) عکس ساختار اول است، یعنی ایروژل به نحوی باشد که حفرات کوچکتر در مجاورت منبع گرم باشند. علاوه بر این دو ساختار، سه ساختار دیگر را هم می‌توان برای ساخت ایروژل بررسی کرد. در نتیجه در ساختار سوم (OPT) با در نظر گرفتن نقطه‌ی بهینه در شکل ۳، ایروژلی را می‌سازیم که قطر حفرات آن تماماً به اندازه قطر حفره بهینه باشد که در شکل ۳ تقریباً برابر ۱۸ نانومتر است. در دو ساختار نهایی هم یک بار ایروژلی با کوچک‌ترین قطر حفره و بیشترین چگالی (H) و بار دیگر ایروژلی با بزرگ‌ترین قطر حفره و کمترین چگالی (L) را شبیه‌سازی می‌کنیم.

با توجه به اینکه پیش‌بینی نحوه‌ی انتقال حرارت، موضوع اصلی این پژوهش است از پودمان (Module) انتقال حرارت در جامدات برای انجام شبیه‌سازی استفاده شده است. برای ایجاد ساختار نیز از فضای دو بعدی متقارن استفاده شده است، به صورتی که مستطیل‌هایی با پهنای (طول) ۵ میلی‌متر و ارتفاع (عرض) ۰/۵ میلی‌متر تعریف شده‌اند که شکل ۴ طرحی کلی از آن را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از داده‌های به دست آمده از مدل‌سازی، عامل‌های هدایت حرارتی مؤثر، چگالی و گرمای حرارتی ویژه بر اساس جدول ۱ قرار داده شده‌اند که در تمام مراحل، ظرفیت حرارتی ویژه، مقداری یکسان و برابر ۷۹۴ J/kg.K (با استفاده از رابطه



شکل ۳ تغییرات نسبت هدایت حرارتی مؤثر به چگالی بر حسب قطر حفره برای ایروژل‌های سیلیکا (داده‌ها از مرجع ۱۳ استخراج شده است).

هدایت حرارتی فاز جامد با افزایش چگالی، افزایش و هدایت حرارتی سه فاز دیگر کاهش می‌یابد. روند تغییرات در این نمودار، عکس تغییرات هدایت حرارتی با تغییر قطر حفره‌ها است؛ زیرا قطر حفره‌ها با چگالی، رابطه‌ی عکس و غیرخطی دارد.

در شکل ۳ نمودار نسبت هدایت حرارتی مؤثر بر چگالی (عامل B) بر حسب قطر حفره، رسم شده است. چگالی و دما بر هدایت حرارتی مؤثر در ایروژل‌های گرادپانی تأثیرگذار هستند؛ زیرا هر عامل بر هر چهار نوع انتقال حرارت به طور متفاوتی مؤثر است. با افزایش چگالی هدایت حرارتی فاز گاز ( $\lambda_g$ )، هدایت حرارتی تشعشعی ( $\lambda_p$ ) و هدایت حرارتی کوپلینگ ( $\lambda_c$ ) کاهش، در حالی که هدایت حرارتی فاز جامد ( $\lambda_s$ ) افزایش می‌یابد. با توجه به این که می‌خواهیم هدایت حرارتی مؤثر در این نوع ایروژل‌ها را بر حسب تغییر قطر حفره بررسی کنیم و این عامل با چگالی با معادله‌ی ۷ در ارتباط است، پس می‌توان عامل دیگری به نام B در اینجا تعریف کرد که از تقسیم هدایت حرارتی مؤثر بر چگالی به دست می‌آید که به صورت زیر است:

$$B = \frac{\lambda_{eff}}{\rho} \quad (8)$$

که در این رابطه  $\rho$  چگالی ایروژل و  $\lambda_{eff}$  هدایت حرارتی مؤثر است. این عامل با استفاده ضریب نفوذ حرارتی ( $\alpha$ ) با استفاده از رابطه  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$  به دست آمده است. در شکل ۳ مقدار عامل B ابتدا با افزایش قطر حفره، روندی کاهشی داشته و به مقدار کمینه رسیده است و بعد از آن روند تغییرات به صورت افزایشی بوده است. چون در ایروژل‌ها مقدار گرمای ویژه ( $C_p$ ) با تغییر قطر حفرات ثابت است. پس کمترین مقدار B به عنوان قطر و چگالی بهینه برای عایق ایروژلی، معرفی شده است.

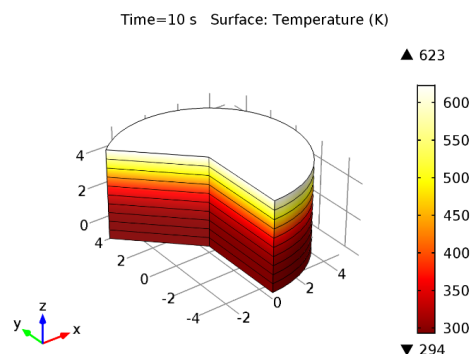
## ۲-۲ شبیه‌سازی گرادپان ساختار

اگر بخواهیم از ایروژل ساختار گرادپانی به عنوان عایق حرارتی استفاده کنیم دو ساختار ایجاد خواهد شد. ساختار اول (Lth) به نحوی است که قطر حفرات در ایروژل از بزرگ به کوچک تغییر کنند و حفرات

صورت مثلثی انجام گرفته و تعداد اجزا (Element)، ۴۴۷۵ است و روش حل MUMPS با استفاده از نرم افزار Comsol انجام شد. در شبیه سازی ساختار ایروزل، فرض شده است که کلویدها و حفرات کاملاً یکنواخت در نمونه توزیع شده اند و با گرادیان مشخص و بدون تغییر ناگهانی تغییر می کنند.

نتایج به دست آمده از شبیه سازی انجام شده برای پنج ساختار ذکر شده در شکل های ۵، ۶ و ۷ آورده شده است. در این اشکال، نمودار تغییرات دما بر حسب ضخامت در زمان های مختلف نمایش داده شده است. کل زمان در نظر گرفته شده برای انجام شبیه سازی ۶۰۰ ثانیه است که با گام های زمانی ۶۰ ثانیه ای تغییر می کند.

شکل ۵ دو نمودار تغییرات دما بر حسب ضخامت را در زمان های متفاوت برای LtH و HtL نشان می دهد. با مقایسه دو نمودار به این نتیجه می رسیم که LtH یعنی حالتی که در آن قطر حفرات از بزرگ به کوچک (چگالی کم به زیاد) تغییر می کند، مناسب تر است؛ زیرا دمای خروجی در زمان های مختلف برای نمودار الف از نمودار ب کمتر است. این پدیده به دلیل افزایش هدایت حرارتی فاز جامد و کاهش هدایت حرارتی فاز گاز، تشعشعی و کوپلینگ با افزایش چگالی است. در زمان های بالاتر از ۱۰ ثانیه به عنوان مثال در زمان ۷۰ ثانیه، نمودار الف دمای زیر ۴۰۰ کلوین را نشان می دهد؛

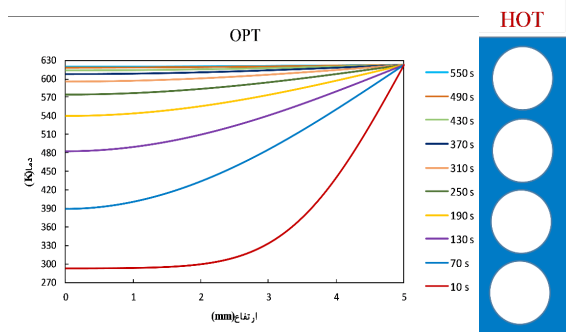


شکل ۴ طرح واره ایروزل شبیه سازی شده

به دست آمده برای سیلیکا [۹] دارد. در این جدول ده قطر حفره در نظر گرفته شده است که کوچک ترین و بزرگ ترین قطر حفره نیز در آن آورده شده است. برای انجام شبیه سازی، ده لایه در نظر گرفته شد که در آن ها هر لایه مطابق ساختار مورد نظر می تواند قطر حفره متفاوت یا یکسانی داشته باشد. دلیل ایجاد تعداد لایه زیاد این است که می خواهیم ساختار را به صورت یکنواخت و با در نظر گرفتن تعریف مواد گرادینانی بررسی کنیم. در این شبیه سازی، دمای سطح بالایی، ۶۲۳ کلوین است و در سطوح جانبی و زیرین برابر صفر هستند، یعنی از سطوح جانبی و زیرین هیچ حرارتی به سامانه وارد یا خارج نمی شود. مِس بندی به

جدول ۱ عامل های مورد استفاده در شبیه سازی

قطر حفره (nm)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	هدایت حرارتی مؤثر (W/m.K)
۱۰/۸۸	۵۰۰	۰/۰۴۲۹۶
۱۴/۳۹	۳۹۰	۰/۰۲۸۸۱
۱۷/۶۷	۳۲۰	۰/۰۲۱۹۵
۲۱/۶۱	۲۶۰	۰/۰۱۸۳۸
۲۵/۱۵	۲۲۰	۰/۰۱۷۴۹
۲۸/۵۵	۱۹۰	۰/۰۱۷۴۸
۳۲/۸۴	۱۶۰	۰/۰۱۷۹۲
۳۶/۴۱	۱۴۰	۰/۰۱۸۰۹
۴۰/۷۵	۱۲۰	۰/۰۱۸۴۴
۴۶/۱۵	۱۰۰	۰/۰۱۸۸۸

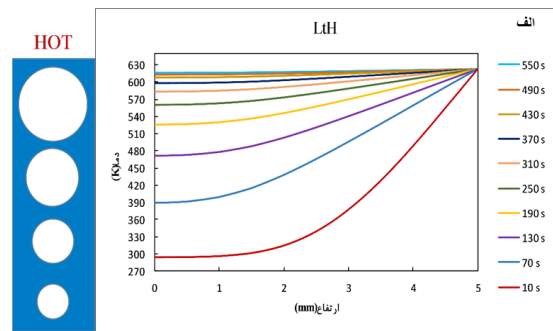


شکل ۶ نمودار تغییرات دما بر حسب ضخامت برای OPT

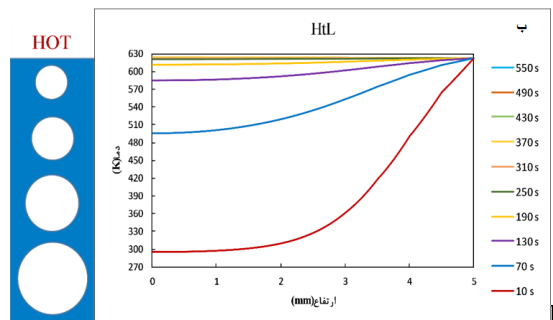
چون حفرات در این ناحیه ریزتر می‌شوند و از طرفی همان‌طور که گفته شد اندازه‌ی حفرات در هدایت حرارتی بسیار تأثیرگذارند، به این صورت که با کاهش قطر (افزایش چگالی) هدایت حرارتی فاز جامد افزایش و سه هدایت حرارتی فاز گاز، تشعشعی و کوپلینگ کاهش می‌یابند. بنابراین مسیری که حرارت باید عبور کند تا به انتهای دیگر عایق برسد، در ساختار LtH پیچیده‌تر و طولانی‌تر می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۷ این مسیر برای دو ساختار LtH و OPT به صورت فرضی ترسیم شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مسیر عبور حرارت در فاز جامد در ساختار LtH پیچیده‌تر و طولانی‌تر از ساختار OPT است و انتقال حرارت در طول مسیر باید به طرق مختلف انجام گیرد. همچنین در اختلاف دمای بالا، کاهش جرم جامد (دیواره‌ی نازک جامد) اثر مثبت بر حفاظت حرارتی دارد. علاوه بر آن در اختلاف دمای کم، افزایش جرم (دیواره‌ی ضخیم جامد) نیز اثر مثبت دارد. در واقع چگالی مانند چاه حرارتی در گرادیان دمایی کم عمل می‌کند و کارایی عایق را بالا می‌برد. در نتیجه می‌توان گفت که دلیل رفتار حرارتی بهتر ساختار LtH، این پدیده است.

شکل ۸ دو نمودار تغییرات دما بر حسب ضخامت در زمان‌های مختلف را برای طرح‌های H و L نشان می‌دهد. از مقایسه دو نمودار این شکل می‌بینیم که دمای خروجی برای زمان ۷۰ ثانیه در نمودار الف تقریباً نزدیک به ۴۰۰



شکل ۵ الف) نمودار تغییرات دما بر حسب ضخامت برای LtH



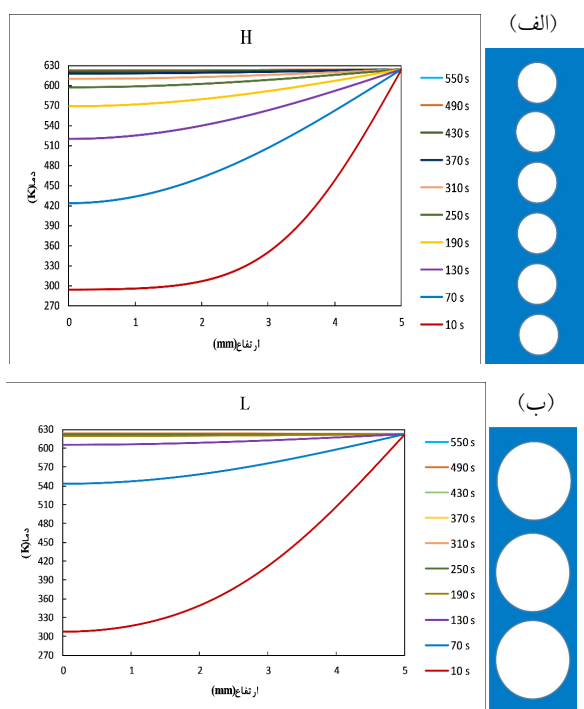
ب) نمودار تغییرات دما بر حسب ضخامت برای HtL

در حالی که نمودار ب در همین زمان دمای نزدیک به ۵۰۰ کلوین را نشان می‌دهد. به همین ترتیب برای دماهای بالاتر نیز همین روند مشاهده می‌شود.

شکل ۶ نمودار تغییرات دما بر حسب ضخامت در زمان‌های مختلف را برای ایروزلی نشان می‌دهد که در آن قطر حفرات در تمام لایه‌ها یکسان و برابر با مقدار بهینه‌ی ۱۸/۸۴ نانومتر است. در این حالت چگالی  $300 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ، هدایت حرارتی مؤثر  $0.2026 \text{ (W/m.K)}$  و عامل B برابر با  $6.75 \times 10^{-5} \text{ (W.m}^2\text{/Kg.K)}$  و دارای کمترین مقدار است.

با مقایسه این نمودار با نمودار شکل ۵-الف می‌بینیم که دمای خروجی در این دو نمودار بسیار به هم نزدیکند و در زمان‌های ۱۰ و ۷۰ ثانیه اختلاف دمای خروجی از دو ساختار بسیار کم است اما از زمان ۱۳۰ ثانیه این اختلاف بیشتر شده و ساختار شکل ۵-الف یا همان LtH دمای خروجی کمتری را نشان می‌دهد. در نتیجه مشخص است که LtH از OPT در زمان‌های بالاتر بهتر عمل می‌کند.

با افزایش چگالی، میزان فاز جامد افزایش می‌یابد؛ اما

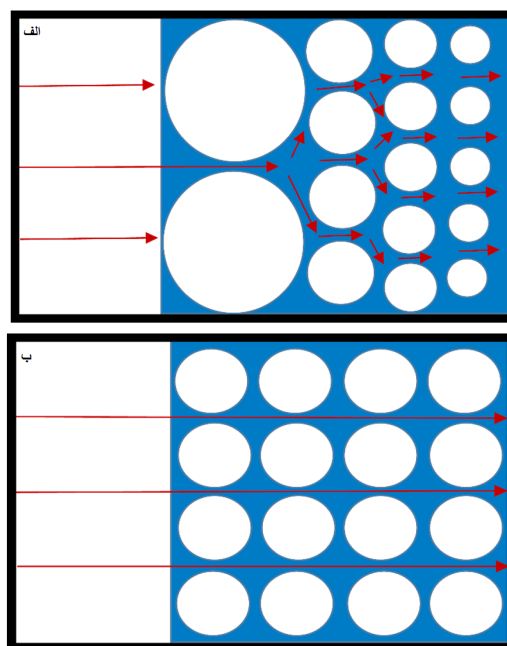


شکل ۸ (الف) نمودار تغییرات دما بر حسب ضخامت برای ساختار با حفره کوچک، (ب) نمودار تغییرات دما بر حسب ضخامت برای ساختار با حفره بزرگ

درصد بازده آن‌ها با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\eta = \left( \frac{T^H - T}{T^H} \right) * 100 \quad (9)$$

در این رابطه  $T^H$  دمای سطح داغ و  $T$  دمای هر مقطع است. شکل ۱۰ نمودار میله‌ای درصد بازده در زمان ۱۹۰ ثانیه را برای ساختارهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ساختار LtH بازده بالاتری برای استفاده به عنوان عایق، نسبت به تمام ساختارهای دیگر دارد. با توجه به مقایسه‌های صورت گرفته از نمودارهای به دست آمده در نهایت به این نتیجه می‌رسیم که طرح عایق با ساختار LtH یا به طور واضح تر ساختاری که در آن قطر حفرات از بزرگ به کوچک تغییر می‌کنند و حفرات بزرگتر در مجاورت منبع گرم هستند، در زمان‌های بالاتر از ۱۰ ثانیه پاسخ گویی بهتری برای استفاده به عنوان عایق‌های حرارتی را دارد. قابل توجه است که LtH و OPT از نظر پاسخ گویی در زمان‌های



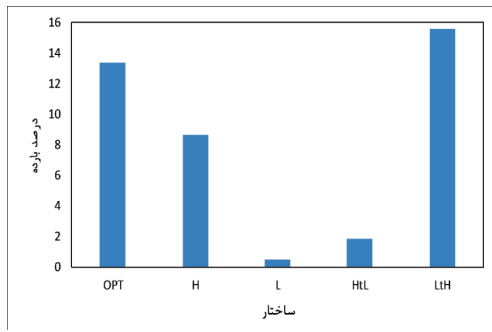
شکل ۷ مسیر فرضی عبور حرارت در فاز جامد (الف) ساختار LtH (ب) ساختار OPT

کلوین است؛ اما برای نمودار ب در همین زمان، دمای خروجی بالای ۵۰۰ کلوین است. در نتیجه ساختار نمودار الف (حالتی که در آن قطر تمام حفرات در ایروژل، یکسان و برابر با کمترین مقدار ۱۰/۸۸ نانومتر است) مناسب تر است؛ زیرا حفرات در این ساختار تماماً ریز هستند. همچنین از مقایسه نمودار الف شکل ۸ با شکل ۵-الف به این نتیجه می‌رسیم که ساختار نمودار شکل ۵-الف یا همان LtH بهتر است؛ زیرا در زمان ۷۰ ثانیه دمای خروجی برای شکل ۸-الف بیشتر از ۴۰۰ کلوین و برای شکل ۵-الف کمتر از ۴۰۰ کلوین است.

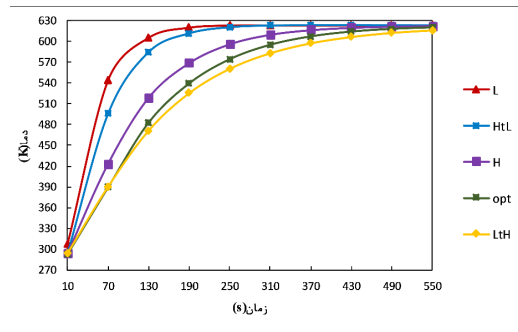
شکل ۹ نمودار تغییرات دمای خروجی از ایروژل بر حسب زمان را برای ساختارهای مختلف شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. براساس این شکل که مقایسه‌ای از دماهای نهایی است، مشاهده می‌کنیم که دماهای به دست آمده برای ساختار LtH از تمام ساختارها کمتر است. بنابراین کارایی حفاظت ساختار گرادپانی LtH از ساختار OPT همگن بیشتر است.

برای بررسی میزان کارایی ساختارهای شبیه‌سازی شده،





شکل ۱۰ نمودار درصد بازده در زمان ۱۹۰s برای ساختارهای مختلف



شکل ۹ نمودار تغییرات دمای خروجی از ایزوژل بر حسب زمان

چگالی پایین به بالا (Lth) شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن مقایسه شد. از تقسیم هدایت حرارتی مؤثر بر چگالی ایزوژل، عامل B به دست آمد که کمینه‌ی آن تعیین‌کننده‌ی نقطه‌ی بهینه برای ساخت ایزوژلی همگن با قطر حفره بهینه بود و با استفاده از آن توانستیم انتقال حرارت را در ساختار بهینه، شبیه‌سازی کنیم. با در نظر گرفتن مقایسه‌های انجام شده مشخص شد که Lth و OPT در زمان‌های پایین شبیه به هم عمل کرده اما در زمان‌های بالاتر Lth پاسخ‌گویی بهتری دارد. در واقع می‌توان از مواد گرادیانی در زمینه‌های دیگر نیز استفاده کرد چون حتی رفتار حرارتی آن به عنوان عایق، بهتر از ساختار بهینه، پیش‌بینی شد.

پایین بسیار به هم نزدیکند و در زمان‌های بالا Lth حتی از OPT نیز بهتر عمل می‌کند. در نتیجه می‌توان گفت که ساختاری بهتر از ساختار بهینه با ساختار همگن برای ساخت عایق حرارتی به دست آمده است.

### ۳ نتیجه‌گیری

به طور کلی انتقال حرارت در پنج ساختار با استفاده از داده‌های به دست آمده برای ایزوژل سیلیکا در چگالی‌های متفاوت از جمله ساختار ساده و همگن با کمترین چگالی (L)، با بالاترین چگالی (H)، با کمترین مقدار عامل B به عنوان ساختار بهینه (OPT) و ساختار گرادیانی در دو حالت از چگالی بالا به پایین (HtL) و

## مراجع

- [1] M. Spinnler, "Studies on High-Temperature Multilayer Thermal Insulations," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no. 6–7, pp. 1305–1312, 2004.
- [2] A. C. Pierre and M. Pajonk, "Chemistry of Aerogels and Their Applications," 2002.
- [3] M. A. Aegerter, N. Leventis, and M. M. Koebel, *Aerogels Handbook*. Springer, 2011.
- [4] M. Khalaj, A. Allahbakhsh, A. R. Bahramian, and A. Sharif, "Structural , Mechanical and Thermal Behaviors of Novolac/Graphene Oxide Nanocomposite Aerogels," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 460, pp. 19–28, 2017.
- [5] A. C. P. M. Shahistha, V. Binol, and B. Anjali, "A Review on Functionally gGraded Materials," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 6, pp. 90–101, 2014.
- [6] A. Schachtschneider, M. Wessig, M. Spitzbarth, A. Donner, C. Fischer, M. Drescher, S. Polarz , "Directional Materials — Nanoporous Organosilica Monoliths with Multiple Gradients Prepared Using Click Chemistry," *Angewandte Chemie International Edition*, pp. 10465–10469, 2015.
- [7] C. Wingfield, L. Franzel, M. F. Bertino, and N. Leventis, "Fabrication of Functionally Graded Aerogels, Cellular Aerogels and Anisotropic Ceramics," *J. Mater. Chem.*, vol. 21, no. 32, p. 11737, 2011.
- [8] F. Hemberger, S. Weis, G. Reichenauer, and H. P. Ebert, "Thermal Transport Properties of Functionally Graded Carbon Aerogels," 18th Eur. Conf. Thermophys- cal Prop., pp. 1–23, 2008.
- [9] G. H. Tang, C. Bi, Y. Zhao, and W. Q. Tao, "Thermal Transport in Nano-Porous Insulation of Aerogel: Factors, Models and Outlook," *Energy*, vol. 90, pp. 701–721, 2015.
- [10] C. Bi, G. H. Tang, and W. Q. Tao, "Prediction of the Gaseous Thermal Conductivity in Aerogels with Non-Uniform Pore-Size Distribution," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 358, pp. 3124–3128, 2012.
- [11] C. Bi and G. H. Tang, "Effective Thermal Conductivity of the Solid Backbone of Aerogel," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 64, pp. 452–456, 2013.
- [12] Q. Ag, "Radiative Heat Transfer in Silica Aerogel," *Aerogels*, vol. 6, , 1986.
- [13] C. Bi, G. H. Tang, Z. J. Hu, H. L. Yang, and J. N. Li, "Coupling Model for Heat Transfer between Solid and Gas Phases in Aerogel and Experimental Investigation," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 79, pp. 126–136, 2014.
- [14] G. Wei, Y. Liu, X. Zhang, F. Yu, and X. Du, "Thermal Conductivities Study on Silica Aerogel and Its Composite Insulation Materials," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 11–12, pp. 2355–2366, 2011.
- [15] S.-C. Lee and G. R. Cunningham, "Conduction and Radiation Heat Transfer in High-Porosity Fiber Thermal Insulation," *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 14, no. 2, pp. 121–136, 2000.