

بررسی اثر استفاده از بلوک‌های سفالی توخالی پر شده با کاه گندم فشرده به عنوان عایق گرمایی

رویا احمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران،
r.ahmadi1392@yahoo.com

بابک سوری*

دانشیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران،
bsouri@uok.ac.ir

مسعود ابراهیمی

دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران،
masood_ebrahimi@yahoo.com

چکیده

کاه گندم از جمله ضایعات بخش کشاورزی است که در اراضی زراعی سوزانده می‌شود و منجر به ورود گازهای گلخانه‌ای به جو می‌گردد. هدف این مطالعه ارزیابی اتلاف انرژی گرمایی از دیواره بیرونی ساختمان هنگامی که با استفاده از بلوک‌های سفالی توخالی پر شده با کاه گندم فشرده ساخته شده است می‌باشد. از این رو بلوک‌های سفالی توخالی در قیاس با حالتی که به وسیله کاه گندم فشرده (دارای تراکم 0.156 g cm^{-3}) پر شده‌اند برای ساخت دیواره‌های یک مدل محفظه آزمایشی در فضای باز استفاده شد و اتلاف انرژی گرمایی از دیواره‌های آن مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه خصوصیات حرارتی دیواره‌های ساخته شده از بلوک‌های سفالی عایق نشده/شده با استفاده از کاه گندم فشرده شامل: رسانایی گرمایی، آهنگ انتقال گرما و ضریب انتقال گرمای کلی کاهش پارامترهای مذکور به ترتیب از 0.2 به $0.04 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ، 18.36 به 6.98 W m^{-2} و 1.7 به $0.41 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ، 72 تا 81 درصد اتلاف انرژی گرمایی از دیواره‌های ساختمان را کاهش داد. کاربرد کاه فشرده می‌تواند بین 72 تا 81 درصد اتلاف انرژی گرمایی از دیواره‌های ساختمان را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: بلوک، عایق، کاه، ساختمان، خصوصیات حرارتی، اتلاف انرژی.

Effect investigation of application of fired clay hallow bricks filled with compacted wheat straw as heat insulation

R. Ahmadi

Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

B. Souri

Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

M. Ebrahimi

Department of Mechanics, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Abstract

Wheat straw is one of the wastes produced in agricultural section that is burned in the farmlands entering huge greenhouse gases into the atmosphere. The aim of this study is to evaluate thermal energy loss from external walls of a building constructed using fired clay hollow bricks filled with compacted wheat straw. Hence, fired clay hollow bricks compared to those filled with compacted wheat straw (having a density of 0.156 g cm^{-3}) were used to build up the walls of an experimental container model outdoor and thermal energy loss throughout the walls of it were evaluated. Comparison of thermal properties of the constructed walls using non insulated fired clay hollow bricks or insulated with compacted wheat straw including: thermal conductivity, heat flow rate and heat transfer coefficient showed decreasing from 0.2 to $0.04 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 18.36 to 6.98 W m^{-2} and 1.7 to $0.41 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, respectively, for insulated walls. The results revealed a decreased thermal energy loss between 72 to 81 percent from walls of the building constructed once compacted wheat straw with the compaction degree applied.

Keywords: Brick, Insulation, Straw, Building, Thermal Properties, Energy Loss.

۱- مقدمه

می‌شوند [۸]. عایق‌سازی گرمایی ساختمان یکی از تکنیک‌هایی است که به منظور کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های گرمایشی، تهویه و تهویه مطبوع (Heating, Ventilating and Air Conditioning /HVAC) اتخاذ شده است [۹] و نقش مهمی در بهبود بازده مصرف انرژی دارند [۴]. اگرچه عایق‌های مختلفی در صنعت ساختمان وجود دارد اما بیشتر آنها در زمره آلاینده‌های محیطی هستند [۳، ۴، ۸]. از دیدگاه صرفه‌جویی در مصرف انرژی و حفاظت از محیط‌زیست بکارگیری انواعی از مصالح ساختمانی که منجر به کاهش میزان مصرف انرژی و تقلیل آلودگی‌های محیط‌زیست در هنگام تهیه مواد اولیه، فرآیند تولید، حمل و نقل، ساخت و ساز، بهره برداری و تخریب ابنیه شوند بسیار حائز اهمیت هستند. ساختمان‌های سازگار با محیط‌زیست شامل طیف وسیعی از سیستم‌ها و مصالح ساختمانی هستند که تا حد ممکن طبیعی، تجدیدپذیر، در

امروزه جامعه جهانی با چالش‌های اساسی مربوط به مصرف زیاد انرژی از جمله کمبود منابع انرژی، آلودگی‌های محیطی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات آب و هوایی روبرو است [۱]. از این رو هر اقدامی که منجر به کاهش مصرف انرژی در جامعه شود و از ورود ضایعات و آلاینده‌ها به محیط‌زیست جلوگیری نماید می‌تواند منجر به تخفیف این چالش‌ها گردد. ساختمان‌ها ۳۰ تا ۴۰ درصد از مصرف انرژی جهان را به خود اختصاص داده‌اند [۳]. ضمن آن که مصرف انرژی در بخش ساختمان در ایران $2/58$ برابر میانگین جهانی است [۴]. در عین حال ۳۵ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان مربوط به بخش ساختمان است [۵-۷]. همچنین فعالیت‌های ساخت و ساز و بازسازی ساختمان‌ها به دلیل مصرف زیاد مواد و انرژی و تولید بقایای آلاینده یکی از اقدامات منفی زیست‌محیطی تلقی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: bsouri@uok.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۶

دسترس و سالم باشند. در این خصوص استفاده محلی از مواد طبیعی و تجدیدپذیر مانند بقایای کشاورزی به عنوان مصالح ساختمانی مزایای زیادی برای محیط‌زیست و سلامت انسان دارد [۱۰-۱۳]. مطالعات قبلی استفاده از مواد مختلف تجدیدپذیر و طبیعی را به عنوان عایق گرما در صنعت ساختمان گزارش کرده‌اند [۱۴-۱۹]. ضمن آنکه کارایی مواد عایق طبیعی را در مقایسه با مواد مرسوم تأیید نموده‌اند [۲۰-۲۳]. کاه گندم یکی از ضایعات کشاورزی معمول در کشورهای تولیدکننده گندم است که یک فرآورده طبیعی، ارزان قیمت و فراوان می‌باشد که اغلب به عنوان یک پدیده تکرار شونده سالانه در اراضی زراعی سوزانده شده و موجب انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن می‌گردد [۱۲، ۲۴، ۲۵]. از زمان‌های گذشته از کاه به دلیل ساختار توخالی، تراکم کم و خصوصیات گرمایی آن به عنوان عایق ساختمان استفاده می‌شده است [۱۵]. محتوای زیاد سیلیس در کاه باعث مقاومت در برابر پوسیدگی می‌شود و ویژگی الیاف بلند آن برای ساخت سازه می‌تواند مناسب باشد [۲۶]. علاوه بر این، فراوانی هر ماده طبیعی بسته به موقعیت جغرافیایی آن منطقه نقش مهمی در تصمیم‌گیری در مورد مواد بکار رفته در صنعت ساخت و ساز و همچنین مواد طبیعی مورد استفاده برای عایقکاری ساختمان‌ها دارد [۲۷]. بلوک‌های سفالی که اخیراً به عنوان بلوک‌های سفالی توخالی تولید شده‌اند در بسیاری از کشورها از جمله ایران که کاه محصول جانبی کاشت گندم است، جزو مصالح ساختمانی بسیار رایج در صنعت ساختمان هستند [۱۳، ۲۸-۳۱]. از این رو استفاده از کاه در ساختمان نه تنها مشکل کاه را به عنوان ضایعات بخش کشاورزی حل می‌کند بلکه بدلیل طبیعی بودن و عدم آلاینده‌گی آن می‌تواند منجر به کاهش اثرات منفی فعالیت‌های مربوط به بخش ساخت و ساز در محیط‌زیست گردد [۱۵، ۲۱]. از این رو هدف این مطالعه ارزیابی کاربردی اتلاف انرژی گرمایی از دیواره بیرونی ساختمان هنگامی که با استفاده از بلوک‌های سفالی توخالی پر شده با کاه گندم فشرده ساخته شده است می‌باشد.

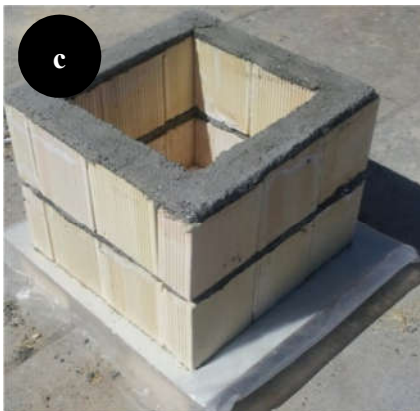
بوچیر [۳۲] در مطالعه‌ای چوب پنبه و پلی استایرن منبسط شده را به عنوان ماده پرکننده (عایق) حفره‌های آجر به کار برد. محاسبات انجام شده نشان داد که با عایق‌بندی آجرها با این مواد طبیعی مقاومت گرمایی به میزان $۸۸/۶۴$ تا $۹۲/۳۳$ افزایش می‌یابد. فیتوس و پانیاکائو [۹] خواص گرمایی قطعات عایق ساخته شده از باگاس و پوسته نارگیل را مورد بررسی قرار دادند که بر اساس نتایج بدست آمده، مقادیر رسانایی گرمایی اندازه‌گیری شده برای قطعات عایق ساخته شده از پوسته نارگیل و باگاس بین $۰/۰۶۸ \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ و $۰/۰۴۶$ بدست آمد که این مقادیر با رسانایی گرمایی عایق‌های مرسوم مانند الیاف سلولزی و پشم معدنی قابل رقابت می‌باشند. کورجنیک و همکاران [۲۰] در تحقیقی عایق‌های گرمایی ساخته شده از منابع تجدیدپذیر نظیر جوت، کتان و کنف را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که خواص عایق‌های ساخته شده از الیاف آلی به طور کامل قابل مقایسه با عایق‌های مرسوم ساخته شده از مواد سنتز شده و مصنوعی از جمله پلی استایرن می‌باشد. پینتو و همکاران

[۱۸] چوب بلال را که از جمله ضایعات کشاورزی است به عنوان عایق گرمایی بررسی و نشان دادند که شباهت قابل توجهی بین چوب بلال و پلی‌استایرن از نظر ریز ساختار و ترکیب شیمیایی وجود دارد. در مطالعات دیگری که توسط زک و همکاران [۳۳] و همچنین کورسکادن و همکاران [۳۴] انجام گرفت مشخص شد که عایق گرمایی متشکل از پشم دامی دارای ویژگی‌های قابل مقایسه با پشم‌های معدنی/ پشم سنگ است و در برخی از موارد حتی عملکرد بهتری دارد. هم خوانی با زیست‌محیطی و تجدیدپذیر بودن، سهولت در استفاده و تاثیر منفی بسیار کم بهداشتی، توانایی بالا برای جذب و تنظیم رطوبت و همچنین مقاومت بالا در برابر آتش از مزایای دیگر پشم دامی است. کاسکون و همکاران [۳۵] در مطالعه‌ای به ارزیابی عملکرد حرارتی و صوتی کاه گندم به عنوان یک عایق طبیعی و سازگار با محیط‌زیست در صنعت ساختمان پرداختند. نتایج نشان داد که کاه گندم به با عایق‌های مصنوعی رایج قابل رقابت است. در این بررسی توصیه شده است که به منظور بهبود عملکرد عایق، پایداری و مقاومت در برابر آتش حداقل چگالی کاه $۱۱۰-۱۵۰ \text{ kg m}^{-3}$ و حداکثر رطوبت آن ۲۰% باشد. در تحقیقی دیگر نیز میرون و همکاران [۳۶] ویژگی‌های حرارتی کاه گندم را مورد بررسی قرار دادند. هدف این مطالعه که در دسته "فناوری ساختمان‌های سبز" قرار می‌گیرد معرفی یک عایق جدید و سازگار با محیط زیست با کمترین آلودگی زیست‌محیطی می‌باشد که استفاده از کاه گندم را به عنوان عایق در صنعت ساختمان تأیید می‌کند. در ایران در زمینه عایق‌های طبیعی مطالعات بسیار محدودی انجام شده و مخصوصاً در مورد استفاده از کاه گندم به عنوان یک ماده پرکننده بلوک‌های سفالی حفره‌دار هیچ مطالعه‌ای صورت نگرفته است [۳۷، ۳۸]. از آنجاییکه کاه گندم یک ماده آلی طبیعی است لذا میزان ماندگاری آن با میزان رطوبت کاه همبستگی دارد. طبق بررسی‌هایی که توسط کاسکون و همکاران [۳۵] صورت گرفته است برای افزایش دوام، پایداری و جلوگیری از پوسیدگی و رشد قارچ و کپک میزان رطوبت کاه باید کمتر از ۲۰% باشد.

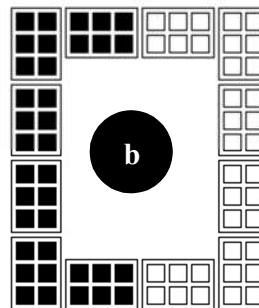
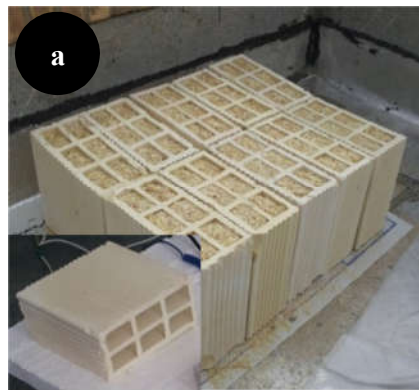
۲- مبانی و روش‌ها

۲-۱- شرح مدل

به منظور بررسی عملکرد گرمایی کاه گندم بمنظور عایق‌سازی بلوک‌های سفالی حفره‌دار از یک مدل محفظه‌ای آزمایشی ساخته شده در فضای باز بر روی یک قطعه تخته نئوپان با ابعاد ۸۰×۸۰ سانتی متر و واجد چهار دیواره بیرونی با ضخامت و مساحت یکسان استفاده شد. ابعاد مدل خود $۶۰ \times ۶۰ \times ۴۵$ سانتی متر (عرض \times طول \times ارتفاع) بود که در آن دیواره‌ها از بلوک‌های سفالی به ابعاد $۲۰ \times ۲۰ \times ۱۰$ سانتی‌متر ساخته شدند که هر یک از بلوک‌های سفالی دارای ۶ حفره $۳ \times ۵ \times ۲۰$ سانتی‌متر بود. در مجموع بیست بلوک سفالی در ساخت مدل به کار رفت که با ملات ماسه و سیمان به یکدیگر متصل شده‌اند بطوریکه نیمی از مساحت دیواره‌های مدل با استفاده از بلوک‌های



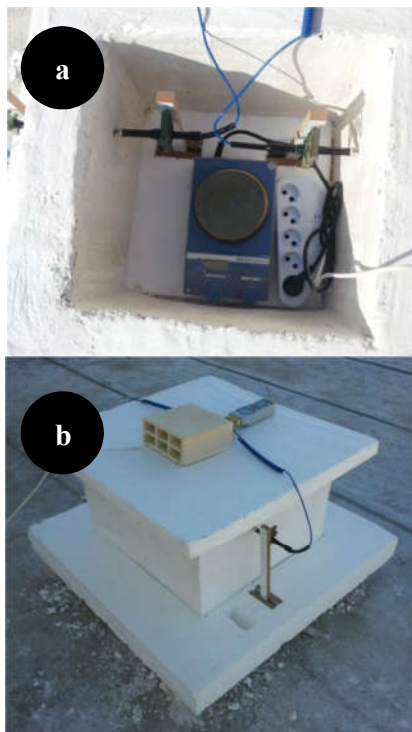
سفالی حفره‌دار توخالی و نیم دیگر با استفاده از بلوک‌های سفالی حفره‌دار پر شده از کاه فشرده (با تراکم 0.156 g m^{-3}) ساخته شد. لازم به ذکر است که توده کاهی که در درون حفره‌های بلوک‌های سفالی وارد گردید با متراکم نمودن دستی جای داده شد و چگالی بدست آمده نیز حاصل میانگین‌گیری از نسبت جرم به حجم توده کاه در ۱۲ حفره مربوط به دو عدد بلوک سفالی میباشد. همچنین به منظور پوشاندن درزها دیواره‌های مدل گچ کاری شده و از ورق‌های پلی استایرن منبسط شده به ابعاد $100 \times 100 \times 5$ سانتی متر به عنوان سقف و کف محفظه و به منظور جلوگیری از اتلاف حرارت برای مدل استفاده شد [۳۹] (شکل ۱).



شکل ۱- بلوک سفالی توخالی با ابعاد $20 \times 20 \times 10$ سانتی متر که دارای شش حفره هر یک با اندازه $3 \times 5 \times 20$ سانتی متر می‌باشد و تصویر ۱۰ عدد از این بلوک‌ها که حفرات مذکور در آنها با استفاده از کاه فشرده گندم پر شده‌اند (a)؛ دیواره‌های دو سمت مدل یک طرف ساخته شده با استفاده از بلوک‌های سفالی حفره دار توخالی و طرف دیگر با استفاده از بلوک‌های سفالی حفره دار پر شده از کاه فشرده گندم (b)؛ مدل محفظه ساخته شده که در آن بلوک‌های سفالی با ملات ماسه و سیمان به یکدیگر متصل شده و بر روی یک قطعه نئوپان با ابعاد 80×80 سانتی متر در فضای باز مستقر گردیده است (c) مدل محفظه نهایی با دیواره‌های گچ کاری شده و ورق‌های پلی استایرن منبسط شده بکار رفته با ابعاد 100×100 سانتی متر و ضخامت ۵ سانتی متر به عنوان سقف و کف (d)

۲-۲- تعیین رسانایی گرمایی

پارامتر اصلی برای توصیف خصوصیات مواد عایق، رسانایی گرمایی $\lambda \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ است که عبارت است از مقدار انرژی گرمایی که ماده می‌تواند در ضخامت واحد و در زمان واحد و در دمای مشخص از خود عبور دهد. اگر رسانایی گرمایی ماده کمتر از $0.069 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ باشد آن را عایق گرمایی می‌نامند [۴۰]. در این مطالعه از ورقه‌های مسی به ابعاد $20 \times 20 \times 0.5$ سانتی متر (طول \times عرض \times ضخامت) با وزن ۳۱۵ گرم برای اندازه‌گیری درجه حرارت داخلی و خارجی دیواره‌ها استفاده شد [۴۱]. ورقه‌های مسی بر روی سطوح داخلی و خارجی دیواره بیرونی مدل که در یک سمت با کاه فشرده عایق کاری شدند و



شکل ۳- نمای داخلی (الف) و نمای خارجی مدل (ب) که در آنها منبع گرما در داخل و حسگرهای گرمایی در داخل و خارج محفظه مدل در حالیکه مستقیماً در تماس با دو دیواره مقابل که یکی عایق شده با استفاده از کاه فشرده گندم و دیگری بدون عایق هستند در روی هر دو طرف مدل نشان داده شده‌اند.

آهنگ انتقال گرما نیز با استفاده از معادله (۳) که مشهور به معادله فوریه است تعیین شد [۲۰]:

$$q = -\lambda \Delta T / \Delta X \quad (3)$$

که در آن q شار گرمایی ($W m^{-2}$)، λ رسانایی گرمایی ($W m^{-1} \cdot C^{-1}$) و $\Delta T / \Delta X$ شیب دما (C) است.

۲-۴- محاسبه ضریب انتقال گرمای کلی

طبق استاندارد بین المللی ضریب انتقال گرمای کلی (U) از یک ماده یا یک سیستم ساختمانی را می‌توان با استفاده از معادله (۴) تعیین نمود [۲۲]:

$$U = \frac{\sum_{n=1}^{n_{total}} q(n)}{\sum_{n=1}^{n_{total}} (T_i(n) - T_e(n))} \quad (4)$$

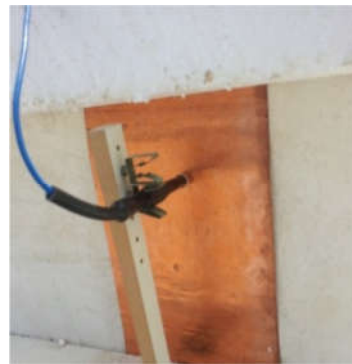
که در آن $q(n)$ جریان گرما از طریق دیواره در لحظه n است (بر حسب $W m^{-2}$); $T_i(n)$ و $T_e(n)$ به ترتیب دمای داخلی و خارجی در لحظه n (بر حسب C) و n_{total} تعداد کل دفعاتی است که داده‌ها جمع‌آوری شده‌اند.

۳- نتایج

۳-۱- رسانایی گرمایی

با قرار دادن دمای گرمکن درون محفظه بر روی ۳۰۰ درجه سلسیوس زمانی که دمای داخلی محفظه مدل حداکثر

در سمت دیگر توخالی نگاه داشته شدند قرار داده شدند. سپس چهار سنسور حرارتی، (Lutron; TP-04, precision 0.1 °C, Taiwan) در تماس با ورقه‌های مسی قرار گرفتند که برای بهبود تماس گرمایی حسگرها سطح ورقه‌های مسی به گلیسرین آغشته شدند [۴۱] (شکل ۲).



شکل ۲- حسگر گرمایی در تماس با ورقه مسی قرار گرفته بر روی سطح دیواره مدل

حسگرها برای ثبت دمای ورقه‌های مسی در سطوح داخلی و خارجی دیواره مدل به دماسنج ثابت (Lutron; TM947SD, precision 0.1 °C, Taiwan) متصل شدند. ضمناً یک گرمکن آزمایشگاهی (IKA RET; RET CT, precision 1 °C, Germany) به عنوان منبع گرما در داخل مدل مورد استفاده قرار گرفت که حین انجام ۳ تست گرمایی انجام شده (هر یک به مدت ۱۰ ساعت) دمای آن بر روی ۳۰۰ درجه سانتیگراد تنظیم شد.

بر اساس استاندارد بین المللی اتلاف گرما در دیواره از طریق معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$Q = mc\Delta t \quad (1)$$

که در آن Q اتلاف گرما (W) و m جرم ورقه مسی (kg)، c گرمای ویژه مس ($W kg^{-1} \cdot C^{-1}$) و Δt اختلاف دمای نهایی و اولیه (C) است. تعیین رسانایی گرمایی (λ) نیز (بر حسب $W m^{-1} \cdot C^{-1}$) از طریق معادله (۲) امکان‌پذیر است [۳۸]:

$$\lambda = LQ / (A(\theta_2 - \theta_1)) \quad (2)$$

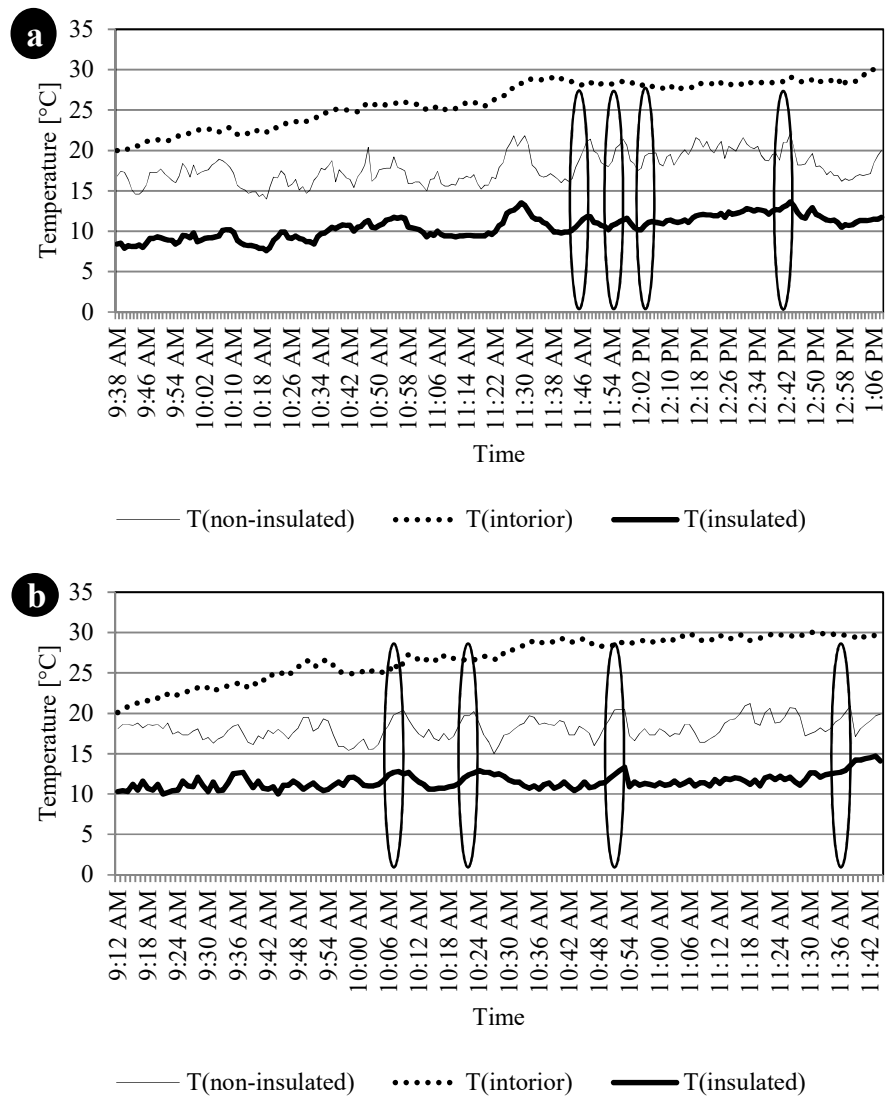
که در آن L , A ، Q ، $\theta_2 - \theta_1$ به ترتیب عبارتند از ضخامت دیواره (m)، مقدار اتلاف حرارت (W)، مساحت ورقه مسی (m^2) و اختلاف دما (C) هستند.

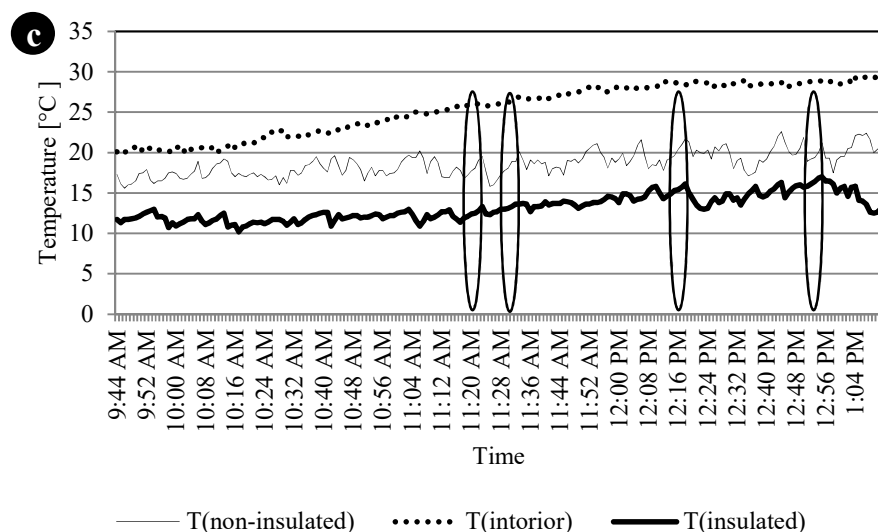
۲-۳- تعیین آهنگ انتقال گرما

در حالی که دمای گرمکن قرار داده شده در درون مدل بر روی ۳۰۰ درجه سلسیوس تنظیم گردیده بود دمای سطح داخلی و خارجی دیواره‌ها طی سه تست (آزمایش) انجام شده (ISO 9869, 1994) در سه روز مختلف هر یک به مدت ۱۰ ساعت و با استفاده از داده برداری‌های ۱ دقیقه‌ای سنجش شد. برای سنجش دما از همان دماسنج ثابت و حسگرهای دمایی ذکر شده در بالا که مستقیماً در تماس با سطوح داخلی و خارجی دیواره‌ها مخالف بودند (یکی عایق شده با کاه فشرده گندم و دیگری بدون عایق) استفاده شد (شکل ۳).

دمای خارجی دیواره‌های عایق شده و بدون عایق طی بازه‌های زمانی انتخاب شده صعودی بودند ضمن آنکه مدت هر بازه زمانی ۴ دقیقه بود زیرا بیشتر منحنی‌های نوسانات ثبت شده پس از ۴ دقیقه تغییر جهت داده و نزولی شده بودند.

نوسانی بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس را ثبت نمود و طی انجام سه تست در سه روز مختلف (آزمایش) چهار بازه زمانی برای محاسبه رسانایی گرمایی (λ) دیواره‌ها در هر تست انتخاب شد (شکل ۴). همانطور که شکل ۴ نشان می‌دهد منحنی‌های





شکل ۴- بازه‌های زمانی انتخاب شده برای محاسبه رسانایی گرمایی دیواره‌های مدل در روز اول (a)، روز دوم (b) و روز سوم (c)

جدول ۱ مقادیر رسانایی گرمایی مربوط به دیواره‌های بدون عایق و عایق کاری شده که برای بازه‌های زمانی انتخاب شده با استفاده از معادله (۲) محاسبه شده‌اند را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مقدار رسانایی گرمایی برای دیواره‌های بدون عایق و عایق کاری شده به ترتیب بین ۰/۱۲ تا ۰/۳۳ و همچنین ۰/۰۳ تا ۰/۰۶ بر حسب $W m^{-1} °C^{-1}$ در نوسان است.

جدول ۱- رسانایی گرمایی بدست آمده مربوط به بازه‌های زمانی انتخاب شده برای دیواره‌های بدون عایق و عایق کاری شده مدل برای تست‌های

آزمایشات انجام شده در روز اول، روز دوم و روز سوم			
تکرار	λ (بدون عایق)		λ (عایق کاری شده)
	روز اول	روز دوم	روز سوم
۱	۰/۱۹۳	۰/۲۳۰	۰/۰۴۵
۲	۰/۱۷۸	۰/۲۳۰	۰/۰۳۸
۳	۰/۲۰۰	۰/۲۳۰	۰/۰۳۱
۴	۰/۲۰۰	۰/۲۳۰	۰/۰۳۱
۱	۰/۳۰۴	۰/۳۳۷	۰/۰۴۰
۲	۰/۳۳۷	۰/۳۳۷	۰/۰۶۰
۳	۰/۲۴۲	۰/۲۴۲	۰/۰۵۰
۴	۰/۲۴۲	۰/۲۴۲	۰/۰۵۱
۱	۰/۱۵۷	۰/۱۲۱	۰/۰۳۰
۲	۰/۱۲۱	۰/۱۲۱	۰/۰۳۰
۳	۰/۱۵۳	۰/۱۵۳	۰/۰۴۳
۴	۰/۱۴۱	۰/۱۴۱	۰/۰۵۴

λ = ضریب هدایت حرارتی

دمای محیط) است. شکل ۵ نیز نشان می‌دهد که شیب منحنی برای دیواره عایق کاری شده کمتر از دیواره بدون عایق است. همچنین نوسانات بیشتری در منحنی مربوط به دیواره بدون عایق مشاهده شده است. همچنین میانگین، حداکثر و حداقل مقادیر انتقال گرما برای دیواره عایق کاری شده کمتر از دیواره بدون عایق است که کارایی گاه فشرده برای عایق‌بندی دیواره‌ها را تأیید می‌کند. این شرایط دمایی وقوع یک انتقال گرمایی مداوم مطلوب از طریق دیواره مدل از داخل به خارج را فراهم

۲-۳- آهنگ انتقال گرما

دمای داخلی و خارجی دیواره‌ها، $T_i(n)$ و $T_e(n)$ و مقدار انتقال گرمای دیواره‌ها $q(n)$ در هر دو نوع دیواره‌های عایق شده و بدون عایق به طور مداوم به مدت ۱۰ ساعت تعیین شدند. داده‌های به دست آمده برای سه تست (آزمایش) همراه با حداقل، حداکثر و میانگین مقادیر متغیرهای حرارتی شامل $T_i(n)$ ، $T_e(n)$ و $q(n)$ برای دیواره‌های در نظر گرفته شده در مدل (جدول ۲) نشان داد که به طور کلی به دلیل استفاده از هیتر در داخل مدل دمای داخلی پایدار و بالاتر از دمای خارجی

کمتری را نشان داد. به نظر می‌رسد گاه گندم فشرده‌ای که به عنوان عایق در داخل حفره‌های بلوک‌های سفالی حفره دار قرار دارد انرژی گرمایی تولید شده توسط گرمکن را جذب نموده و از اتلاف سریع آن جلوگیری می‌کند. بنابراین، دمای سطح بلوک‌های سفالی عایق شده با گاه فشرده گندم به طور منظم در طول تست‌ها (آزمایش‌ها) افزایش یافت.

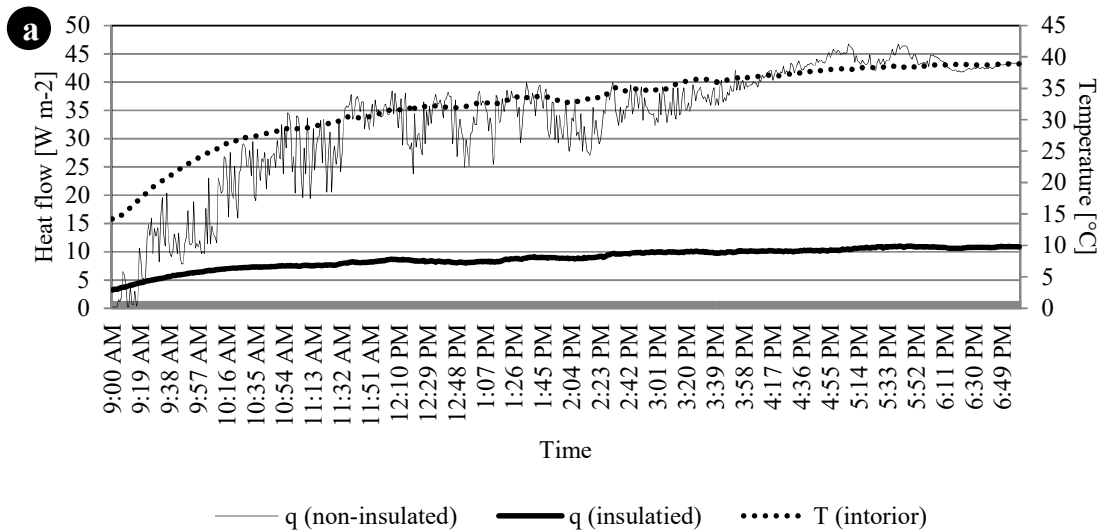
می‌کند که برای ارزیابی پارامترهای عملکرد عایق گرمایی از جمله ضریب انتقال گرمای کلی در یک سیستم ساختمانی تجزیه و تحلیل شده ضروری می‌باشد [۱۲].

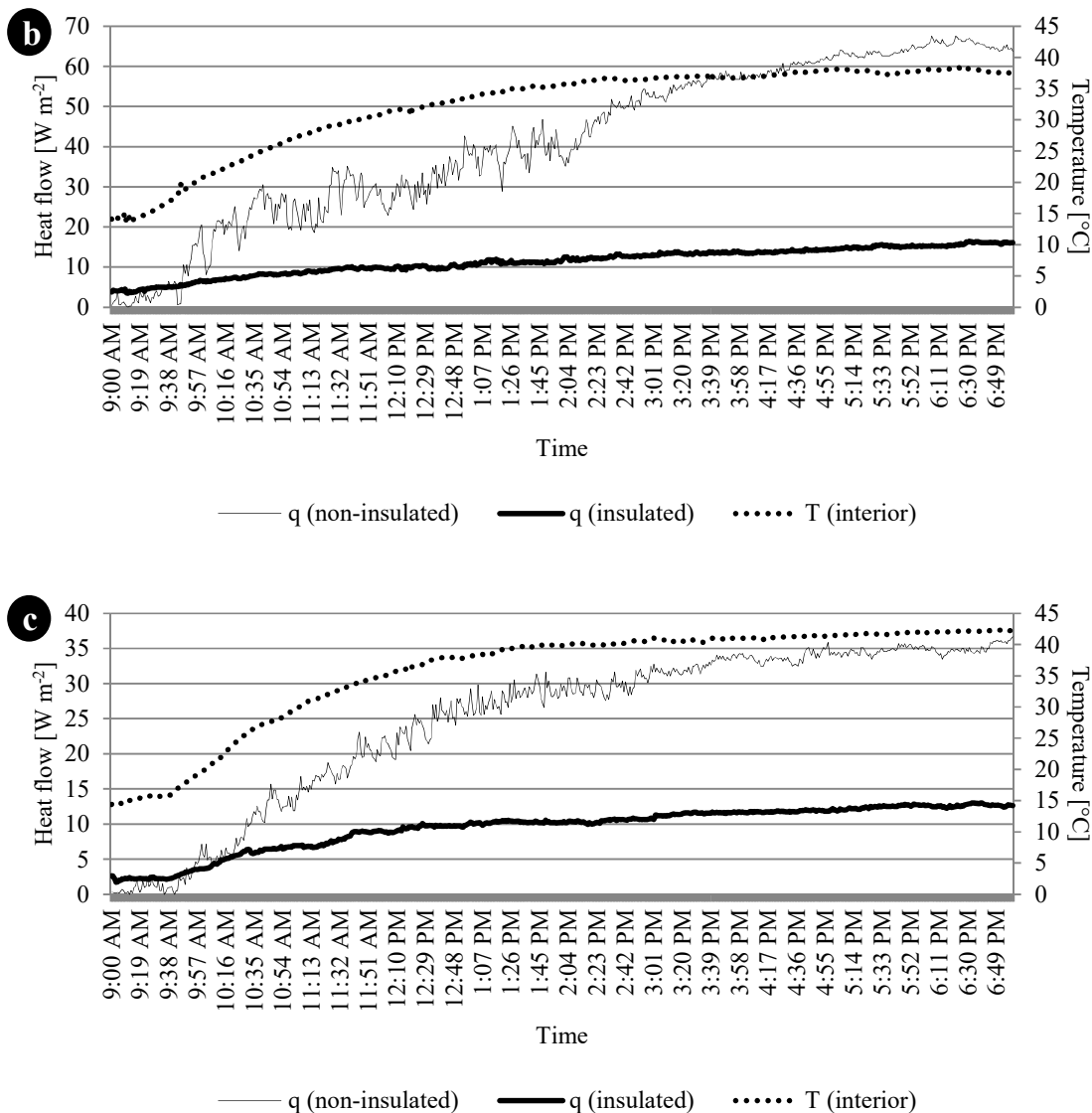
در نمودارهای انتقال گرمای مربوط به دو نوع دیواره عایق‌کاری شده و بدون عایق، روند انتقال گرما برای دیواره عایق‌کاری شده در مقایسه با دیواره بدون عایق دارای نوسانات

جدول ۲- متغیرهای گرمایی برای دیواره‌های غیر عایق و عایق مدل برای تست‌های (آزمایش‌های) انجام شده در روز اول، دوم و سوم

تاریخ	متغیر حرارتی	بدون عایق			عایق‌کاری شده		
		حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین
روز اول	Ti(n) (°C)	۲۰/۰	۳۰/۰	۲۶/۴	۲۰/۰	۳۰/۰	۲۶/۴
	Te(n) (°C)	۰/۰	۱۲/۰	۸/۶	۰/۰	۱۲/۰	۸/۶
	q(n) (W m ⁻²)	۷/۷۹	۳۴/۵۸	۲۱/۸۰	۵/۲۲	۷/۹۲	۶/۹۷
روز دوم	Ti(n) (°C)	۲۰/۰	۲۹/۹	۲۵/۷	۲۰/۰	۲۹/۹	۲۵/۷
	Te(n) (°C)	۳/۰	۹/۰	۷/۳	۳/۰	۹/۰	۷/۳
	q(n) (W m ⁻²)	۸/۳۲	۳۶/۰۷	۲۴/۲۱	۶/۳۳	۱۰/۱۵	۸/۳۰
روز سوم	Ti(n) (°C)	۲۰/۱	۳۰/۰	۲۵/۷	۲۰/۱	۳۰/۰	۲۵/۷
	Te(n) (°C)	-۱/۰	۱۸/۰	۱۸/۱	-۱/۰	۱۸/۰	۱۸/۱
	q(n) (W m ⁻²)	۴/۳۰	۱۵/۶۸	۹/۷۴	۳/۷۰	۶/۹۴	۵/۸۱

Ti(n)=دمای داخلی در لحظه n، Te(n) = دمای خارجی در لحظه n، q(n) = شدت جریان حرارتی از طریق دیواره در لحظه n





شکل ۵- روند آهنگ انتقال گرما در طی سه تست (آزمایش) انجام شده در روز اول (الف)، روز دوم (ب) و روز سوم (ج)

جدول ۳- ضرایب انتقال گرما و همچنین بهبود عملکرد گرمایی

برای دیواره عایق کاری شده در مقایسه با دیواره بدون عایق در تست‌های (آزمایش‌های) انجام شده در روز اول، دوم و سوم

تاریخ	U (عایق کاری شده)		بهبود عملکرد حرارتی (درصد)
	U _{بدون عایق}	U _{عایق کاری شده}	
روز اول	۱/۹۲	۰/۳۶	۸۱
روز دوم	۲/۰۰	۰/۴۹	۷۵
روز سوم	۱/۴۳	۰/۳۹	۷۲

$$U = \text{ضریب انتقال گرمای کلی}$$

۳-۳- ضریب انتقال گرمای کلی

مقایسه نتایج ضرایب انتقال گرمای کلی محاسبه شده برای دیواره‌های عایق کاری شده و بدون عایق در سه تست (آزمایش) نشان می‌دهد که استفاده از کاه گندم به عنوان عایق باعث بهبود خصوصیات گرمایی بلوک‌های سفالی حفره دار شده است. ضریب انتقال گرمای کلی برای دیواره‌ها با استفاده از معادله (۴) و داده‌های به دست آمده در طول تست (آزمایش) مانند انتقال گرما و دمای سطح دیواره‌ها نشان می‌دهد که عملکرد گرمایی دیواره عایق کاری شده در مقایسه با دیواره بدون عایق ۷۲-۸۱٪ بهبود یافته است که به طور قابل توجهی اتلاف گرما را کاهش می‌دهد.

فشرده گندم با استفاده از یک محفظه آزمایشی و کاربرد فرمول فوریه پیشنهاد شد. رسانایی گرمایی دیواره‌های محفظه مذکور با استفاده از ورقه‌های مسی سنجش شد که مقدار آن برای دیواره ساخته شده از بلوک‌های سفالی پر شده از کاه فشرده گندم معادل $0.41 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ بدست آمد که با مقادیر رسانایی گرمایی عایق‌های مصنوعی و سنتز شده رایج در صنعت ساختمان کاملا قابل رقابت است.

۵- مراجع

- [1] Kanagaraj G., Mahalingam A. Designing energy efficient commercial buildings—A systems framework. *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 9, pp. 2329-2343, 2011.
- [2] Carlini M., Allegrini E., Zilli D., Castellucci S. Simulating heat transfers through the building envelope: A useful tool in the economical assessment. *Energy Procedia*, Vol. 45, pp. 395-404, 2014.
- [3] Barreca F., Fichera C. Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation. *Energy and Buildings*, Vol. 62, pp. 507-513, 2013.
- [4] Nasrollahi F. Urban and architectural criteria for reducing building energy consumption. *National Energy Committee of Iran: Tehran, Iran*, 2012.
- [5] Atanasiu B., Arcipowkska A. Synergies between Energy Efficiency and Renewable Energy in EU Built Environment, Further Need of Data Collection for Implementing EU Buildings Policies. *Building Performances Institute Europe (BPIE)*, London, 2014.
- [6] Lapillonne B., Sebi C., Pollier K., Mairet N. Energy Efficiency Trends in Buildings in the EU. 2012, Lessons from the ODYSSEE MURE project. Intelligent Energy Europe Programme of the European Union, 2014.
- [7] C.o.t.E.C.J.R. Centre, Impacts of Europe's Changing Climate: 2008 Indicator-based Assessment, European Communities, 2008.
- [8] Chikhi M., Agoudjil B., Boudenne A. Gherabli, Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy and Buildings*, Vol. 66, pp. 267-273, 2013.
- [9] Panyakaew S., Fotios S. New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and buildings*, Vol. 43, No. 7, pp. 1732-1739, 2011.
- [10] Binici H., Eken M., Kara M., Dolaz M. An environment-friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibers, in: *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, IEEE, 2013, pp. 833-846.
- [11] Sarja A. S.R. Liitto, Integrated Life-cycle Design of Materials and Structures: ILCDES 2000, Helsinki, Finland, 22-24 May 2000: Proceedings of the RILEM/CIB/ISO International Symposium, RILEM publications, 2000.
- [12] Doost-Hoseini K., Taghiyari A. Elyasi, Correlation between sound absorption coefficients with physical and mechanical properties of insulation boards made from sugar cane bagasse. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 58, pp. 10-15, 2014.
- [13] González A.D., Energy and carbon embodied in straw and clay wall blocks produced locally in the Andean Patagonia. *Energy and Buildings*, Vol. 70, pp. 15-22, 2014.
- [14] Zhou X.-y., Zheng F. H.-g. Li, C.-l. Lu, An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 7, pp. 1070-1074, 2010.
- [15] Wei K., Lv C., Chen M., Zhou X., Dai Z., Shen D. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. *Energy and Buildings*, Vol. 87, pp. 116-122, 2015.
- [16] Kellati N.-e., El Bouardi A., Ajzoul T., X Ezbakhe D. Etude de propriétés thermophysiques et acoustiques du liège compact et granulaire, *Revue des Energies Renouvelables CER'07*. Oujda, 241, 244, 2007.
- [17] Paiva A., Varum H., Caldeira F., Sá, D. A. Nascimento, N. Teixeira, Textile subwaste as a thermal insulation building material, in: *International Conference on Petroleum and Sustainable Development IPCBEE*, 2011.

۳-۴- مزایای کاه گندم

با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه عایق‌های مصنوعی و طبیعی ساختمان به نظر می‌رسد که کاه فشرده گندم به عنوان یک عایق طبیعی با حداقل آسیب‌های زیست‌محیطی می‌تواند با دیگر عایق‌های مصنوعی رقابت کند و همچنین عملکرد گرمایی بهتری نسبت به سایر عایق‌های مصنوعی رایج دارد (جدول ۴). میانگین رسانایی گرمایی برای بلوک‌های سفالی پر شده از کاه فشرده برابر با $0.41 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ است که در مقایسه با عایق‌های مصنوعی دیگر مانند پشم شیشه، پلی استایرن منبسط شده، فایبرگلاس و پشم معدنی یک عایق کاملا کارآمد است و حتی نسبت به برخی عایق‌های مصنوعی دارای رسانایی گرمایی پایین‌تر می‌باشد.

جدول ۴- مقایسه مشخصات گرمایی برخی از عایق‌های رایج در

منبع	صنعت ساختمان		ماده عایق
	U ($\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	λ ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	
مطا	۰/۴۱	۰/۴۱	بلوک سفالی پر شده از کاه فشرده
لعه حاضر	۰/۴۶	۰/۴۳	پشم شیشه
]	ND	۰/۵۵	پلی استایرن منبسط شده
[	ND	۰/۳۷-	قالب گیری شده
]	ND	۰/۳۷	پلی استایرن منبسط شده
[	ND	۰/۳۵	الیاف پلی استر
]	ND	۰/۴۷	فایبرگلاس
[	ND	۰/۳۴-	پشم معدنی
]	ND	۰/۵۵	باگاس (تفاله نیشکر)
[	ND	۰/۶۸	پوسته نارگیل
]	ND	۰/۴۶-	پشم گوسفند
[	ND	۰/۶۳	چرم
]	ND	۰/۳۱	ضایعات نجاری
[	۰/۴۶	۰/۴۴	ضایعات پارچه بافته شده
[

λ = رسانایی گرمایی، U = ضریب انتقال گرمای کلی،
No Data = ND

۴- نتیجه گیری

معرفی کاه فشرده به عنوان یک عایق طبیعی سازگار با محیط‌زیست، بررسی اثر کاربرد آن در جلوگیری از هدررفت انرژی از دیواره‌های بیرونی ساختمان و همچنین نشان دادن مزیت‌های آن نسبت به عایق‌های مصنوعی از جمله دست‌آوردهای مطالعه حاضر بودند. بعلاوه در این مطالعه روشی برای بررسی عملکرد گرمایی بلوک‌های سفالی پر شده از کاه

- [40] Binici H., Gemci R., Kucukonder A., Solak H.H. Investigating sound insulation, thermal conductivity and radioactivity of chipboards produced with cotton waste, fly ash and barite. *Construction and Building Materials*. Vol. 30, pp. 826-832, 2012.
- [41] Zemansky M.W., Dittman R.H. Heat and thermodynamics, American Association of Physics Teachers, 1998.
- [18] Pinto J., Paiva A., Varum H., Costa A., Cruz, D., Pereira S., Fernandes L., Tavares P., Agarwal J. Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material. *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 8, pp. 1985-1990, 2011.
- [19] Madurwar M.V., Ralegaonkar R.V., S.A. Mandavgane, Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review, *construction and Building materials*. Vol. 38, pp. 872-878, 2013.
- [20] Korjenic A., Petráněk V., Zach J., Hroudová J. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 9, pp. 2518-2523, 2011.
- [21] Korjenic A., Zach J., Hroudová J. The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions. *Energy and Buildings*, Vol. 116, pp. 45-58, 2016.
- [22] Briga-Sa A., Nascimento D., Teixeira N., Pinto J., Caldeira F., Varum H., Paiva A. Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. *Construction and Building Materials*, Vol. 38, pp. 155-160, 2013.
- [23] Florea I., Manea D.L. Analysis of thermal insulation building materials based on natural fibers. *Procedia Manufacturing*, Vol. 32, pp. 230-235, 2019.
- [24] Cantor D.M., Manea D.L. Innovative building materials using agricultural waste. *Procedia Technology*. Vol. 19, pp. 456-462, 2015.
- [25] Ashour T., Georg H., Wu W. Performance of straw bale wall: A case of study. *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 8, pp. 1960-1967, 2011.
- [26] King B. Design of Straw Bale Buildings, in, Green Building Press, 2006.
- [27] Muazu A.G., Alibaba H.Z. The Use of Traditional Building Materials in Modern Methods of Construction (A case Study of Northern Nigeria). *Engineering Science Technology and Research*, Vol. 2, No. 6, pp. 30-40, 2017.
- [28] Mohajerani A., Ukwatta A., Jeffrey-Bailey T., Swaney M., Ahmed M., Rodwell G., Bartolo S., Eshtiaghi N., Setunge S. A proposal for recycling the world's unused stockpiles of treated wastewater sludge (biosolids) in fired-clay bricks, *Buildings*, Vol. 9, No. 1, p. 14, 2019.
- [29] Rojas C., Cea M., Iriarte A., Valdés G., Navia R., Cárdenas-R J.P. Thermal insulation materials based on agricultural residual wheat straw and corn husk biomass, for application in sustainable buildings. *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 20, 2019, e00102.
- [30] Mohajerani A., Kadir A.A., Larobina L. A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks. *Waste management*, Vol. 52, pp. 228-244, 2016.
- [31] Almusaed A., Almssad A. Building materials in eco-energy houses from Iraq and Iran, Case Studies in *Construction Materials*, Vol. 2, pp. 2-54, 2015.
- [32] Bouchair A. Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation. *Building and Environment*, Vol. 43, No. 10, pp. 1603-1618, 2008.
- [33] Corscadden K., Biggs J., Stiles D. Sheep's wool insulation: A sustainable alternative use for a renewable resource?. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 86, pp. 9-15, 2014.
- [34] Zach J., Korjenic A., Petráněk V., Hroudová J., Bednar T. Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp. 246-253, 2012.
- [35] Cascone S., Rapisarda R., Cascone D. Physical properties of straw bales as a construction material. *Sustainability*, Vol. 11, pp. 3388, 2019.
- [36] Miron I. O., Manea D. L., Cantor D. M., Aciu C. Organic thermal insulation based on wheat straw. *Procedia Engineering*, Vol. 181, pp. 674-681, 2017.
- [37] Ahmadi R., Soury B., Ebrahimi M. Study of the rate of thermal energy loss from clay blocks filled with natural porous insulation of compacted straw. University of Kurdistan, Sanandaj, Iran (in Persian), 2015.
- [38] Soury B., Ahmadi R., Ebrahimi M. Insulated clay blocks, Patent number 102923 (in Persian), 2021.
- [39] Ahmadi R., Soury B., Ebrahimi M. Evaluation of wheat straw to insulate fired clay hollow bricks as a construction material. *Cleaner Production*, Vol. 254, 2020, 120043.