

مدل‌سازی عددی انتقال حرارت مرکب رسانش و تابشی گذرا در عایق‌های حرارتی الیاف معدنی

سهراب ویسه^{۱*}؛ علی حکاکی‌فرد^۲؛ میر محمد علی میرمحمدی^۳

چکیده

در این مقاله رفتار عایق‌های حرارتی الیاف معدنی شامل پشم شیشه و پشم سنگ در انتقال حرارت گذرای مرکب رسانش و تابشی با استفاده از مدل‌سازی عددی و پارامترهای نیمه تجربی که در این پژوهش با نتایج آزمایش‌ها تعیین شدند، بررسی می‌شود. پارامترهای ترموفیزیکی و فیزیکی مورد نیاز در مدل ریاضی مانند ظرفیت حرارتی، ضریب هدایت حرارتی موثر، قطر الیاف و چگالی واقعی و ظاهری این عایق‌ها با انجام آزمایش‌ها تعیین شده و در مدل عددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. انتقال حرارت تابشی با شبیه‌سازی مستقیم بر پایه روش مونت کارلو انجام شده است. ضریب هدایت حرارتی ناشی از هدایت هوا-جامد نیز با استفاده از رابطه نیمه تجربی به دست آمده با آزمایش‌های انجام شده و روش‌های معکوس تخمین پارامتر تعیین شده‌اند. انتقال حرارت تابشی (به صورت یک منبع حرارتی با معادله انتقال حرارت) با هدایت هوا-جامد جفت شد. نتایج بدست آمده از این مدل همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

کلمات کلیدی: عایق‌های حرارتی، الیاف معدنی، مدل‌سازی عددی، انتقال حرارت مرکب رسانش و تابشی.

Numerical Modeling of Combined Transient Radiation and Conduction Heat Transfer in Mineral Wool Insulations

S. Veisheh; A. Hakkaki-Fard

ABSTRACT

This article deals with numerical modeling of coupled heat conduction and radiation in glass wool and rock wool insulations in transient condition using semi-empirical parameters obtained from experimental results. In this research needed thermophysical and physical parameters for numerical model, such as: heat capacity, effective thermal conductivity, fiber's diameter, and apparent and solid density of these mineral wools are determined by experiments. Radiation heat transfer is modeled by direct simulation and applying Monte Carlo ray trace method; and the thermal conductivity due to air/solid conduction is determined by semi-empirical relation obtained by inverse parameter estimation method as well as experimental results. Radiation is coupled with conduction via heat source term in heat conduction equation. Code results are in a good agreement with experimental results.

KEYWORDS: Thermal insulation, mineral wool, numerical modeling, combined radiation and conduction.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۱۰/۱۱

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۸/۱

^{۱*} نویسنده مسئول و عضو هیات علمی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن: veisheh@bhrc.ac.ir

^۲ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن: ahakaki@ut.ac.ir

^۳ استاد دانشکده معدن، دانشگاه تهران: mirmohamadi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

بررسی الیاف معدنی، از جمله تحقیقات توسعه یافته در جهان است. تمایل به کاهش مصرف انرژی در صنایع باعث افزایش توجه به عایق‌های الیافی بسیار پر مصرف در این رشته شده است. امروزه عایق‌های حرارتی مبنای طرح‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی است [۱].

پژوهشگران زیادی در زمینه خواص عایق‌های الیافی تحقیق کرده‌اند که برخی از آن خواص عبارتند از: روش‌های نصب [۲]، پارامترهای موثر بر رفتار فشاری [۳]، مدل‌سازی انتقال حرارت [۴-۵]، مدل‌سازی انتقال حرارت تابشی [۶-۸]، تخمین خواص تابشی [۹-۱۱]، مدل‌سازی عددی انتقال حرارت [۱۲-۱۴] و تحقیقات تجربی بر روی این عایق‌ها [۱۵-۱۶].

اسلاناج و همکاران [۱۷]، انتقال حرارت مرکب تابش و هدایت گذرا در محیط الیافی با خواص نوری انیزوتروپ را با شرایط مرزی شار و دما بررسی نموده‌اند. آنها برای حل انتقال حرارت تشعشی معادله کلی تابش را در محیط الیاف سیلیسی حل کرده‌اند. این پژوهشگران برای هدایت هوا و الیاف از رابطه نیمه تجربی ارائه شده برای الیاف سیلیسی به وسیله لانگلا و کلارسفلد [۱۸] استفاده نموده و گرمای ویژه را در دماهای مختلف ثابت فرض کردند.

در این مقاله به بررسی رفتار این عایق‌ها در انتقال حرارت مرکب رسانش و تابشی گذرا با استفاده از مدل‌سازی عددی و به کار بردن پارامترهای نیمه تجربی که با آزمایش‌های انجام شده بر روی این عایق‌ها در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تعیین شده‌اند، می‌پردازیم. در پژوهش حاضر انتقال حرارت تابشی در محیط الیافی با روش مونت کارلو به صورت مستقیم شبیه‌سازی شد. در تحقیقات قبل از روش مونت کارلو به طور بسیار محدودی برای مدل کردن انتقال حرارت تابشی استفاده شده است. روش مونت کارلو فرایندی وقت‌گیر است. در این تحقیق از تعریف ضریب توزیع برای سرعت بخشیدن به محاسبات استفاده شده است. با این روش تعداد محاسبات در هر تکرار به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. همچنین تابش با هدایت از طریق عبارت منبع در معادله هدایت حرارت جفت شده است. در واقع اکثر الیاف در عایق‌های پشم معدنی در راستای موازی با سطوح و عمود بر شار حرارت قرار گرفته‌اند. در روش به کار برده شده برخلاف کارهای قبل جهت‌یافتگی الیاف عمود بر شار حرارت در نظر گرفته شده است که نسبت به جهت‌یافتگی اتفاقی الیاف فرض منطقی‌تری است.

مشخصات دو نوع عایق حرارتی پشم شیشه و پشم سنگ

شامل ضرایب هدایت حرارتی مربوط به هدایت هوا و الیاف به طور جداگانه در معادلات منظور گردید. گرمای ویژه برای هر یک از این مواد بر حسب دما اندازه‌گیری شده و از رابطه C_p-T در معادله انتقال حرارت گذرا استفاده شده است.

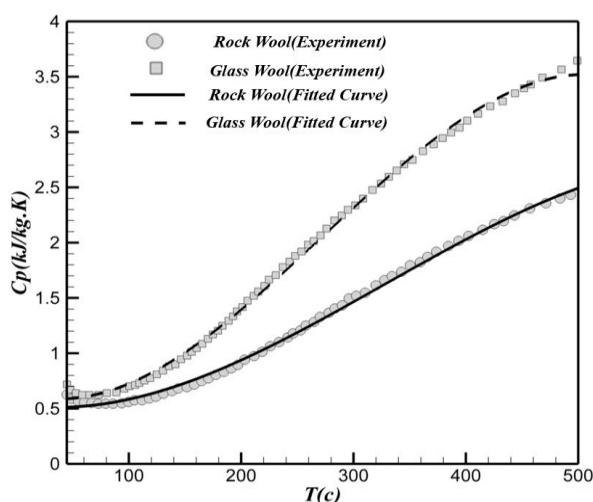
۲- بررسی‌های تجربی و مدل‌سازی

دستگاه‌ها و مواد: ضریب هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی با دستگاه جریان حرارت سنج^۱، طبق استاندارد ملی ایران ۸۶۲۱: سال ۱۳۸۵ "تعیین مقاومت حرارتی به وسیله لوح گرم محافظت شده و روش جریان حرارت سنج فراورده‌های با مقاومت حرارتی زیاد و متوسط، روش آزمون" اندازه‌گیری شد. دستگاه جریان حرارت سنج مورد استفاده ساخت کارخانه نچ مدل ۴۳۶/۳/۱E است. قطر الیاف با دستگاه میکروسکپ الکترونی آکسفورد^۲ و ظرفیت حرارتی مواد با دستگاه STA ساخت کارخانه نچ مدل ۴۴۹C اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها بر روی فراورده‌های پشم شیشه و پشم سنگ کارخانه‌های پشم شیشه ایران و پشم سنگ ایران در آزمایشگاه عایق‌های حرارتی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شد.

نتایج آزمایش‌ها: گرمای ویژه پشم سنگ و پشم شیشه برحسب دما طبق آزمایش‌های انجام گرفته بر روی این عایق‌ها و منحنی درجه سه منطبق شده بر این نتایج، در شکل (۱) نشان داده شده است. معادله‌های (۱) و (۲) به ترتیب رابطه ظرفیت گرمایی- دما را برای عایق‌های پشم شیشه و پشم سنگ نشان می‌دهند.

$$C_p = 3.89 \times 10^{-5} T^3 + 3.34 \times 10^{-2} T^2 + 0.613 T + 501 \quad (1)$$

$$C_p = 2.27 \times 10^{-5} T^3 + 2.23 \times 10^{-2} T^2 + 1.56 T + 540 \quad (2)$$

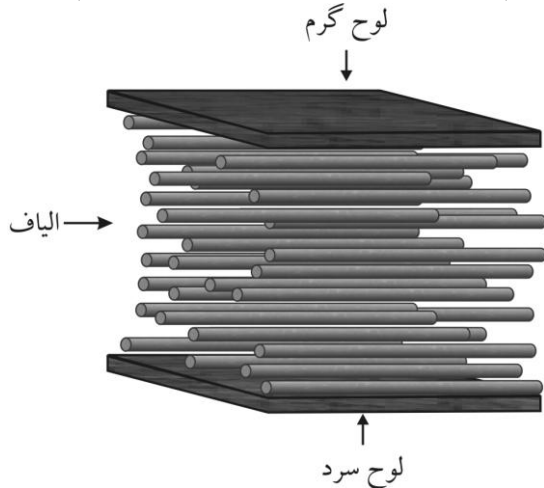


شکل ۱: نمودار نتایج آزمایش ظرفیت گرمایی عایق‌های معدنی پشم شیشه و پشم سنگ

که در آن $k(T)$ ، ضریب هدایت حرارتی موثر الیاف و هوا بوده که تابعی از دما است. رابطه نیمه تجربی به وسیله ویسه و همکاران [۴]، برای پشم شیشه و پشم سنگ به ترتیب با رابطه‌های (۵) و (۶) به صورت تابعی از دما و چگالی بر پایه نتایج آزمایش‌ها پیشنهاد شده است.

$$k(T) = 10^{-3} (0.2274T^{0.82} + 0.0523\rho^{0.91}(1 + 0.0013T)) \quad (5)$$

$$k(T) = 10^{-3} (0.0620T^{1.014} + 0.0572\rho^{0.91}(1 + 0.0081T) + 0.7171) \quad (6)$$



شکل ۳: شبیه‌سازی الیاف و صفحات گرم و سرد

در این تحقیق انتقال حرارت تابشی با مدل‌سازی مستقیم بر پایه روش مونت کارلو بررسی شده است. این روش عددی، بر پایه احتمالات است که سبب ساده‌سازی در حل عددی مساله می‌شود. دیدگاه فوتونی انتقال حرارت تابشی، اساس روش آماری مونت کارلو است [۲۱]. رویکرد اصلی در این روش انتشار تعداد زیادی بسته‌های انرژی است که از المان‌های صفحه‌ای تصادفی منتشر شده و پس از انعکاس‌های فراوان به وسیله المان‌های صفحه‌ای دیگر جذب می‌شوند [۲۱].

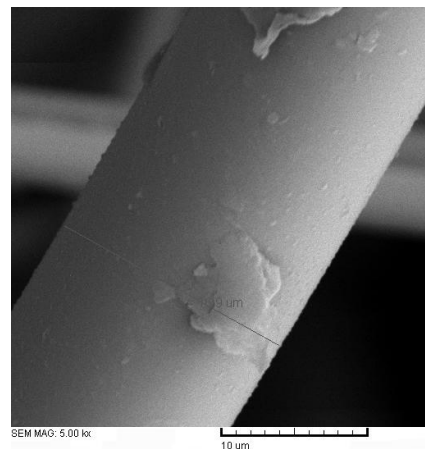
در نتیجه رابطه یک بعدی انتقال حرارت تابشی را می‌توان به صورت معادله (۷) نوشت:

$$(q_r)_i = \sigma(\varepsilon_H D_{Hi} T_H^4 - \varepsilon_i D_{iH} T_i^4) + \sigma(\varepsilon_i D_{iC} T_i^4 - \varepsilon_C D_{Ci} T_C^4) + \sigma \sum_{j=1}^i (\varepsilon_j D_{ji} T_j^4 - \varepsilon_i D_{ij} T_i^4) + \sigma \sum_{j=i+1}^n (\varepsilon_i D_{ij} T_i^4 - \varepsilon_j D_{ji} T_j^4) \quad (7)$$

که در آن D_{nm} ضریب توزیع تابشی است و به صورت کسری از تابش نفوذی است که از المان‌های سطحی n منتشر شده و به المان‌های سطحی m رسیده (با توجه به تابش مستقیم و یا همه انعکاس‌های ممکن در محیط) و جذب آن شود [۲۱]. با توجه به یک بعدی بودن مساله انتقال حرارت، مساله انتقال حرارت تابشی سه بعدی تبدیل به یک بعدی می‌شود یعنی تابش

اندازه‌گیری‌های قطر الیاف نشان داد که قطر متوسط الیاف شیشه ۸/۱ میکرون و الیاف پشم سنگ ۷/۲ میکرون (شکل ۲) است.

در اندازه‌گیری چگالی انبوهی، دقت اندازه‌گیری طول، عرض و ضخامت نمونه بهتر از $\pm 1\%$ بود. بیش‌ترین عدم قطعیت در تعیین ضخامت به دلیل انحراف از یک صفحه تخت 0.5% و در تعیین جرم نمونه برای تعیین چگالی 0.5% بود. دقت اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی بهتر از $\pm 3\%$ بود. تکرارپذیری در حالتی که نمونه در دستگاه ثابت بماند بهتر از $\pm 1\%$ به دست آمد. بررسی نشان داد که تکرارپذیری زمانی که نمونه از دستگاه خارج می‌شود و دوباره در دستگاه قرار می‌گیرد نیز بهتر از $\pm 1\%$ است.



شکل ۲: اندازه‌گیری قطر الیاف پشم سنگ با SEM

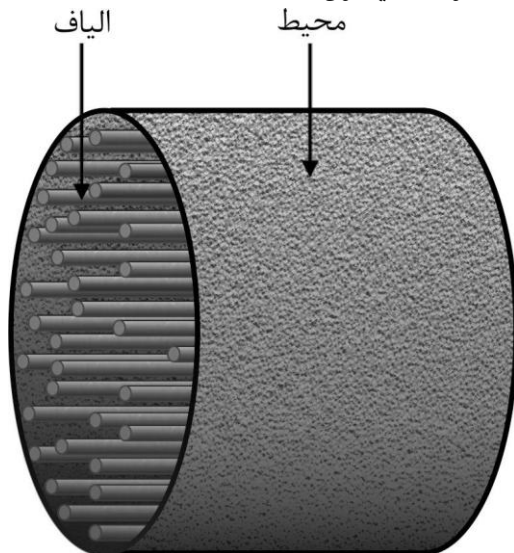
مدل فیزیکی و معادلات حاکم بر مساله: عایق بین صفحه گرم در بالا و صفحه سرد در پایین با دماهای ثابت به ترتیب T_C و T_H بنا بر روش آزمون اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی، طبق شکل (۳) قرار گرفته است. در نتیجه شار حرارتی در جهت شتاب جاذبه زمین بوده که موجب کاهش اثر انتقال حرارت جابجایی می‌شود. همچنین در این مساله فرض شده است که هوای موجود بین الیاف، خشک و بدون حرکت است، در نتیجه فرض نبود انتقال حرارت جابجایی منطقی است. بنابراین روش‌های انتقال حرارت در عایق‌های حرارتی الیاف معدنی شامل انتقال حرارت تابشی، رسانش الیاف، رسانش هوا و ترکیبی از آنها خواهد بود یا به طور خلاصه ترکیبی از انتقال حرارت رسانش و تابشی بوده است که می‌توان آن را به صورت رابطه (۳) نوشت:

$$q_t = q_c + q_r \quad (3)$$

معادلات حاکم بر این مساله عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{dq_r}{dx} = \rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

که شبکه ۵۰۰۰ گره‌ای برای این مطالعه مناسب است. محاسبات و نتایج: نتایج بدست آمده از کد ارائه شده برای دو نوع فراورده پشم شیشه و پشم سنگ مورد بررسی قرار گرفت. هر دو فراورده دارای چگالی (100 kg/m^3) و ضخامت (۵ cm) است. قطر متوسط الیاف شیشه و الیاف سنگ به ترتیب برابر با $1/8$ و $7/2$ میکرون است.



شکل ۴: محیط شبیه‌سازی شده برای محاسبه ضرایب توزیع تابشی شرایط اولیه عایق: دمای ۱۰ درجه سلسیوس با شرایط مرزی؛ صفحه سرد در دمای ثابت صفر درجه سلسیوس و صفحه گرم در دمای ثابت ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شدند که طبق شرایط عایق در دستگاه جریان حرارت سنج است. نتایج بدست آمده از کد در شکل‌های (۷) تا (۱۰) نشان داده شده‌اند.

برای مقایسه نتایج بدست آمده از کد و دستگاه HFM، ضریب هدایت حرارتی موثر این عایق‌ها در زمان تعادل حرارتی در جدول (۱) آمده است که نشان می‌دهد نتایج برابری خوبی با هم دارند.

نتایج کد نشان داد که پشم سنگ در زمان کوتاه‌تری به تعادل حرارتی رسیده و ضریب هدایت حرارتی آن بیشتر از پشم شیشه است که با نتایج آزمایش برابری دارد.

در همه مقاطع زمانی انتقال تابشی در نزدیکی صفحه گرم بیشتر از مناطق دیگر است که دلیل آن وابستگی شار تابشی به توان چهارم دما است. این شار با فاصله گرفتن از صفحه گرم و کاهش دما بر اثر تابش از سطوح با دمای کمتر کاهش می‌یابد. انتقال هدایت جامد از میان محیط الیافی نسبت به صفحه میانی متقارن است. همچنین نتایج کد نشان داد که در زمان‌های ابتدایی قبل از ۱۰۰ ثانیه، مناطق داخلی مواد تحت تاثیر شار حرارتی قرار نگرفته‌اند.

بین صفحات موازی انجام می‌شود. بنابراین لازم است ضرایب توزیع تابشی بین این صفحات و همچنین میان صفحات الیافی و صفحات گرم و سرد تعیین شوند. برای این کار از روش مونت کارلو استفاده شده است. با توجه به این نکته که انتقال حرارت تابشی به طور ذاتی یک پدیده سه بعدی است، ضریب توزیع تابشی میان الیاف و همچنین میان الیاف و صفحات گرم و سرد ابتدا به صورت سه بعدی محاسبه شد. سپس ضریب توزیع تابشی محاسبه شده در سه بعد را در صفحات دو بعدی تصویر کرده و با انتگرال‌گیری ضرایب در این صفحات، در یک بعد تصویر شوند تا بتوان از آنها در معادله (۴) استفاده نمود. با توجه به این نکته که خواص تابشی این الیاف در دماهای متوسط تغییر چندانی نمی‌کنند، این ضرایب در یک دمای متوسط محاسبه شدند و نیازی به محاسبه این ضرایب در هر مرحله از حل مساله نیست. برای حساب کردن ضریب توزیع تابشی الیاف نسبت به صفحات گرم و سرد، ضریب توزیع تابشی صفحات گرم و سرد نسبت به الیاف محاسبه شد و با به کار بردن قانون بازگشت [۲۱] ضریب توزیع تابشی الیاف نسبت به صفحات گرم و سرد با معادله (۸) محاسبه شده است.

$$\varepsilon_m A_m D_{mm} = \varepsilon_n A_n D_{nm} \quad (8)$$

روش محاسبه ضرایب توزیع تابشی عبارت است از:

سیلندری را با شعاع معین و با ارتفاع بی‌نهایت در محیطی الیافی که الیاف آن به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت، موازی محور سیلندر توزیع شده‌اند را طبق شکل (۴) فرض می‌کنیم. تعداد الیاف در این سیلندر متناسب با چگالی عایق است. با توجه به این که چگالی عایق و ضخامت الیاف قابل اندازه‌گیری است، تعداد متوسط الیاف در محیط را می‌توان محاسبه نمود.

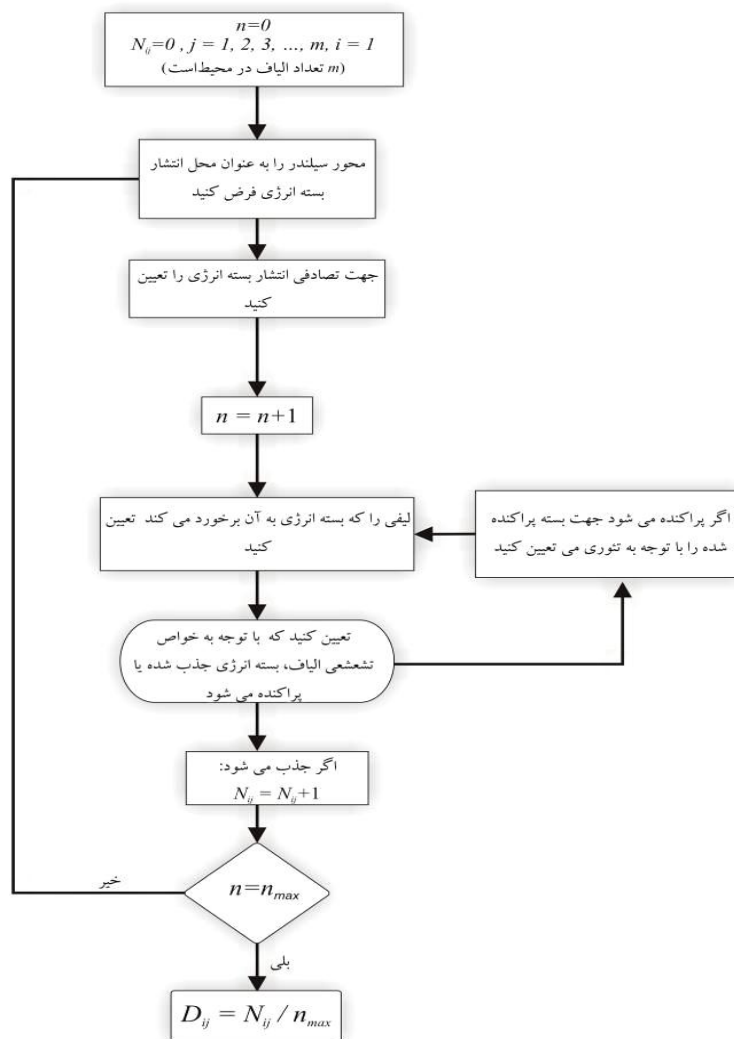
شکل (۵) نمودار جریانی محاسبه ضریب توزیع تابشی الیاف نسبت به هم را با روش مونت کارلو نشان می‌دهد. همین روش برای محاسبه ضریب توزیع تابشی الیاف نسبت به صفحات گرم و سرد به کار رفت. فرض شد که صفحات گرم و سرد، سطوحی جاذب و بازتابشی هستند. برای حل معادله انرژی از روش ساده ضمنی (روش لاسونن) [۲۲] استفاده شد. این روش با دقت مرتبه اول و خطای برشی از مرتبه $O[\Delta t, (\Delta x)^2]$ بوده و بدون شرط پایدار است. حل معادلات جفت شده انرژی و تابش، یک فرآیند تکراری است. نمودار جریانی این روش در شکل ۶ نشان داده شده است. در این پژوهش شبکه‌های فراوانی با تعداد ۵۰۰ گره، ۱۰۰۰ گره، ۲۵۰۰ گره و ۱۰۰۰۰ گره امتحان شده‌اند. مقایسه نتایج نشان داده‌اند

جدول ۱: ضریب هدایت حرارتی موثر عایق‌های معدنی پشم سنگ و پشم شیشه در وضعیت پایدار حرارتی

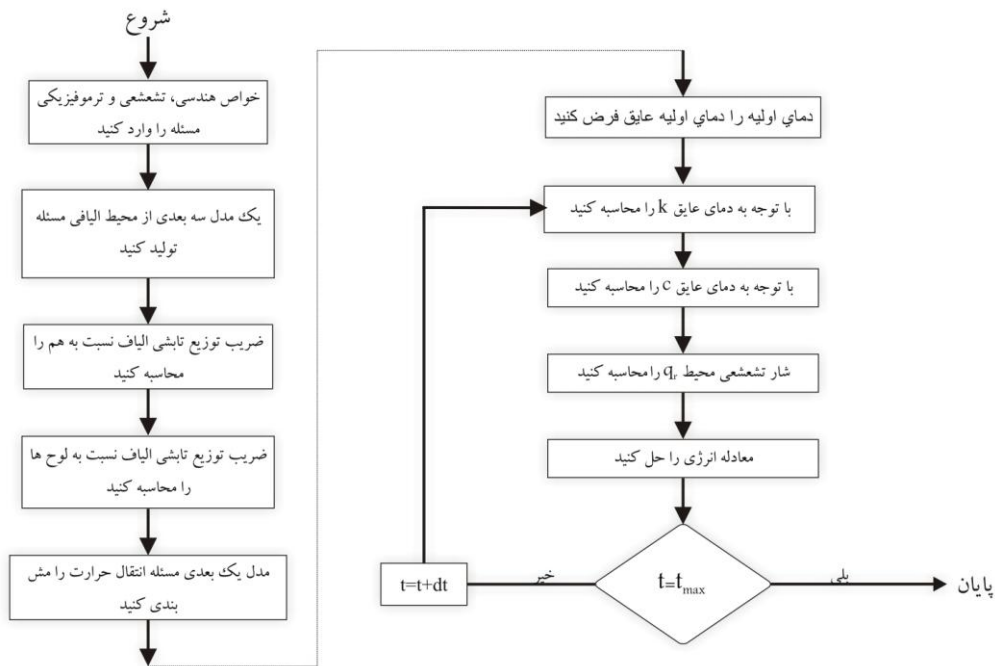
پشم سنگ	پشم شیشه	
۰/۰۳۲۹	۰/۰۳۰۳	اندازه گیری شده با دستگاه جریان حرارت سنج HFM
۰/۰۳۳۷	۰/۰۲۹۸	محاسبه شده با استفاده از کد تهیه شده
۲/۴۳	۱/۶۵	درصد اختلاف نتایج آزمایش و نتایج محاسبه شده با استفاده از کد

۳- نتیجه گیری

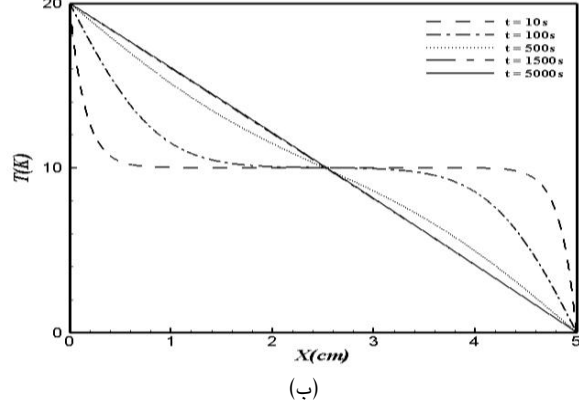
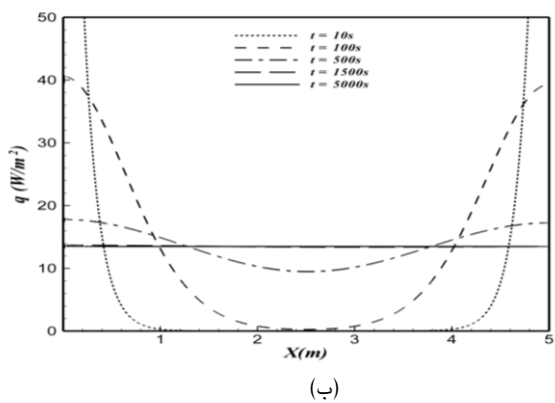
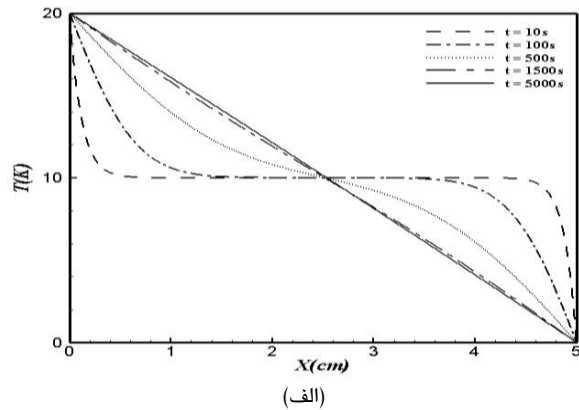
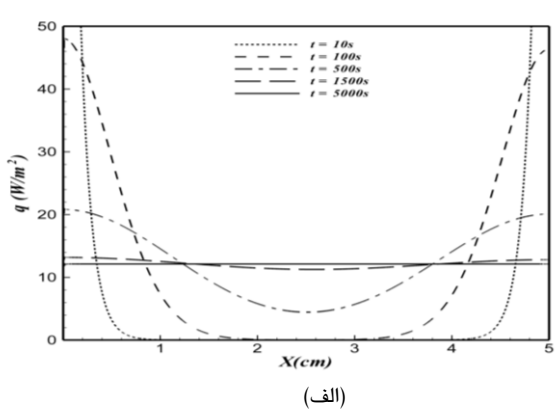
در مدل عددی ارائه شده از مدل‌سازی مستقیم مساله تابش در الیاف با استفاده از روش مونت کارلو و حل معادله انتقال حرارت به طور مرکب استفاده شد. نتایج کد نشان داد که پشم سنگ در زمان کوتاه‌تری به تعادل حرارتی رسیده است. در همه مقاطع زمانی انتقال تابشی در نزدیکی صفحه گرم بیشتر از مناطق دیگر است که دلیل آن وابستگی شار تابشی به توان چهارم دما است. نتایج بدست آمده از کد برابری خوبی با داده‌های آزمایشی در حالت تعادل حرارتی دارد.



شکل ۵: نمودار جریانی روش مونت کارلو برای محاسبه ضریب توزیع تابشی الیاف نسبت به هم

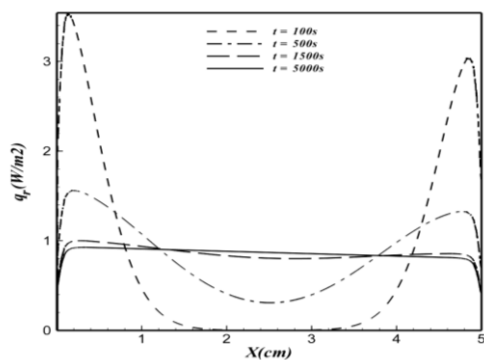


شکل ۶: نمودار جریان‌ی روش مونت کارلو برای محاسبه ضریب توزیع تابشی الیاف نسبت به صفحات گرم و سرد

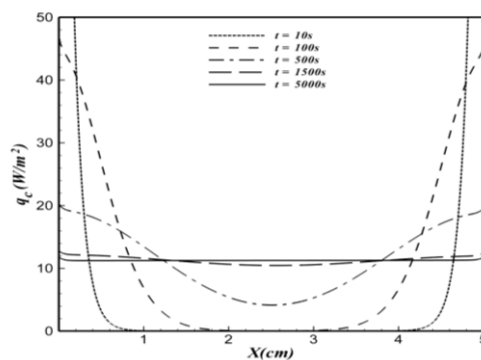


شکل ۸: تغییرات شار حرارتی کلی در برابر مکان در زمان‌های مختلف بدست آمده از مدل عددی الف: پشم شیشه، ب: پشم سنگ

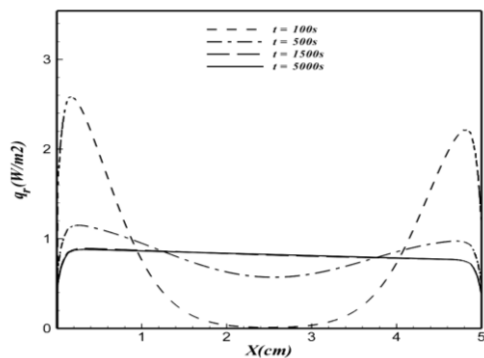
شکل ۷: نمودار تغییرات دما - مکان در برابر مکان در زمان‌های مختلف بدست آمده از مدل عددی الف: پشم شیشه، ب: پشم سنگ



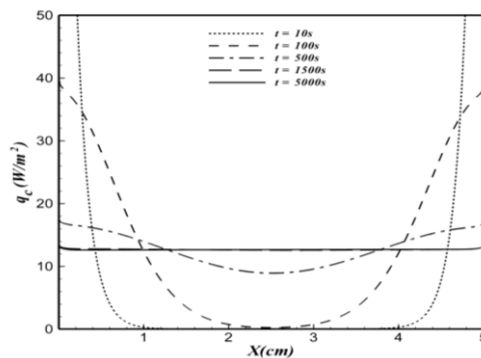
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۱۰: نمودار شار حرارتی تابشی در برابر مکان در زمان‌های مختلف بدست آمده از مدل عددی الف: پشم شیشه، ب: پشم سنگ

شکل ۹: شار حرارت ناشی از هدایت الیاف/ هوا در برابر مکان در زمان‌های مختلف بدست آمده از مدل عددی الف: پشم شیشه،

ب: پشم سنگ

۴- ضمایم: فهرست علائم

D_{mn}	ضریب توزیع تابشی
ε_H	ضریب گسیل لوح سرد
ε_C	ضریب گسیل لوح گرم
ε_i	ضریب گسیل الیاف
ρ	چگالی (kg/m^3)
σ	ثابت استفان بولتزمن؛ ($5.668 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$)
C	لوح سرد
H	لوح گرم

C_p	گرمای ویژه، (J/kgK)
d	ضخامت عایق، (m)
k	ضریب هدایت حرارتی، ($W/m.K$)
q_t	شار حرارتی کل، (W/m^2)
q_c	شار حرارتی ناشی از هدایت الیاف و هوا، (W/m^2)
q_r	شار حرارتی تابشی، (W/m^2)
T	دما، (K)
t	زمان، s
x	مکان، (m)

۵- مراجع

- 373, 2007.
- [۴] Veisheh S.; Hazkaki-Fard A.; Kowsary F.; "Determining of the Air/Fiber Conductivity of Mineral Wool Insulations in Building Applications Using Parameter Estimation Methods", Energy and Buildings in press.
- [۵] Bankvall C.; "Heat Transfer in Fibrous Materials", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 1, No. 5, May 1973, p.p. 235-243.
- [۶] Larkin B. K.; Churchill S. W.; "Heat Transfer by Radiation through Porous Insulations", American Institute of Chemical Engineers Journal, Vol. 4, No. 5, p.p. 467-474, 1959.
- [۱] Cengel Y. A.; Heat Transfer, second edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company, 2003.
- [۲] ویسه، سهراب؛ خدابنده، ناهید؛ اصول و روش های عایق کاری حرارتی بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان: آشنایی با مواد و مصالح مورد استفاده در عایق کاری حرارتی، مرکز تحقیقات ساختمان مسکن، تهران، ش ک-۴۴۳، چاپ اول، ۱۳۸۶.
- [۳] Veisheh S.; Mirmohamadi M.M.; Khodabandeh N.; Hakkaki-Fard A.; "Assessment of Parameters Affecting Compressive Behavior of Mineral Wool Insulations", Asian Journal of Civil Engineering (BUILDING & HOUSING), Vol. 8, No. 4, pp. 359-

- Lee S. C.; Cunnington G. R.; "Heat Transfer in Fibrous Insulation: Comparison of Theory and Experiment", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 12, p.p. 297-303, 1998.
- Tong T. W., Tien C. L., "Radiative Heat Transfer in Fibrous Insulations- Part II: Experimental Study", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, p.p. 76-81, 1983.
- Asllanaj F.; Roche J. R.; Jeandel G.; Lacroix D.; "Transient Combined Radiation and Conduction Heat Transfer in Fibrous Media", *Proc. of Third International Symposium on Radiation Transfer*, Antalya, Turkey, June 17-22, pp. 633-640, 2001.
- Langlais C., Klarsfeld S., "Transfert de chaleur a travers les isolants fiberux en relation avec leur morphologie", *Journee detude du groupement universitaire de thermique*, Paris, pp. 19-53, 1985.
- Kiellmeyer W.H.; Troyer R.L.; *Fibrous Insulations, Handbook of Applied Thermal Design*, Chapter 2, E.C. Guyer and C.L. Brownell, Eds., Taylor & Francis, 1999.
- Strother E.F.; Turner W.C.; *Thermal Insulation Building Guide*, Robert E. Krieger Publishing Company, 1990.
- Mahan; *Radiation Heat Transfer: A statistical Approach*, John Wiley and Sons, INC., 2002.
- Tannehill J.C.; Anderson D.A.; Pletcher R.H.; *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Taylor & Francis, 1984.
- [۷] Tong T. W.; Tien C. L.; "Radiative Heat Transfer in Fibrous Insulations- Part I: Analytical Study", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, p.p. 70-75, 1983.
- [۸] Lee S. C., "Radiative Transfer through A Fibrous Medium: Allowance for Fiber Orientation", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol. 36, No. 3, p.p. 253-263, 1986.
- [۹] Cunnington G. R.; Lee S. C.; "Radiative Properties of Fibrous Insulations: Theory Versus Experiment", *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, Vo. 10, No. 3, p.p. 460-466, 1996.
- [۱۰] Roux J. A.; "Radiative Properties of High and Low Density Fiberglass Insulation in the 4-38.5 μm Wavelength Region", *Journal of Thermal Env. & Building Sci.*, Vo. 27, No. 2, p.p. 135-149, 2003.
- [۱۱] Guilbert G.; Langlais C.; Jeandel G.; Morlot G.; Klarsfeld S.; "Optical characteristic of semitransparent porous media", *High Temp. -High Pres.*, Vol. 19, p.p. 251-259, 1987.
- [۱۲] Asllanaj F.; Jeandel G.; Roche J. R.; "Numerical solution of Radiative Transfer Equation Coupled with Nonlinear Heat Conduction Equation", *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, Vol. 11, No. 5, p.p. 449-473, 2001.
- [۱۳] Boulet P.; Jeandel G.; Morlat G.; "Model of Radiative Transfer in Fibrous Media-Matrix Method", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, p.p. 4287-4297, 1993.
- [۱۴] Sugawara A.; Yoshizawa Y.; "An Experimental Investigation on the Thermal Conductivity of Consolidated Porous Material", *J. of Applied Physics*, Vo. 33, No. 10, p.p. 3135-3138, 1962.

۶- زیر نویس ها

ٗ HFM

٘ NETZSCH

ٙ Oxford Camscan MV 2300