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

سهراب ویسه[i] *; علي حكاكي‌فرد[ii] ؛ میر محمد علی میرمحمدی[iii]

چکیده

در این مقاله رفتار عایق‌های حرارتي الیاف معدنی شامل پشم شیشه و پشم سنگ در انتقال حرارت گذراي مرکب رسانش و تابشي با استفاده از مدل‌سازي عددي و پارامترهاي نیمه تجربي که در این پژوهش با نتایج آزمایش‌ها تعیین شدند، بررسي مي‌شود. پارامترهاي ترموفیزیکي و فیزیکي مورد نیاز در مدل ریاضي مانند ظرفیت حرارتي، ضریب هدایت حرارتي موثر، قطر الیاف و چگالي واقعي و ظاهري این عایق‌ها با انجام آزمایش‌ها تعیین شده و در مدل عددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. انتقال حرارت تابشي با شبیه‌سازي مستقیم بر پایه روش مونت کارلو انجام شده است. ضریب هدایت حرارتي ناشی از هدایت هوا-جامد نیز با استفاده از رابطه نیمه تجربي به دست آمده با آزمایش‌هاي انجام شده و روش‌هاي معکوس تخمین پارامتر تعیین شده‌اند. انتقال حرارت تابشي (به صورت یک منبع حرارتي با معادله انتقال حرارت) با هدایت هوا-جامد جفت شد. نتایج بدست آمده از این مدل همخواني خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

کلمات کلیدي : عایق‌هاي حرارتي، الیاف معدني، مدل‌سازی عددي، انتقال حرارت مرکب رسانش و تابشي.

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

S. Veiseh; 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

[i] * نویسنده مسئول و عضو هیات علمی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن: veiseh@bhrc.ac.ir

[ii] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن: ahakaki@ut.ac.ir

[iii] استاد دانشکده معدن, دانشگاه تهران : mirmohamadi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

بررسي الياف معدنی، از جمله تحقيقات توسعه يافته در جهان است. تمايل به كاهش مصرف انرژي در صنايع باعث افزايش توجه به عايق‌هاي الياف بسيار پر مصرف در اين رشته شده است. امروزه عايق‌هاي حرارتي مبناي طرح‌هاي صرفه‌جويي در مصرف انرژي است [۱].

پژوهشگران زيادي در زمينه خواص عايق‌های الیافی تحقيق كرده‌اند كه برخی از آن خواص عبارتند از: روش‌هاي نصب [۲]، پارامترهای موثر بر رفتار فشاری [۳]، مدل‌سازی انتقال حرارت [۴-۵]، مدل‌سازی انتقال حرارت تابشي [۶-۸]، تخمين خواص تابشي [۹-۱۱]، مدل‌سازي عددي انتقال حرارت [۱۲-۱۴] و تحقيقات تجربي بر روي اين عايق‌ها [۱۵-۱۶].

اسلاناج و همكاران [۱۷]، انتقال حرارت مركب تابش و هدايت گذرا در محيط الیافي با خواص نوري انيزوتروپ را با شرايط مرزي شار و دما بررسي نموده‌اند. آنها براي حل انتقال حرارت تشعشي معادله كلي تابش را در محيط الياف سيليسي حل كرده‌اند. اين پژوهشگران براي هدايت هوا و الياف از رابطه نيمه تجربي ارائه شده براي الياف سيليسي به وسيله لانگلا و كلارسفلد [۱۸] استفاده نموده و گرماي ويژه را در دماهاي مختلف ثابت فرض كردند.

در اين مقاله به بررسي رفتار اين عايق‌ها در انتقال حرارت مركب رسانش و تابشي گذرا با استفاده از مدل‌سازي عددي و به كار بردن پارامترهاي نيمه تجربي كه با آزمايش‌هاي انجام شده بر روي اين عايق‌ها در مركز تحقيقات ساختمان و مسكن تعيين شده‌اند، مي‌پردازيم. در پژوهش حاضر انتقال حرارت تابشی در محيط الیافی با روش مونت كارلو به صورت مستقيم شبيه‌سازی شد. در تحقيقات قبل از روش مونت كارلو به طور بسيار محدودی برای مدل كردن انتقال حرارت تابشی استفاده شده است. روش مونت كارلو فرايندی وقت‌گير است. در اين تحقيق از تعريف ضريب توزيع برای سرعت بخشيدن به محاسبات استفاده شده است. با اين روش تعداد محاسبات در هر تكرار به طور قابل ملاحظه‌ای كاهش يافته است. هم‌چنين تابش با هدايت از طريق عبارت منبع در معادله هدايت حرارت جفت شده است. در واقع اكثر الياف در عايق‌های پشم معدنی در راستای موازی با سطوح و عمود بر شار حرارت قرار گرفته‌اند. در روش به كار برده شده برخلاف كارهای قبل جهت‌يافتگی الياف عمود بر شار حرارت در نظر گرفته شده است كه نسبت به جهت‌يافتگی اتفاقی الياف فرض منطقی‌تری است.

مشخصات دو نوع عايق حرارتي پشم شيشه و پشم سنگ شامل ضرايب هدايت حرارتي مربوط به هدايت هوا و الياف به طور جداگانه در معادلات منظور گرديد. گرماي ويژه براي هر يک از اين مواد بر حسب دما اندازه‌گيري شده و از رابطه Cp-T در معادله انتقال حرارت گذرا استفاده شده است.

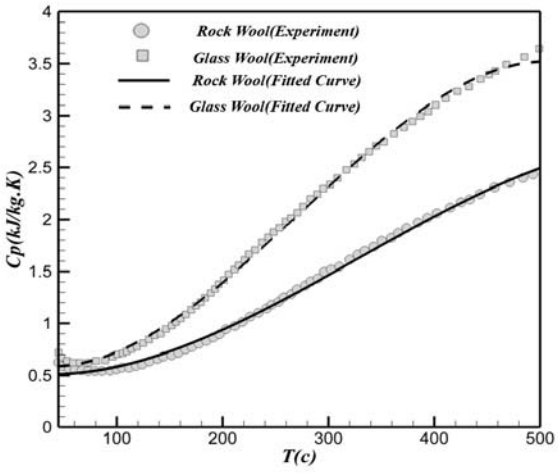
۲- بررسي‌هاي تجربي و مدل‌سازی

دستگاه‌ها و مواد: ضريب هدايت حرارتي و مقاومت حرارتي با دستگاه جريان حرارت سنج[۱] ، طبق استاندارد ملي ايران ۸۶۲۱: سال ۱۳۸۵ "تعيين مقاومت حرارتي به وسيله لوح گرم محافظت شده و روش جريان حرارت‌سنج فراورده‌هاي با مقاومت حرارتي زياد و متوسط، روش آزمون" اندازه‌گيري شد. دستگاه جريان حرارت سنج مورد استفاده ساخت كارخانه نچ [۲]مدل 436/3/1E است. قطر الياف با دستگاه ميكروسكپ الكتروني آكسفورد[۳] و ظرفيت حرارتي مواد با دستگاه STA ساخت كارخانه نچ مدل 449C اندازه‌گيري شد. آزمايش‌ها بر روي فراورده‌هاي پشم شيشه و پشم سنگ كارخانه‌هاي پشم شيشه ايران و پشم سنگ ايران در آزمايشگاه عايق‌هاي حرارتي مركز تحقيقات ساختمان و مسكن انجام شد.

نتايج آزمايش‌ها: گرماي ويژه پشم سنگ و پشم شيشه برحسب دما طبق آزمايش‌هاي انجام گرفته بر روي اين عايق‌ها و منحني درجه سه منطبق شده بر اين نتايج، در شكل (۱) نشان داده شده است. معادله‌هاي (۱) و (۲) به ترتيب رابطه ظرفيت گرمايي- دما را براي عايق‌های پشم شيشه و پشم سنگ نشان مي‌دهند.

$$C_p = 3.89\times10^{-5}T^3 + 3.34\times10^{-2}T^2 + 0.613T + 501 \quad (۱)$$

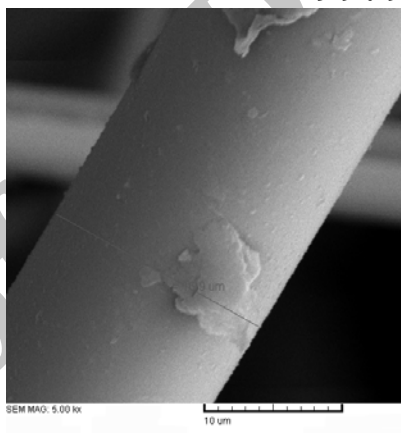
$$C_p = 2.27\times10^{-5}T^3 + 2.23\times10^{-2}T^2 + 1.56T + 540 \quad (۲)$$



شكل ۱: نمودار نتايج آزمايش ظرفيت گرمايي عايق‌هاي معدني پشم شيشه و پشم سنگ

اندازه‌گيري‌هاي قطر الياف نشان داد كه قطر متوسط الياف شيشه ۸/۱ ميكرون و الياف پشم سنگ ۷/۲ ميكرون (شكل ۲) است.

در اندازه‌گیری چگالی انبوهی، دقت اندازه‌گیری طول، عرض و ضخامت آزمونه بهتر از ٪ ۱± بود. بیش‌ترین عدم قطعیت در تعیین ضخامت به دلیل انحراف از یک صفحه تخت ٪۰/۵ و در تعیین جرم آزمونه برای تعیین چگالی ٪۰/۵ بود. دقت اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی بهتر از ٪۳± بود. تکرارپذیری در حالتی که آزمونه در دستگاه ثابت بماند بهتر از ٪۱± به دست آمد. بررسی نشان داد که تکرارپذیری زماني که آزمونه از دستگاه خارج می‌شود و دوباره در دستگاه قرار می‌گیرد نیز بهتر از ٪۱± است.



شكل۲: اندازه‌گيري قطر الياف پشم سنگ با SEM

مدل فيزيكي و معادلات حاكم بر مساله: عايق بين صفحه گرم در بالا و صفحه سرد در پايين با دماهاي ثابت به ترتيب T_H و T_C بنابر روش آزمون اندازه‌گيري ضريب هدايت حرارتي، طبق شكل (۳) قرار گرفته است. در نتيجه شار حرارتي در جهت شتاب جاذبه زمين بوده كه موجب كاهش اثر انتقال حرارت جابجايي مي‌شود. هم‌چنين در اين مساله فرض شده است كه هواي موجود بين الياف، خشک و بدون حركت است، در نتيجه فرض نبود انتقال حرارت جابجايي منطقی است. بنابراين روش‌های انتقال حرارت در عايق‌هاي حرارتي الياف معدني شامل انتقال حرارت تابشي، رسانش الياف، رسانش هوا و تركيبي از آنها خواهد بود يا به طور خلاصه تركيبي از انتقال حرارت رسانش و تابشي بوده است كه مي‌توان آن را به صورت رابطه (۳) نوشت:

$$q_t = q_c + q_r \qquad (۳)$$

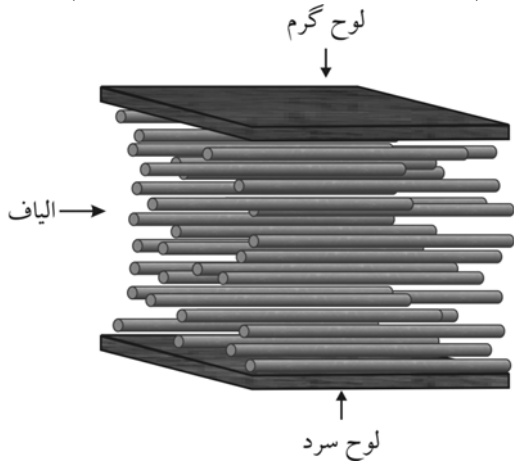
معادلات حاكم بر اين مساله عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{dq_r}{dx}=\rho c_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (۴)$$

كه در آن $k(T)$، ضريب هدايت حرارتي موثر الياف و هوا بوده كه تابعي از دما است. رابطه نيمه تجربي به وسيله ويسه و همكاران [۴]، براي پشم شيشه و پشم سنگ به ترتيب با رابطه‌های (۵) و (۶) به صورت تابعي از دما و چگالي بر پايه نتايج آزمايش‌ها پيشنهاد شده است.

$$k(T)=10^{-3}\left(0.2274T\,0.82+0.0523\rho^{0.91}\left(1+0.0013T\right)\right) \qquad (۵)$$

$$k(T)=10^{-3}\left(0.0620T^{1.014}+0.0572\rho^{0.91}\left(1+0.0081T\right)+0.7171\right) \qquad (۶)$$



شكل ۳: شبيه‌سازي الياف و صفحات گرم و سرد

در اين تحقيق انتقال حرارت تابشي با مدل‌سازی مستقيم بر پايه روش مونت كارلو بررسي شده است. اين روش عددي، بر پايه احتمالات است كه سبب ساده‌سازي در حل عددي مساله مي‌شود. ديدگاه فوتوني انتقال حرارت تابشي، اساس روش آماري مونت كارلو است [۲۱]. رويكرد اصلي در اين روش انتشار تعداد زيادي بسته‌هاي انرژي است كه از المان‌هاي صفحه‌اي تصادفي منتشر شده و پس از انعكاس‌هاي فراوان به وسيله المان‌هاي صفحه‌اي ديگر جذب مي‌شوند [۲۱].

در نتيجه رابطه يک بعدي انتقال حرارت تابشي را مي‌توان به صورت معادله (۷) نوشت:

$$\begin{aligned}(q_r)_i &= \sigma\left(\varepsilon_H D_{Hi}T_H^4-\varepsilon_i D_{iH}T_i^4\right)+\sigma\left(\varepsilon_i D_{iC}T_i^4-\varepsilon_C D_{Ci}T_C^4\right)\\ &+\sigma\sum_{j=1}^{i}\left(\varepsilon_j D_{ji}T_j^4-\varepsilon_i D_{ij}T_i^4\right)+\sigma\sum_{j=i+1}^{n}\left(\varepsilon_i D_{ij}T_i^4-\varepsilon_j D_{ji}T_j^4\right)\end{aligned} \qquad (۷)$$

كه در آن D_{nm} ضريب توزيع تابشي است و به صورت كسري از تابش نفوذي است كه از المان‌هاي سطحي n منتشر شده و به المان‌هاي سطحي m رسيده (با توجه به تابش مستقيم و يا همه انعكاس‌هاي ممكن در محيط) و جذب آن شود [۲۱]. با توجه به يک بعدي بودن مساله انتقال حرارت، مساله انتقال حرارت تابشي سه بعدي تبديل به يک بعدي مي‌شود يعني تابش

بين صفحات موازي انجام مي‌شود. بنابراين لازم است ضـرايب توزيع تابشي بين اين صفحات و هم‌چنين ميان صـفحات اليـافي و صفحات گرم و سرد تعيين شـوند. بـراى اىـن كـار از روش مونت كارلو استفاده شده است. با توجه به اين نكتـه كـه انتقـال حرارت تابشي به طور ذاتي يک پديده سه بعدي اسـت، ضـريب توزيع تابشي ميان الياف و هم‌چنين ميان الياف و صفحات گـرم و سرد ابتدا به صورت سه بعدي محاسبه شـد. سـپس ضـريب توزيع تابشي محاسبه شده در سه بعد را در صفحات دو بعدي تصوير كرده و با انتگرال‌گيري ضرايب در اين صفحات، در يک بعد تصوير شوند تا بتوان از آنها در معادله (۴) اسـتفاده نمـود. با توجه به اين نكته كه خـواص تابـشي ايـن اليـاف در دماهـاي متوسـط تغييـر چنـداني نمـي‌كننـد، ايـن ضـرايب در يـک دمـاي متوسط محاسبه شدند و نيازي به محاسبه اين ضرايب در هـر مرحله از حل مساله نيست. براي حساب كـردن ضـريب توزيـع تابشي الياف نسبت بـه صـفحات گـرم و سـرد، ضـريب توزيـع تابشي صفحات گرم و سرد نسبت به الياف محاسبه شد و با به كار بـردن قـانون بازگـشت [۲۱] ضـريب توزيـع تابـشي اليـاف نسبت به صفحات گرم و سرد با معادله (۸) محاسبه شده است.

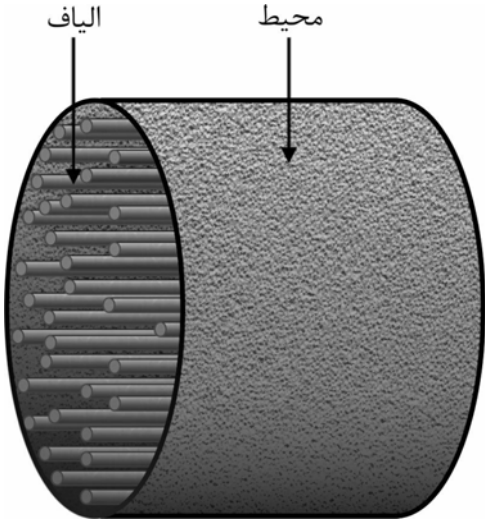
$$\varepsilon_m A_m D_{mn} = \varepsilon_n A_n D_{nm} \qquad (۸)$$

روش محاسبه ضرايب توزيع تابشي عبارت است از:

سيلندري را با شعاع معين و با ارتفاع بي‌نهايت در محيطي اليافي كه الياف آن به صورت تصادفي و با توزيع يكنواخت، موازي محور سيلندر توزيع شده‌اند را طبق شكل (۴) فرض مي‌كنيم. تعداد الياف در اين سيلندر متناسب با چگالي عايق است. با توجه به اين كه چگالي عايق و ضخامت الياف قابل اندازه‌گيري است، تعداد متوسط الياف در محيط را مي‌توان محاسبه نمود.

شكل (۵) نمودار جرياني محاسبه ضريب توزيع تابشي الياف نسبت به هم را با روش مونت كارلو نشان مي‌دهد. همين روش براي محاسبه ضريب توزيع تابشي الياف نسبت به صفحات گرم و سرد به كار رفت. فرض شد كه صفحات گرم و سرد، سطوحي جاذب و بازتابشي هستند. براي حل معادله انرژي از روش ساده ضمني (روش لاسونن) [۲۲] استفاده شد. اين روش با دقت مرتبه اول و خطاي برشي از مرتبه $O\left[\Delta t,(\Delta x)^2\right]$ بوده و بدون شرط پايدار است. حل معادلات جفت شده انرژي و تابش، يک فرآيند تكراري است. نمودار جرياني اين روش در شكل ۶ نشان داده شده است. در اين پژوهش شبكه‌هاى فراواني با تعداد ۵۰۰ گره، ۱۰۰۰ گره، ۲۵۰۰ گره و ۱۰۰۰۰ گره امتحان شده‌اند. مقايسه نتايج نشان داده‌اند كه شبكه ۵۰۰۰ گره‌اى براى اين مطالعه مناسب است.

محاسبات و نتايج: نتايج بدست آمده از كد ارائه شده براي دو نوع فراورده پشم شيشه و پشم سنگ مورد بررسي قرار گرفت. هر دو فراورده داراي چگالي (kg/m^3) ۱۰۰ و ضخامت (cm)۵ است. قطر متوسط الياف شيشه و الياف سنگ به ترتيب برابر با ۸/۱ و ۷/۲ ميكرون است.



شكل ۴: محيط شبيه‌سازي شده براى محاسبه ضرايب توزيع تابشى

شرايط اوليه عايق: دماي ۱۰ درجه سلسيوس با شرايط مرزي؛ صفحه سرد در دماي ثابت صفر درجه سلسيوس و صفحه گرم در دماي ثابت ۲۰ درجه سلسيوس در نظر گرفته شدند كه طبق شرايط عايق در دستگاه جريان حرارت سنج است. نتايج بدست آمده از كد در شكل‌هاي (۷) تا (۱۰) نشان داده شده‌اند.

براي مقايسه نتايج بدست آمده از كد و دستگاه HFM، ضريب هدايت حرارتي موثر اين عايق‌ها در زمان تعادل حرارتي در جدول (۱) آمده است كه نشان مي‌دهد نتايج برابري خوبي با هم دارند.

نتايج كد نشان داد كه پشم سنگ در زمان كوتاه‌تري به تعادل حرارتي رسيده و ضريب هدايت حرارتي آن بيشتر از پشم شيشه است كه با نتايج آزمايش برابري دارد.

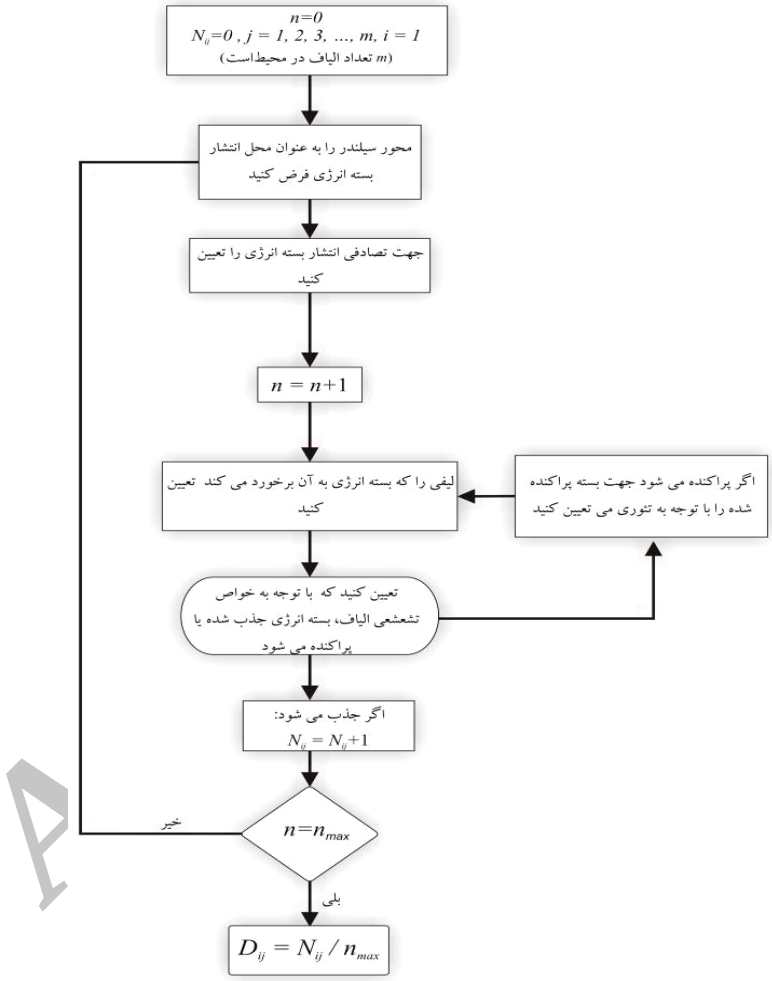
در همه مقاطع زماني انتقال تابشي در نزديكي صفحه گرم بيشتر از مناطق ديگر است كه دليل آن وابستگي شار تابشي به توان چهارم دما است. اين شار با فاصله گرفتن از صفحه گرم و كاهش دما بر اثر تابش از سطوح با دماي كمتر كاهش مي‌يابد. انتقال هدايت جامد از ميان محيط اليافي نسبت به صفحه مياني متقارن است. هم‌چنين نتايج كد نشان داد كه در زمان‌هاي ابتدايي قبل از ۱۰۰ ثانيه، مناطق داخلي مواد تحت تاثير شار حرارتي قرار نگرفته‌اند.

جدول۱: ضريب هدايت حرارتي موثر عايق‌هاي معدني پشم سنگ و پشم شيشه در وضعيت پايدار حرارتي

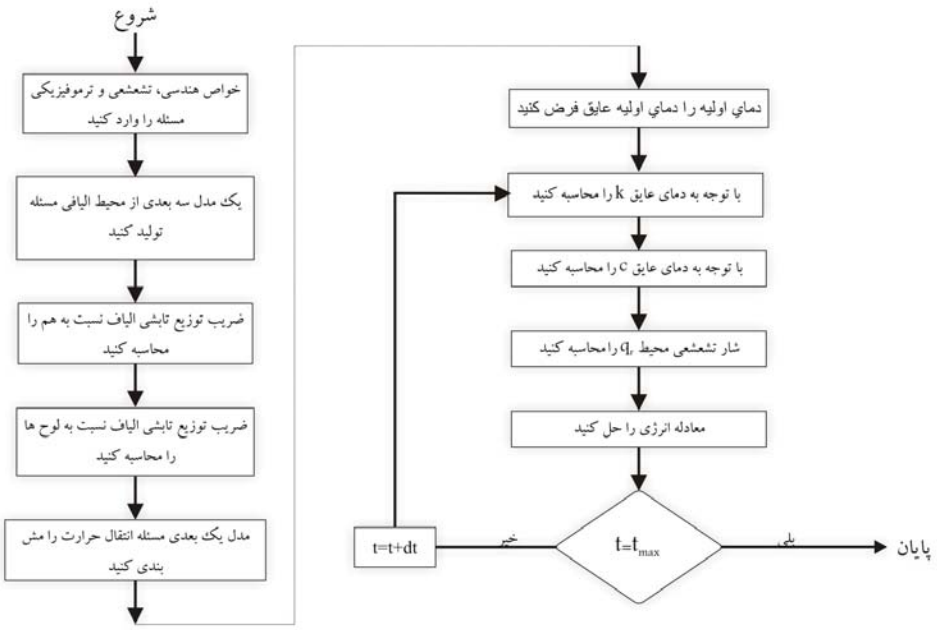
	پشم شيشه	پشم سنگ
اندازه گيري شده با دستگاه جريان حرارت سنج *HFM*	۰/۰۳۰۳	۰/۰۳۲۹
محاسبه شده با استفاده از کد تهيه شده	۰/۰۲۹۸	۰/۰۳۳۷
درصد اختلاف نتايج آزمايش و نتايج محاسبه شده با استفاده از کد	۱/۶۵	۲/۴۳

۳- نتيجه‌گيري

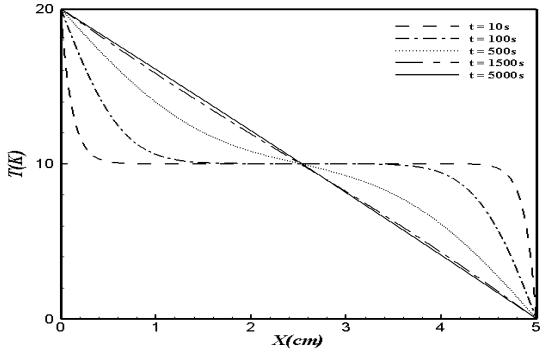
در مدل عددي ارائه شده از مدل‌سازی مستقيم مساله تابش در الياف با استفاده از روش مونت کارلو و حل معادله انتقال حرارت به طور مرکب استفاده شد. نتايج کد نشان داد که پشم سنگ در زمان کوتاه‌تري به تعادل حرارتي رسيده است. در همه مقاطع زماني انتقال تابشي در نزديکي صفحه گرم بيشتر از مناطق ديگر است که دليل آن وابستگي شار تابشي به توان چهارم دما است. نتايج بدست آمده از کد برابري خوبي با داده‌هاي آزمايشي در حالت تعادل حرارتي دارد.



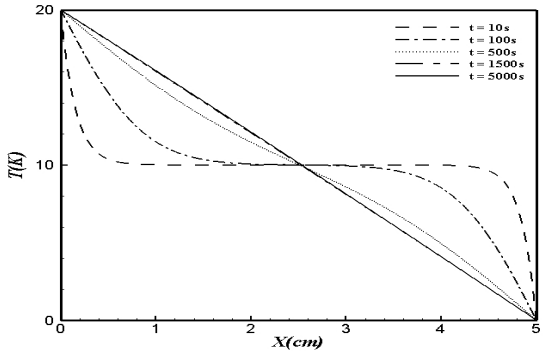
شکل۵: نمودار جرياني روش مونت کارلو براي محاسبه ضريب توزيع تابشي الياف نسبت به هم



شکل۶: نمودار جریاني روش مونت کارلو براي محاسبه ضریب توزیع تابشي الیاف نسبت به صفحات گرم و سرد

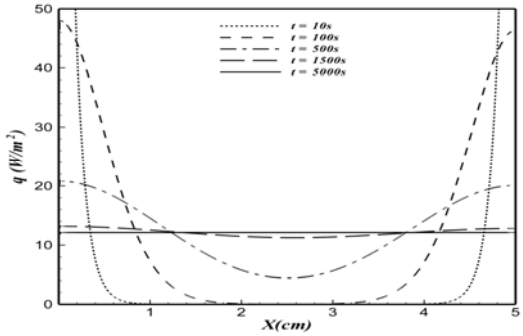


(الف)

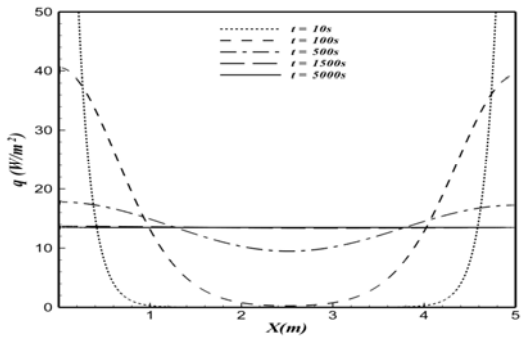


(ب)

شکل۷: نمودار تغییرات دما - مکان در برابر مکان در زمان‌هاي مختلف بدست‌آمده از مدل عددي الف: پشم شیشه، ب: پشم سنگ

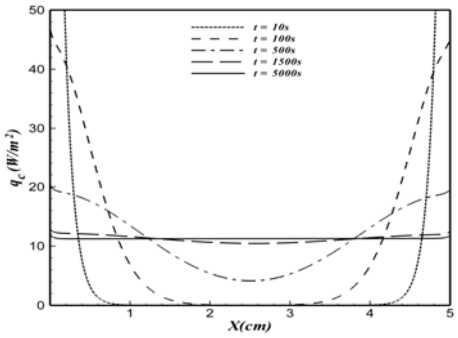


(الف)

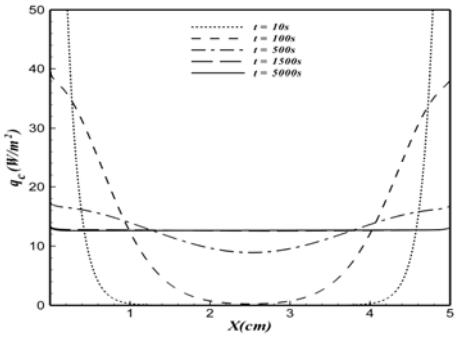


(ب)

شکل۸: تغییرات شار حرارتي کلي در برابر مکان در زمان‌هاي مختلف بدست‌آمده از مدل عددي الف: پشم شیشه، ب: پشم سنگ

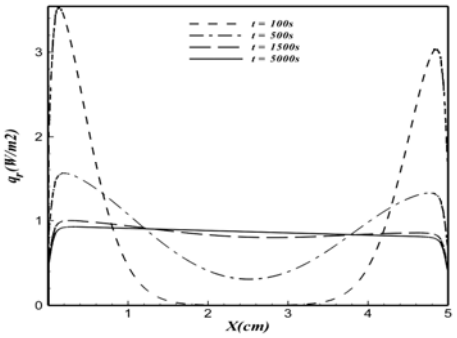


(الف)

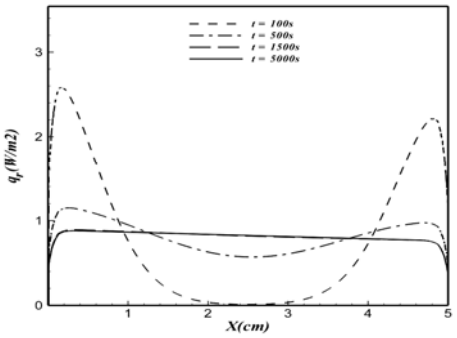


(ب)

شكل ۹: شار حرارت ناشي از هدايت الياف/ هوا در برابر مكان در زمان‌هاي مختلف بدست‌آمده از مدل عددي الف: پشم شيشه، ب: پشم سنگ



(الف)



(ب)

شكل ۱۰: نمودار شار حرارتي تابشي در برابر مكان در زمان‌هاي مختلف بدست‌آمده از مدل عددي الف: پشم شيشه، ب: پشم سنگ

۴- ضمائم: فهرست علائم

گرماي ويژه، (J/kgK)	C_p
ضخامت عايق، (m)	d
ضريب هدايت حرارتي، $(W/m.K)$	k
شار حرارتي كل، (W/m^2)	q_t
شار حرارتي ناشي از هدايت الياف و هوا، (W/m^2)	q_c
شار حرارتي تابشي، (W/m^2)	q_r
دما، (K)	T
زمان، s	t
مكان، (m)	x

ضريب توزيع تابشي	D_{mn}
ضريب گسيل لوح سرد	ε_H
ضريب گسيل لوح گرم	ε_C
ضريب گسيل الياف	ε_i
چگالي (kg/m^3)	ρ
ثابت استفان بولتزمن؛ $(5.668\times10^{-8}\ W/m^2.K^4)$	σ
لوح سرد	C
لوح گرم	H

۵- مراجع

[۱] Cengel Y. A.; Heat Transfer, second edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company, 2003.

[۲] ويسه، سهراب؛ خدابنده، ناهيد؛ اصول و روش های عايق كاری حرارتی بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان: آشنايی با مواد و مصالح مورد استفاده در عايق كاری حرارتی، مركز تحقيقات ساختمان مسكن، تهران، ش ك- ۴۴۳، چاپ اول، ۱۳۸۶.

[۳] Veiseh 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. 359-373, 2007.

[٤] Veiseh S.; Hazkkaki-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.

[٦] 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.

[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.

[۱٤] 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.

[۱۵] 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.

[۱٦] 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.

[۱۷] 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.

[۱۸] 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.

[۱۹] Kielmeyer 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.

[۲۰] Strother E.F.; Turner W.C.; Thermal Insulation Building Guide, Robert E. Krieger Publishing Company, 1990.

[۲۱] Mahan; Radiation Heat Transfer: A statistical Approach, John Wiley and Sons, INC., 2002.

[۲۲] Tannehill J.C.; Anderson D.A.; Pletcher R.H.; Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Taylor & Francis, 1984.

۶- زیرنویس ها

[1] HFM
[2] NETZSCH
3 Oxford Camscan MV 2300