

Evaluation of the Thermal Performance of Recycled Cotton Fabric as a Sustainable Insulation Material in Cold Climate Buildings*

Abstract

This research investigates the thermal performance and building-scale energy implications of recycled cotton fabric used as a sustainable insulation material in cold-climate constructions. It responds to the urgent need for low-carbon and circular solutions in the building sector by assessing physical measurements and modeled energy outcomes for a cotton-based insulating layer. Laboratory experiments were conducted under steady-state conditions using a custom heat-flow apparatus and multiple thermocouples to obtain reliable temperature profiles across samples prepared at varying layer densities. The measured average thermal conductivity for the recycled cotton specimens was approximately 0.046 W/m·K, a value consistent with high-performance natural fibrous insulations and attributable to the material's porous microstructure and air-retention capability. Reproducibility tests returned relative deviations under five percent, validating the experimental protocol. Observed steady thermal gradients and uniform heat flux patterns indicate that, within the tested temperature range, conductive processes dominate and the material exhibits stable insulating behavior over extended periods. Complementary material characterization included density and specific heat measurements, which were integrated into the subsequent building energy model. From a sustainability standpoint, reusing post-consumer cotton reduces textile waste streams and decreases demand for virgin polymeric insulators, aligning with resource conservation and circular-economy objectives. This experimental evidence establishes recycled cotton as a technically credible insulation candidate and provides robust input data for building performance simulations. The study also documents practical considerations for sample preparation, moisture control during testing, and edge-sealing methods to prevent delamination, which together improve measurement fidelity and inform scalable manufacturing pathways for building applications and supports informed specification by designers and practitioners. In the modeling phase, experimentally measured thermophysical properties were incorporated into EnergyPlus software to estimate annual heating and cooling loads for a representative building in a cold semi-arid climate. The simulation contrasted an uninsulated wall with assemblies containing a twelve-centimeter recycled cotton insulation layer at different effective densities. Overall, total annual energy consumption declined by approximately thirty-four to thirty-five percent for cotton-insulated assemblies compared to the uninsulated case, with heating demand ac-

Received: 06 Oct 2025

Received in revised form: 01 Nov 2025

Accepted: 19 Dec 2025

Sina Allahyari¹ 

Master in Architecture and Energy, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran. E-mail: si.allahyari@tabriziau.ac.ir

Farzin Haghparast²  (Corresponding Author)

Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran. E-mail: f.haghparast@tabriziau.ac.ir

Javad Ahmadi³ 

Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran. E-mail: j.ahmadi@tabriziau.ac.ir

<https://doi.org/10.22059/jfaup.2026.405484.673136>

counting for the majority of savings. Analysis of surface heat fluxes demonstrates that the cotton layer substantially reduces conductive heat loss in cold periods and dampens indoor temperature fluctuations, thereby enhancing thermal comfort and lowering operative loads. Minor variations in cooling demand were observed in some configurations owing to changes in thermal mass and transient heat transfer, but the net impact favored energy savings. The agreement between lab measurements and modeled outputs, with discrepancies below five percent, validates the approach of using experimental inputs in whole-building simulation workflows. From a sustainability perspective, recycled cotton insulation shows promise as a low-cost, low-embodied-carbon alternative when local textile waste is available. However, for broader adoption, critical knowledge gaps must be addressed: the influence of moisture absorption on thermal performance, long-term mechanical behavior under cyclic loading, fire-resistance properties, and full life cycle environmental impacts. To translate laboratory findings into practice, pilot-scale installations, monitored field trials, and standardized preparation procedures are recommended so that performance, durability, and compliance with regulatory requirements can be demonstrated in real buildings. Such evidence will support policy incentives and market uptake of recycled insulation.

Keywords: building thermal insulation, building energy simulation, textile waste, thermal conductivity

Citation: Allahyari, Sina; Haghparast, Farzin, & Ahmadi, Javad. (2025). Evaluation of the thermal performance of recycled cotton fabric as a sustainable insulation material in cold climate buildings. *Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning*, 30(4), 37-47. (in Persian)



© Authors retain the copyright and the full publishing.

Publisher: University of Tehran Press.

*This article is derived from the master's thesis of the first author, entitled "Evaluation of the use of textile waste as building thermal insulation on reducing energy consumption," under the supervision of the second author and with consultation from the third author at Tabriz Islamic Art University.

ارزیابی عملکرد حرارتی پارچه پنبه‌ای باز یافتی به عنوان عایق پایدار در ساختمان‌های اقلیم سرد*

چکیده

هدف این پژوهش بررسی عملکرد حرارتی و کارایی انرژی پارچه پنبه‌ای باز یافتی به عنوان عایق حرارتی پایدار در ساختمان‌های واقع در اقلیم سرد است. آزمایش‌های انجام شده در حالت پایدار نشان دادند که میانگین ضریب رسانایی حرارتی این عایق حدود 0.46 وات بر مترکلونین است که با محدوده عملکرد عایق‌های طبیعی با کیفیت بالا مطابقت دارد. پایداری گرادیان حرارتی و تکرارپذیری نتایج، اعتبار روش آزمایش و بیکنواختی انتقال حرارت در نمونه‌ها را تأیید کرد. در گام بعد، شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس انجام شد تا تأثیر این ماده در کاهش مصرف انرژی ساختمان ارزیابی شود. نتایج مدل‌سازی نشان داد که استفاده از لایه‌ای با ضخامت 12 سانتی‌متر از عایق پنبه‌ای در دیوار، منجر به کاهش میانگین 34 تا 35 درصدی کل مصرف انرژی سالانه نسبت به حالت بدون عایق می‌شود. بیشترین سهم صرفه‌جویی مربوط به انرژی گرمایش است که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب این ماده در کاهش تلفات حرارتی در شرایط اقلیمی سرد، مانند شهر تبریز، است. بر اساس یافته‌ها، پارچه پنبه‌ای باز یافتی به دلیل ویژگی‌های فیزیکی مناسب، پایداری زیست‌محیطی، قیمت پایین و در دسترس بودن، می‌تواند به عنوان جایگزینی پایدار و اقتصادی برای عایق‌های مرسوم مطرح شود و در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش ساختمان نقشی مؤثر ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: باز یافت، شبیه‌سازی انرژی ساختمان، ضایعات نساجی، ضریب هدایت حرارتی، عایق حرارتی ساختمان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

سینا الهیاری^۱: کارشناسی ارشد معماری و انرژی، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

E-mail: si.allahyari@tabriziau.ac.ir

فرزین حق پرست^۲ (نویسنده مسئول): استاد گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

E-mail: f.haghparsat@tabriziau.ac.ir

جواد احمدی^۳: استادیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

E-mail: j.ahmadi@tabriziau.ac.ir

<https://doi.org/10.22059/jfaup.2026.405484.673136>

استناد: الهیاری، سینا؛ حق پرست، فرزین و احمدی، جواد (۱۴۰۴). ارزیابی عملکرد حرارتی پارچه پنبه‌ای باز یافتی به عنوان عایق پایدار در ساختمان‌های اقلیم سرد. نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی، ۳۰(۴)، ۳۷-۴۷.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

© نگارندگان، حق تکثیر و امتیاز کامل انتشار مقاله خود را حفظ می‌کنند.



* مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول با عنوان «ارزیابی نحوه استفاده از ضایعات نساجی به عنوان عایق حرارتی ساختمانی بر کاهش مصرف انرژی» می‌باشد که با راهنمایی نگارنده دوم و مشاوره نگارنده سوم در دانشگاه هنر اسلامی تبریز ارائه شده است.

زیست‌محیطی قابل توجهی دارد، از جمله افزایش حجم پسماندها و تشدید آلودگی‌های ناشی از آن (Camacho Cusichua et al., 2024).

پیشینه پژوهش

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند که استفاده از منسوجات بازیافتی می‌تواند به‌عنوان عایق‌های حرارتی و صوتی به کار رود و در عین حال راه‌حلی سازگار با محیط‌زیست برای مدیریت پسماند و بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌ها فراهم کند (Islam & Bhat, 2019). بررسی‌ها نشان داده‌اند که پسماندهای نساجی شامل پشم و الیاف مصنوعی ترکیبی می‌توانند به منسوجات بی‌بافت با ویژگی‌های حرارتی مطلوب و قابل مقایسه با عایق‌های مرسوم تبدیل شوند (Wazna et al., 2019). صرف‌نظر از نوع ماده اولیه، رسانایی حرارتی این الیاف بسیار پایین بوده و برای کاربردهای ساختمانی مناسب است. همچنین پسماندهای تولید نخ پشمی نیز قابلیت تبدیل به صفحات عایق حرارتی با عملکرد مطلوب را دارند. علاوه بر کاهش پسماندهای دفنی، استفاده از ضایعات نساجی در عایق‌ها موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی ساختمان و ارتقای بهره‌وری انرژی می‌شود و در نتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز کاهش می‌دهد (Samardzioska et al., 2023).

در میان الیاف طبیعی، پشم و پنبه بیشترین بررسی‌ها را از نظر خواص حرارتی به خود اختصاص داده‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که پشم به دلیل ساختار درهم‌تنیده‌تر و الیاف موج‌دار خود، توانایی حفظ گرمای بیشتری نسبت به پنبه دارد (Rasheed et al., 2023). در مقابل، الیاف مصنوعی مانند پلی‌استر و نایلون به دلیل استحکام، پایداری در برابر شرایط محیطی و دوام بالا، به‌عنوان عایق‌های مقاوم شناخته می‌شوند (Mandell et al., 1987). ساختار متخلخل موجود در ضایعات نساجی، از جمله پلی‌استرهای بازیافتی، سبب به‌دام‌اندازی مؤثر هوا درون حفره‌ها شده و ویژگی عایق بودن آن‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (Trajković et al., 2016). در نتیجه، توسعه عایق‌های نوین از الیاف طبیعی و مصنوعی، مسیر را برای دستیابی به ویژگی‌های متناسب با نیازهای متنوع زیست‌محیطی و معماری هموار کرده است (Zach et al., 2019).

از منظر زیست‌محیطی، عایق‌های مبتنی بر پسماندهای نساجی موجب کاهش دفن پسماند، صرفه‌جویی در منابع زمین و جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی و انتشار متان ناشی از تجزیه پارچه‌ها می‌شوند (Islam & Bhat, 2019; Karmakar et al., 2024). همچنین سبب حفظ منابع اولیه و کاهش ردپای کربنی مواد ساختمانی می‌شود (Samardzioska et al., 2023). این عایق‌ها از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه هستند، زیرا مواد اولیه آن‌ها به‌صورت فراوان و ارزان از ضایعات صنعتی و پسماندهای قابل تأمین است (Cuc & Vidovic, 2014). علاوه بر این، هزینه‌های فرآوری و دفع آن‌ها پایین‌تر بوده و به ایجاد فرصت‌های شغلی جدید در بخش بازیافت و تولید کمک می‌کند (Humaidi & Prabowo, 2024). بهره‌گیری از ضایعات نساجی در ساختمان‌سازی پایدار، مسیر حرکت به سمت اقتصاد چرخشی را هموار می‌کند که در آن مواد به‌طور مداوم در چرخه تولید قرار گرفته و ضایعات حداقلی تولید می‌شوند (Juanga-Labayen et al., 2022; Tang, 2023). با وجود این مزایا، چالش‌های قابل توجهی نیز در استفاده از پسماند نساجی در صنعت ساختمان وجود دارد. از جمله این چالش‌ها می‌توان به

مقدمه

گسترش فضاهای شهری با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای ارتباط مستقیم دارد و این روند به‌طور قابل توجهی موجب تشدید گرمایش جهانی و تسریع تخریب محیط‌زیست می‌شود. بخش ساخت‌وساز یکی از اصلی‌ترین عوامل این پدیده محسوب می‌شود و حدود یک‌سوم از کل مصرف انرژی جهان را به خود اختصاص داده است (Bayraktar et al., 2019; Lu & Lai, 2019; Conti et al., 2016; al., 2012). با توجه به کاهش مداوم منابع انرژی، این مسئله در کشورهای نظیر ایران بحرانی‌تر است؛ چراکه فعالیت‌های ساختمانی در ایران حدود ۳۵ درصد از کل مصرف انرژی کشور را تشکیل می‌دهد (Mohammad & Shea, 2013). از این رو، ضرورت اتخاذ و توسعه راهبردهای طراحی پایدار که تضمین‌کننده بهره‌وری بلندمدت انرژی در طول چرخه عمر ساختمان باشند، بیش‌ازپیش احساس می‌شود (Chang & Shih, 2015).

در این میان، نقش مواد عایق حرارتی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در ارتقای کارایی انرژی ساختمان بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا استفاده از آن‌ها می‌تواند به‌طور چشمگیری نیاز به گرمایش و سرمایش را که بیشترین سهم از مصرف انرژی ساختمان را به خود اختصاص می‌دهد، کاهش دهد. سامانه‌های عایق پیشرفته با محدود کردن تبادل حرارتی بین محیط داخلی و خارجی، فشار وارد بر سامانه‌های گرمایشی، سرمایشی و تهویه (HVAC) را کاهش داده و در نتیجه مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی ساختمان را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند. به کارگیری چنین سیستم‌هایی در پوسته ساختمان، عملکرد حرارتی آن را بهبود می‌بخشد، هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش می‌دهد و میزان انتشار کربن را پایین می‌آورد (Konis et al., 2020; Sun et al., 2016). در این راستا، استفاده از ضایعات بازیافتی نساجی به‌عنوان عایق حرارتی، راهکاری مؤثر و همسو با اهداف زیست‌محیطی و بهره‌وری انرژی به شمار می‌آید. الیاف نساجی به دلیل تخلخل بالا و رسانایی حرارتی پایین، توانایی بالایی در کاهش تبادل گرما دارند و به‌عنوان سد حرارتی مؤثری عمل می‌کنند. تحقیقات نشان داده‌اند که بهینه‌سازی مقاومت حرارتی ساختمان از طریق بهبود عملکرد عایق‌ها می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی تا حدود ۵۰ درصد شود (Fang & Cho, 2019; Sun et al., 2020).

با این حال، تولید و مدیریت ضایعات نساجی در سطح جهانی به یکی از چالش‌های بزرگ زیست‌محیطی تبدیل شده است؛ به‌ویژه در کشورهایی که صنایع نساجی گسترده‌ای دارند. صنایع نساجی از جمله منابع اصلی آلودگی محیط‌زیست محسوب می‌شوند، زیرا حجم عظیمی از پسماند را تولید می‌کنند. کشورهای مانند هند و مالزی نمونه‌های بارزی از این وضعیت هستند (Singh, 2024). ایران نیز به‌عنوان یکی از تولیدکنندگان عمده محصولات نساجی در خاورمیانه شناخته می‌شود (Hassanpour, 2019). صنعت نساجی ایران قدمتی طولانی دارد و انواع الیاف طبیعی و مصنوعی نظیر پنبه، پشم، ابریشم و الیاف سنتتیک را تولید می‌کند (Kama, 2001; Li & Sadi, 2016; Seyf, 2001). گسترش سریع مدمصرفی (Fast Fashion) در سال‌های اخیر سبب افزایش چشمگیر تولید و مصرف منسوجات در ایران شده و در نتیجه حجم ضایعات نساجی و سطح آلودگی زیست‌محیطی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است (Anisah et al., 2024; Owusu-Wiredu, 2024). این شرایط پیامدهای

مناطق، زیرساخت‌های تفکیک و شناسایی الیاف کافی وجود ندارد و همین مسئله روند بازیافت را پیچیده‌تر می‌سازد (Juanga-Labayen et al., 2022). کمبود فناوری‌های کارآمد برای جمع‌آوری و تفکیک ضایعات نیز از موانع اصلی این فرایند به شمار می‌رود (Baloyi et al., 2024). جدول ۱ خلاصه‌ای از پژوهش‌های پیشین در زمینه عایق‌های حرارتی حاصل از منسوجات بازیافتی را ارائه می‌دهد.

دشواری در جداسازی و سازگاری الیاف و نیز تغییرپذیری عملکرد حرارتی آن‌ها اشاره کرد. ترکیب الیاف در بتن‌های حاوی ضایعات نساجی می‌تواند به بهبود کنترل ترک‌ها و افزایش دوام منجر شود، اما ناسازگاری الیاف مختلف یکی از مشکلات اصلی است (Sasi et al., 2024). ترکیبات پیچیده شامل الاستومرهایی نظیر اسپندکس فرآیند بازیافت را دشوارتر کرده و جداسازی آن‌ها چالش‌برانگیز است (Yin et al., 2014). در بسیاری از

جدول ۱. خلاصه پژوهش‌های مرتبط با عایق‌های حرارتی بر پایه مواد نساجی بازیافتی (یافته‌های پژوهش)

| منبع | توضیحات پژوهش |
|-----------------------------------|---|
| (Angelotti et al., 2024) | در این پژوهش از الیاف پنبه‌ای بازیافتی حاصل از پوشاک استفاده شد تا رفتار حرارتی آن‌ها در تماس با فولاد ساختمانی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که میزان رطوبت و دما تأثیر چشمگیری بر رسانایی حرارتی این الیاف دارند؛ بنابراین، برای دستیابی به داده‌های دقیق، انجام آزمایش‌ها در شرایط محیطی کنترل‌شده ضروری است. این یافته بر اهمیت اثرات محیطی در عملکرد عایق‌های فیبری تأکید دارد. |
| (Muthukumar & Thilagavathi, 2024) | در این تحقیق از ترکیب الیاف پلی‌استر، ضایعات ابریشم و پنبه در ساخت منسوجات بی‌افت چندلایه برای عایق‌کاری حرارتی و صوتی استفاده شد. نتایج بیانگر پایداری زیستی بالا، قابلیت تجدیدپذیری و کارایی بهتر این عایق‌ها نسبت به مواد مرسوم است. همچنین، این مواد نقش مؤثری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف منابع اولیه دارند. |
| (Islam et al., 2024) | فناوری نانوالیاف با بهره‌گیری از پسماند نساجی برای تولید صفحات عایق حرارتی و مقاوم در برابر رطوبت بررسی شد. نتایج ارزیابی چرخه عمر (LCA) نشان داد که استفاده از این ضایعات به‌عنوان ماده اولیه، آسیب زیست‌محیطی کمتری نسبت به عایق‌های تجاری دارد. این پژوهش پتانسیل بالای استفاده از پسماندهای نساجی در تولید عایق‌های سبز را نشان می‌دهد. |
| (Alsaffar et al., 2023) | این پژوهش به استفاده از ضایعات صنعت بسته‌بندی (مقوا و کارتن) برای تولید عایق دیواری دواستندار محیط‌زیست پرداخته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که عایق تولیدی از نظر عملکرد حرارتی و صوتی با نمونه‌های تجاری قابل مقایسه است، اما مقاومت مکانیکی آن نیاز به بهبود دارد تا بتوان از آن در مقیاس وسیع‌تر استفاده کرد. |
| (Rubino et al., 2023) | در این تحقیق، پنل‌های بی‌افت از پسماندهای نساجی تولید شدند که دارای رسانایی حرارتی پایین و کارایی بالا بودند. نتایج نشان داد که این نوع عایق‌ها علاوه بر عملکرد مطلوب حرارتی، موجب صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی نیز می‌شوند. این مواد به‌عنوان جایگزینی پایدار برای عایق‌های متداول مطرح شده‌اند. |
| (Neri et al., 2023) | این پژوهش نوآورانه به بازیافت ماسک‌های پزشکی (دارای الیاف پلی‌آمید ۶۶) برای تولید صفحات عایق قابل‌حمل اختصاص داشت. نتایج نشان داد که می‌توان از پسماند ماسک‌ها به‌عنوان ماده اولیه در ساخت مصالح ساختمانی کم‌هزینه برای مسکن‌های اشتراک کم‌درآمد استفاده کرد. این رویکرد ضمن ارتقای اقتصاد چرخشی، به کاهش ضایعات ناشی از همه‌گیری نیز کمک می‌کند. |
| (Bhuiyan et al., 2023) | در این مطالعه، تأثیر میزان الیاف پنبه‌ای بازیافتی حاصل از لباس‌های کهنه بر مقاومت حرارتی بررسی شد. یافته‌ها نشان دادند که این الیاف از راحتی حرارتی بالایی برخوردارند و می‌توانند در تولید منسوجات عایق با کارایی بالا به کار روند. علاوه بر این، ماهیت زیست‌سازگار و تجدیدپذیر آن‌ها موجب سازگاری با اهداف پایداری محیطی است. |

بر اساس استاندارد ISO 8301 طراحی و ساخته شد تا از انتقال حرارت جانبی جلوگیری گردد (International Organization for Standardization, 1991). این دستگاه شامل دیواره‌هایی با ساختار چندلایه بود که از داخل به خارج به ترتیب از MDF به ضخامت ۸ میلی‌متر، فوم پلی‌استایرن به ضخامت ۲۰ میلی‌متر، و MDF بیرونی به ضخامت ۱۶ میلی‌متر تشکیل شده بود. ابعاد داخلی محفظه آزمون ۱۰ × ۱۵ سانتی‌متر با ارتفاع ۱۴/۲ سانتی‌متر تعیین شد تا نمونه‌ها با دقت بالا در آن جای‌گیری کنند. در کف دستگاه یک المنت حرارتی تخت قرار گرفت که با کنترلر دیجیتال در دمای ثابت ۵۰ °C نگه‌داشته می‌شد. برای ثبت توزیع دمایی، سه ترموکوپل نوع K با دقت ± 0.1 °C در عمق‌های ۲/۵، ۷/۵ و ۱۲ سانتی‌متر از سطح گرم نصب شدند. داده‌های دما در فواصل زمانی یک‌ساعته تا زمان رسیدن به حالت پایدار (۲۴ ساعت) ثبت شد. تصویر ۲ نمای شماتیک دستگاه و ترموکوپل‌ها را نشان می‌دهد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

پارچه‌های پنبه‌ای بازیافتی جمع‌آوری، پاک‌سازی و در ابعاد ۱۵×۱۰ سانتی‌متر برش داده شدند. سپس برای بررسی اثر فشردگی، چهار پیکربندی مختلف از نظر تعداد لایه‌ها (C1 تا C4) آماده گردیدند. ضخامت نهایی تمامی نمونه‌ها ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در حالت C4، لایه‌ها

روش پژوهش

در این پژوهش، عملکرد حرارتی پارچه پنبه‌ای بازیافتی به‌عنوان عایق حرارتی پایدار برای استفاده در ساختمان‌ها بررسی شد. در این راستا، ابتدا آزمایش‌های تجربی برای تعیین رسانایی حرارتی و مقاومت گرمایی انجام گرفت و سپس مدل‌سازی حرارتی ساختمان در نرم‌افزار انرژی پلاس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفت تا اثر عایق پنبه‌ای بر کاهش مصرف انرژی در مقایسه با حالت بدون عایق بررسی شود. روش کلی پژوهش در تصویر ۱ نمایش داده شده است.

تصویر ۱. روند کلی روش پژوهش (یافته‌های پژوهش)



دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش برای اندازه‌گیری رسانایی حرارتی در حالت پایدار

تصویر ۲. نمای شماتیک (الف) دستگاه آزمایش و (ب) ترموکوپل‌ها (یافت‌های پژوهش)

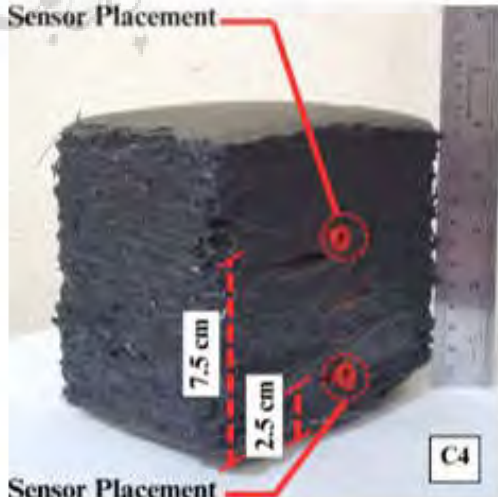


(ب)



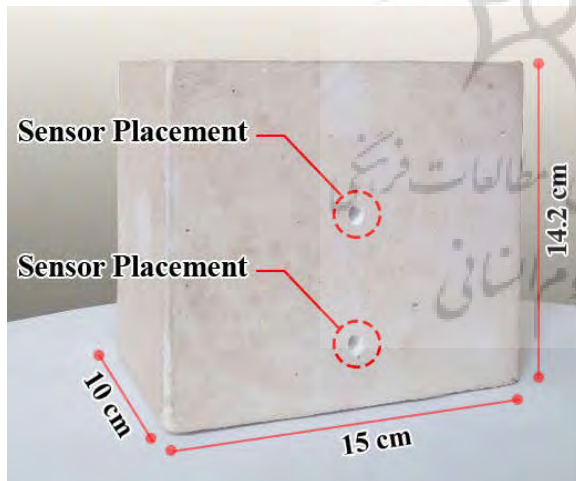
(الف)

تصویر ۳. پیکربندی‌های آماده‌شده برای پارچه پنبه (یافت‌های پژوهش)



توصیه شده است (Razumić et al., 2025). در این راستا، یک بلوک گچی با ابعاد $10 \times 15 \times 14.2$ سانتی متر مکعب به عنوان نمونه مرجع انتخاب و ساخته شد. تلاش شد تا حد امکان مرجع در شرایط خشک انجام گیرد. گچ به دلیل خواص حرارتی پایدار، یکنواختی ساختاری و وجود داده‌های مرجع فراوان در منابع علمی، به طور گسترده در مطالعات آزمایشگاهی به عنوان ماده کنترل برای ارزیابی صحت اندازه گیری رسانایی حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش نمونه گچی تحت همان شرایط آزمایشگاهی در سه مرتبه متوالی تکرار شد که شامل دمای ثابت منبع حرارتی، آرایش ترموکوپل‌ها و مدت زمان آزمون بود. میانگین مقدار رسانایی حرارتی اندازه گیری شده برای بلوک گچی برابر با $0.275 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ به دست آمد. این مقدار با بازه گزارش شده در مطالعات پیشین (0.24 تا $0.29 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) (Prafat et al., 2021; Rahmanian & Wang, 2012; Vo Thong & Hung, 2019) تطابق مناسبی دارد و اختلاف آن کمتر از ۱۰ درصد است. این میزان اختلاف در محدوده خطای قابل قبول برای آزمایش‌های حالت پایدار قرار دارد (ASHRAE, 2014) و بیانگر عملکرد صحیح، پایداری حرارتی و دقت مناسب دستگاه ساخته شده است. بر این اساس، تطابق نتایج اندازه گیری شده برای نمونه گچی با داده‌های گزارش شده در منابع معتبر، اعتبار عملکرد دستگاه ساخته شده را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که داده‌های حاصل از آزمون روی پارچه پنبه‌ای بازیافتی قابل اتکا و علمی هستند. نمونه بلوک گچی استفاده شده برای اعتبارسنجی و داده‌های ثبت شده ساعتی ضریب هدایت حرارتی آن به ترتیب در تصاویر ۴ و ۵ نشان داده شده است.

تصویر ۴: نمونه بلوک گچی مورد استفاده برای اعتبارسنجی دستگاه آزمایش (بافت‌های پژوهش)



تحت فشار ۱۵۰ کیلوگرم ($\approx 9.8 \text{ kPa}$) به مدت سه روز فشرده شدند تا دانسیته و یکنواختی نمونه افزایش یابد. برای جلوگیری از جدایش لایه‌ها، کناره‌های نمونه‌ها با چسب پلی‌یورتان تثبیت شدند بدون اینکه نفوذ چسب درون لایه‌ها رخ دهد. چهار پیکیربندی مختلف برای پارچه پنبه در تصویر ۳ نشان داده شده است. مشخصات لایه‌های نمونه‌های پارچه پنبه در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۲: مشخصات لایه‌های نمونه‌های پارچه پنبه‌ای (بافته‌های پژوهش)

| شناسه نمونه | تعداد لایه | ضخامت اولیه (cm) | ضخامت نهایی (cm) | توضیح |
|-------------|------------|------------------|------------------|--------------------|
| C1 | ۳۳۰ | ۱۲ | ۱۲ | بدون فشردگی |
| C2 | ۲۶۷ | ۱۳/۷ | ۱۲ | فشردگی متوسط ۱ |
| C3 | ۳۰۳ | ۱۵/۳ | ۱۲ | فشردگی متوسط ۲ |
| C4 | ۳۴۰ | ۱۷ | ۱۲ | فشردگی و تثبیت شده |

روش انجام آزمایش

نمونه‌ها در محفظه حرارتی قرار داده شدند و المنت در دمای 50°C ثابت نگه داشته شد. داده‌های دما از سه ترموکوپل نصب شده در عمق‌های مختلف در فواصل زمانی یک ساعته ثبت گردیدند تا زمانی که تغییرات دما به کمتر از 0.2°C رسید که نشان دهنده رسیدن به حالت پایدار بود. در مرحله تحلیل داده‌ها، ابتدا مقاومت حرارتی (R) و سپس رسانایی حرارتی (λ) با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند (Angelotti et al., 2024):

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{T_1^{(i)} - T_3^{(i)}}{\phi^{(i)}} \quad \text{فرمول ۱: اندازه گیری مقاومت حرارتی}$$

$$\lambda = \frac{s}{R} \quad \text{فرمول ۲: اندازه گیری رسانایی حرارتی}$$

که در آن T_1 و T_3 به ترتیب دماهای حسگرهای گرم و سرد، ϕ شار حرارتی، s ضخامت نمونه و N تعداد اندازه گیری‌ها است. هر آزمایش سه بار تکرار شد و میانگین نتایج نهایی در جدول ۳ گزارش گردید.

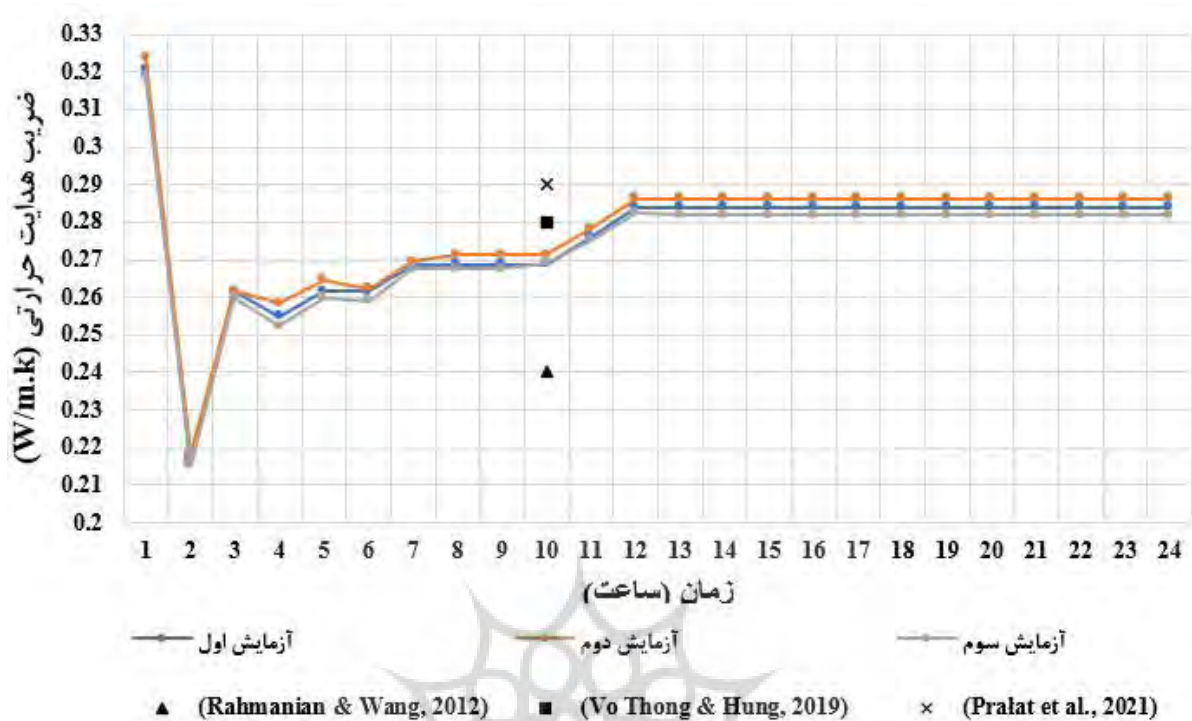
اعتبارسنجی دستگاه آزمایشی

به منظور اعتبارسنجی عملکرد دستگاه ساخته شده برای اندازه گیری رسانایی حرارتی، از روش اعتبارسنجی تجربی مبتنی بر مواد مرجع استفاده شد. در این رویکرد، عملکرد سیستم اندازه گیری از طریق آزمون روی ماده‌ای با خواص ترموفیزیکی شناخته شده و مقایسه نتایج با داده‌های معتبر موجود در منابع علمی ارزیابی گردید. این روش مطابق با رویکردهای پذیرفته شده در ادبیات علمی برای اعتبارسنجی سیستم‌های اندازه گیری است که در آن استفاده از مواد مرجع به عنوان یک شیوه معتبر برای اثبات صحت نتایج

جدول ۳: خلاصه نتایج آزمایش رسانایی حرارتی برای پارچه پنبه‌ای (بافته‌های پژوهش)

| نمونه | ΔT میانگین ($^\circ\text{C}$) | مقاومت حرارتی ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) | رسانایی حرارتی ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$) | زمان تعادل (ساعت) |
|-------|---|--|---|-------------------|
| C1 | ۱۳/۸ | ۲/۶۶ | ۰/۰۴۵ | ۱۰ |
| C2 | ۱۳/۷ | ۲/۵۵ | ۰/۰۴۷ | ۱۰ |
| C3 | ۱۸/۸ | ۲/۵۷ | ۰/۰۴۶۵ | ۱۱ |
| C4 | ۱۳/۳ | ۲/۳۴ | ۰/۰۵۱ | ۱۰ |

تصویر ۵. ضریب هدایت حرارتی ساعتی بلوک گچی (یافته‌های پژوهش)



مدل‌سازی حرارتی در انرژی پلاس

(etal, 2013). در مدل انرژی پلاس، دو سناریو شبیه‌سازی شد که به ترتیب عبارت‌اند از ساختمان بدون عایق (حالت پایه) و ساختمان با عایق پارچه پنبه‌ای. پارامترهای فیزیکی مصالح به کاررفته در مدل در جدول ۴ آورده شده است.

در حالت پایه (بدون عایق)، مقادیر مصرف انرژی سالانه برابر با 2852 kWh برای گرمایش و 525 kWh برای سرمایش محاسبه گردید. نتایج اولیه نشان داد که افزودن عایق پنبه‌ای می‌تواند کاهش قابل ملاحظه‌ای در هر دو شاخص انرژی ایجاد کند.

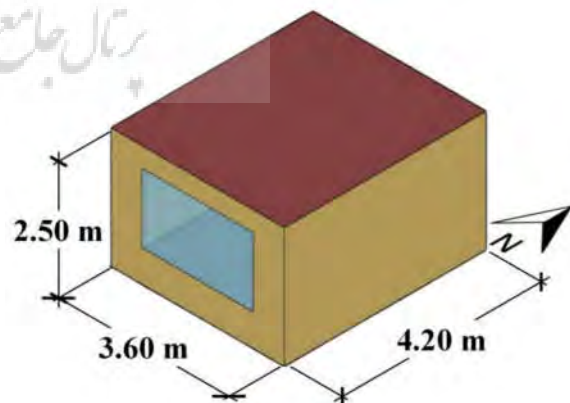
نتایج و بحث

بررسی عملکرد حرارتی پارچه پنبه‌ای

بررسی آزمایش‌ها نشان داد که پارچه پنبه‌ای دارای رفتار حرارتی پایدار و قابل اعتماد در شرایط حالت پایدار است. پس از حدود ده ساعت از آغاز آزمون، گرادیان دمایی بین سطوح گرم و سرد به تعادل رسید و شار حرارتی در محدوده‌ی ثابتی تثبیت شد. این پدیده نشان می‌دهد که روش اندازه‌گیری و طراحی دستگاه حرارتی از دقت کافی برخوردار بوده و داده‌ها قابل اتکا هستند. میانگین رسانایی حرارتی (λ) پارچه پنبه‌ای بین 0.45 تا $0.51 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ اندازه‌گیری شد. این مقادیر در محدوده‌ی گزارش شده برای عایق‌های الیافی طبیعی قرار می‌گیرد (Waz-na et al., 2019). با افزایش تراکم لایه‌ها، مقدار λ به‌طور جزئی افزایش یافت که علت آن کاهش حجم هوای محبوس در ساختار پارچه است. بدین ترتیب، تراکم بیش‌از حد می‌تواند منجر به افت مقاومت حرارتی شود، درحالی‌که در تراکم‌های متوسط، توازن مناسبی بین تداخل و استحکام مکانیکی برقرار است.

به‌منظور بررسی اثر عایق پنبه‌ای بر عملکرد انرژی ساختمان، از نرم‌افزار انرژی پلاس استفاده شد. مدل مورد استفاده بر اساس الگوی استاندارد *Annex 20* طراحی شد که شامل فضای مکعبی با ابعاد $3/6 \times 4/2 \times 2/5$ متر، یک منبع هوای ورودی و خروجی و شرایط مرزی کنترل‌شده است (Nielsen et al., 2010; Voigt, 2000). تصویر ۶ هندسه این مدل را نشان می‌دهد.

تصویر ۶. مدل شبیه‌سازی استاندارد *Annex 20* برای ارزیابی عملکرد انرژی یافت‌ها (پژوهش)



داده‌های اقلیمی از فایل *EPW* شهر تبریز استخراج گردید. تبریز در منطقه‌ای کوهستانی با اقلیم سرد و خشک قرار دارد، با دمای میانگین زمستانی تا 10°C - و تابستانی تا 30°C و رطوبت (Alijani) 30% - 40%

جدول ۴. ویژگی‌های ترموفیزیکی مصالح در مدل انرژی پلاس (یافته‌های پژوهش)

| بخش سازه | نوع ماده | ضخامت (m) | رسانایی حرارتی (W/m·K) | چگالی (kg/m^3) | گرمای ویژه (J/kg·K) |
|-------------|--------------|-----------|------------------------|--------------------|---------------------|
| دیوار داخلی | آجر پخته | ۰/۱ | ۱/۳ | ۲۰۰۲/۳ | ۹۲۰ |
| | عایق پنبه‌ای | ۰/۱۲ | (۰/۰۴۵ - ۰/۰۵۱) | ۶۶۶/۶۷ | ۱۰۰۸۰ |
| | بلوک بتنی | ۰/۱۸ | ۰/۳۸ | ۶۰۸/۷ | ۸۴۰ |
| | گچ تخته‌ای | ۰/۰۱۵ | ۰/۱۵۲ | ۸۰۰/۹ | ۱۰۹۰ |
| دیوار خارجی | آجر پخته | ۰/۱ | ۱/۳ | ۲۰۰۲/۳ | ۹۲۰ |
| | بلوک بتنی | ۰/۱۸ | ۰/۳۸ | ۶۰۸/۷ | ۸۴۰ |
| | عایق پنبه‌ای | ۰/۱۲ | (۰/۰۴۵ - ۰/۰۵۱) | ۶۶۶/۶۷ | ۱۰۰۸۰ |
| | گچ تخته‌ای | ۰/۰۱۵ | ۰/۱۵۲ | ۸۰۰/۹ | ۱۰۹۰ |
| سقف و کف | اندود گچی | ۰/۰۰۱۶ | ۰/۰۵۹ | ۱۱۲۱/۳ | ۱۵۱۰ |
| | بتن | ۰/۱ | ۰/۵۳ | ۱۴۰۰ | ۱۰۰ |
| | بلوک بتنی | ۰/۰۷ | ۰/۵۷ | ۶۰۸/۷ | ۸۴۰ |
| پنجره | شیشه دوجداره | ۰/۰۱۸ | ۱/۴ | ۳۵۰۰ | ۷۵۰ |

در تمامی مدل‌های دارای عایق، گرمایش سالانه حدود $1300 kWh$ کمتر از حالت بدون عایق بود. در مقابل، بار سرمایشی تغییر اندکی داشت و تنها حدود $100 kWh$ افزایش یافت که ناشی از کاهش تبادل حرارتی طبیعی در فصول گرم است. این افزایش ناچیز سرمایش در مقایسه با کاهش عمده در گرمایش قابل چشم‌پوشی است و منجر به صرفه‌جویی خالص قابل توجهی در کل انرژی مصرفی ساختمان می‌شود. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پارچه پنبه‌ای به‌عنوان عایق داخلی در جدارها، رفتاری پایدار، قابل پیش‌بینی و مؤثر در کاهش نیاز حرارتی سالانه دارد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای عایق‌های مصنوعی مانند پلی‌یورتان یا پلی‌استایرن در ساختمان‌های اقلیم سرد باشد.

مقایسه یافته‌های پژوهش با مطالعات پیشین

برای تفسیر دقیق‌تر نتایج به‌دست آمده، یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین ارائه‌شده در جدول ۱ مقایسه شد. مقدار میانگین رسانایی حرارتی اندازه‌گیری شده برای پارچه پنبه‌ای بازمی‌یافتی در این تحقیق ($0.045 W/m \cdot K$) - (Bhuiyan et al., 2023) با مقادیر گزارش شده توسط (Bhuiyan et al., 2023) برای الیاف پنبه‌ای حاصل از بازیافت پوشاک هم‌راستا است؛ به‌گونه‌ای که هر دو مطالعه بر نقش تعیین‌کننده ساختار متخلخل و میزان هوای محبوس در کاهش انتقال حرارت تأکید دارند. همچنین، نتایج حاضر از

بررسی نتایج مدل‌سازی انرژی ساختمان

به‌منظور ارزیابی اثر واقعی عایق پنبه‌ای بر عملکرد انرژی ساختمان، داده‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار انرژی پلاس به‌کار گرفته شدند. در شبیه‌سازی، یک دیوار مرجع (بدون عایق) و چهار سناریوی مختلف عایق‌کاری با ضخامت‌ها و تراکم‌های متفاوت از پنبه مدل‌سازی شد. تحلیل نتایج نشان داد که استفاده از عایق پارچه‌ای پنبه‌ای می‌تواند کاهش قابل توجهی در بار گرمایش و سرمایش سالانه ایجاد کند. جدول ۵ مقادیر مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش را در چهار پیکربندی آزمایش شده و حالت بدون عایق نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در همه پیکربندی‌ها، میزان کل انرژی سالانه حدود ۳۴ تا ۳۵ درصد کاهش یافته است. این کاهش عمدتاً در بخش گرمایش رخ داده و نقش عایق در محدود کردن انتقال حرارت از جدارها در فصل سرد را به‌خوبی نشان می‌دهد. تغییرات جزئی بین مدل‌های C1 تا C4 ناشی از تفاوت‌های اندک در دانسیته مؤثر و ضریب رسانایی حرارتی اندازه‌گیری شده است.

تحلیل رفتار انرژی و تفسیر فیزیکی

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اثر ضخامت ثابت (۱۲ سانتی‌متر) در ترکیب با تغییرات دانسیته، رفتار مشابهی در کاهش بار انرژی ایجاد می‌کند.

جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی مصرف انرژی سالانه برای دیوار دارای عایق پنبه‌ای (یافته‌های پژوهش)

| نوع دیوار | نوع عایق (ضخامت مؤثر) | مصرف گرمایش سالانه (kWh) | مصرف سرمایش سالانه (kWh) | کل مصرف انرژی (kWh) | کاهش کل انرژی نسبت به حالت بدون عایق (%) |
|------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|--|
| دیوار پایه | بدون عایق | ۲۸۵۲/۳۴ | ۵۲۵/۲۶ | ۳۳۷۷/۶ | — |
| مدل C1 | پنبه - ۱۲ سانتی‌متر | ۱۵۵۱/۳۱ | ۶۳۰/۳۱ | ۲۱۸۱/۶۲ | ۳۵/۴ |
| مدل C2 | پنبه - ۱۲ سانتی‌متر | ۱۵۶۵/۴۹ | ۶۲۹/۲۱ | ۲۱۹۴/۷۰ | ۳۵/۰۲ |
| مدل C3 | پنبه - ۱۲ سانتی‌متر | ۱۵۶۲/۹۸ | ۶۲۹/۴۱ | ۲۱۹۲/۳۹ | ۳۵/۰۹ |
| مدل C4 | پنبه - ۱۲ سانتی‌متر | ۱۵۸۴/۶۸ | ۶۲۸/۵۵ | ۲۲۱۲/۲۳ | ۳۴/۴۷ |

ساختمان دارد. مقدار میانگین رسانایی حرارتی این ماده برابر با $0.46/W/m\cdot K$ اندازه‌گیری شد که در محدوده عایق‌های طبیعی با عملکرد بالا قرار می‌گیرد. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که پایداری گردآیدان حرارتی در طول آزمایش و انحراف کمتر از ۵ درصد بین تکرارها، بیانگر یکنواختی انتقال حرارت و کیفیت مناسب فشرده‌گی لایه‌های الیاف است. در مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار انرژی پلاس، نتایج شبیه‌سازی برای دیوار مجهز به لایه ۱۲ سانتی‌متری عایق پنبه‌ای نشان داد که مصرف کل انرژی سالانه ساختمان در مقایسه با دیوار بدون عایق به‌طور میانگین حدود ۳۴ تا ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش عمدتاً در بخش گرمایش سالانه مشاهده شد که نشان‌دهنده اثر قابل توجه عایق در محدودسازی تلفات حرارتی در اقلیم سرد تبریز است.

به‌طور کلی، استفاده از پارچه پنبه‌ای بازیافتی نه تنها باعث کاهش مصرف انرژی ساختمان می‌شود، بلکه از منظر زیست‌محیطی نیز به کاهش ضایعات نساجی و استفاده مجدد از منابع طبیعی کمک می‌کند. ویژگی‌هایی چون سبکی، قیمت پایین، زیست‌تخریب‌پذیری و در دسترس بودن، این ماده را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای پایدار در معماری انرژی‌محور تبدیل می‌کند. با این وجود، برای اطمینان از پایداری عملکرد در مقیاس صنعتی، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده اثر رطوبت و تکرار سیکل‌های حرارتی، دوام مکانیکی در شرایط واقعی و تحلیل چرخه عمر زیست‌محیطی (LCA) بررسی شود تا زمینه استفاده گسترده‌تر از عایق‌های پنبه‌ای در طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف فراهم آید.

یافته‌های (Rubino et al., 2023) پشتیبانی می‌کند که عملکرد حرارتی مناسب عایق‌های بی‌بافت مبتنی بر ضایعات نساجی را در محدوده مشابهی از رسانایی حرارتی گزارش کرده‌اند. در مقایسه با پژوهش (Angelotti et al., 2024)، که تمرکز آن بر کاربرد پوشاک پنبه‌ای بازیافتی در منسوجات پوشیدنی بوده است، مقادیر رسانایی حرارتی اندازه‌گیری شده در این مطالعه اندکی بالاتر گزارش شده است. این اختلاف می‌تواند به تفاوت در فشرده‌گی لایه‌ها، متنی نمونه، و شرایط مرزی آزمایش نسبت داده شود؛ با این حال، روند کلی نتایج از نظر رفتار عایق بودن الیاف پنبه‌ای در هر دو پژوهش همسواست.

از سوی دیگر، یافته‌های این پژوهش با مطالعاتی که بر الیاف مصنوعی یا ترکیبی (مانند پلی‌استر یا پلی‌آمید) تمرکز داشته‌اند، از جمله (Muthu- Neri et al., 2023; kumar & Thilagavathi, 2024)، هم‌راستایی کامل ندارد؛ زیرا این مواد به دلیل ساختار مولکولی متفاوت و پایداری بالاتر در برابر رطوبت، در برخی موارد رسانایی حرارتی پایین‌تری نشان داده‌اند. این تفاوت بیانگر آن است که هر چند عملکرد حرارتی پنبه بازیافتی در محدوده عایق‌های طبیعی کارآمد قرار دارد، اما نوع الیاف و شرایط فرآوری نقش مهمی در تعیین رفتار نهایی عایق ایفا می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که پارچه پنبه‌ای بازیافتی به‌عنوان یک عایق حرارتی طبیعی، عملکرد قابل توجهی در کاهش اتلاف حرارت

فهرست منابع

- Alijani, B., Ryu, J., & Sohrabi, M. (2013). Spatial and temporal analysis of climatic extremes in the mountainous regions of Iran. *The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses*, 4(4), 19–37. <https://doi.org/10.18848/1835-7156/CGP/v04i04/37183>
- Alsaffar, A. K. K., Alquzweeni, S. S., Al-Ameer, L. R., Ali, A. H., Mohamed, A., Aldaihani, H. M., Reham, A., Al-Ansari, N., Al-Hashimi, O., Shubbar, A., Khan, M. A., & Hashim, K. (2023). Development of eco-friendly wall insulation layer utilising the wastes of the packing industry. *Heliyon*, 9(11), e21799. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21799>
- Angelotti, A., Alongi, A., Augello, A., Dama, A., De Antonellis, S., Ravidà, A., Zinzi, M., & De Angelis, E. (2024). Thermal conductivity assessment of cotton fibers from apparel recycling for building insulation. *Energy and Buildings*, 324, 114866. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114866>
- Anisah, T. N., Andika, A., Wahyudi, D., & Harnaji, B. (2024). Fast fashion revolution: Unveiling the path to sustainable style in the era of fast fashion. *E3S Web of Conferences*, 475, 02005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447502005>
- ASHRAE, A. S. of H. R. and A.-C. E. (2014). Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings.
- Baloyi, R. B., Gbadeyan, O. J., Sithole, B., & Chunilall, V. (2024). Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: A review. *Textile Research Journal*, 94(3–4), 508–529. <https://doi.org/10.1177/00405175231210239>
- Bayraktar, M., Fabrizio, E., & Perino, M. (2012). The “extended building energy hub”: A new method for the simultaneous optimization of

- energy demand and energy supply in buildings. *HVAC&R Research*, 18(1–2), 67–87. <https://doi.org/10.1080/10789669.2011.588300>
- Bhuiyan, M. A. R., Ali, A., Mohebbullah, Md., Hossain, M. F., Khan, A. N., & Wang, L. (2023). Recycling of cotton apparel waste and its utilization as a thermal insulation layer in high performance clothing. *Fashion and Textiles*, 10(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s40691-023-00342-y>
- Camacho Cusichua, C. J., Bruno Chumbirayco, K. J., Arriola Alvarado, C. E., & Aguirre Camarena, R. A. (2024). Impact of fast fashion on the environment: A systematic review (2013–2023). In *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024)*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.658>
- Chang, M.-C., & Shih, S.-G. (2015). A hybrid approach of dynamic programming and genetic algorithm for multi-criteria optimization on sustainable architecture design. *Computer-Aided Design and Applications*, 12(3), 310–319. <https://doi.org/10.1080/16864360.2014.981460>
- Conti, J., Holtberg, P., Diefenderfer, J., LaRose, A., Turnure, J. T., & Westfall, L. (2016). *International Energy Outlook 2016 with projections to 2040*. U.S. Energy Information Administration. <https://doi.org/10.2172/1296780>
- Cuc, S., & Vidovic, M. (2014). Environmental sustainability through clothing recycling. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 108–115. <https://doi.org/10.31387/oscm0100064>
- Fang, Y., & Cho, S. (2019). Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. *Solar Energy*, 191, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.039>
- Hassanpour, M. (2019). Evaluation of Iranian textile and leather in-

- dustries. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 6(1), 33–51. <https://doi.org/10.22105/jarie.2019.167432.1072>
- Humaidi, N., & Prabowo, H. S. (2024). Barriers and challenges in managing textile waste in the circular economy. *Advances in Social Sciences Research Journal*, 11(2.2), 486–500. <https://doi.org/10.14738/ass-rj.112.2.16396>
- International Organization for Standardization. (1991). *Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus (ISO 8301)*. <https://www.iso.org/standard/15362.html>
- Islam, S., & Bhat, G. (2019). Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. *Journal of Environmental Management*, 251, 109536. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109536>
- Islam, S., Bhat, G., & Mani, S. (2024). Life cycle assessment of thermal insulation materials produced from waste textiles. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(2), 1071–1085. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01882-7>
- Juanga-Labayen, J. P., Labayen, I. V., & Yuan, Q. (2022). A review on textile recycling practices and challenges. *Textiles*, 2(1), 174–188. <https://doi.org/10.3390/textiles2010010>
- Kamali, F. J., & Sa'di, B. H. (2016). Role of Iranian traditional needlework in people's social and family life: A study of Pateh embroidery in Kerman. *Modern Applied Science*, 11(1), 253. <https://doi.org/10.5539/mas.v11n1p253>
- Karmakar, S., Majumdar, A., & Butola, B. S. (2024). A sustainable recycling process and its life cycle assessment for valorising post-consumer textile materials for thermal insulation applications. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. <https://doi.org/10.1177/0734242X241270933>
- Konis, K., Gamas, A., & Kensek, K. (2016). Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. *Solar Energy*, 125, 161–179. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.020>
- Lu, M., & Lai, J. H. K. (2019). Building energy: A review on consumptions, policies, rating schemes and standards. *Energy Procedia*, 158, 3633–3638. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.899>
- Mandell, J. F., Steckel, M. G., Chung, S.-S., & Kenney, M. C. (1987). Fatigue and environmental resistance of polyester and nylon fibers. *Polymer Engineering & Science*, 27(15), 1121–1127. <https://doi.org/10.1002/pen.760271503>
- Mohammad, S., & Shea, A. (2013). Performance evaluation of modern building thermal envelope designs in the semi-arid continental climate of Tehran. *Buildings*, 3(4), 674–688. <https://doi.org/10.3390/buildings3040674>
- Muthukumar, N., & Thilagavathi, G. (2024). Development of sustainable thermal and sound insulation materials from textile fiber wastes. In *Bio-composites: Bio-based fibers and polymers from renewable resources* (pp. 247–256). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-97282-6.00011-6>
- Neri, M., Cuerva, E., Levi, E., Pujadas, P., Müller, E., & Guardo, A. (2023). Thermal, acoustic, and fire performance characterization of textile face mask waste for use as low-cost building insulation material. *Developments in the Built Environment*, 14, 100164. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100164>
- Nielsen, P. V., Rong, L., & Cortés, I. O. (2010). The IEA Annex 20 two-dimensional benchmark test for CFD predictions. *Clima 2010: 10th REHVA World Congress: Sustainable Energy Use in Buildings*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56271187>
- Owusu-Wiredu, P. (2024). From a disposable to a sustainable fashion industry: A review of the shameful trade flows of used textiles and the need to address fast fashion. *Corporate Governance and Sustainability Review*, 8(1), 32–44. <https://doi.org/10.22495/cgsv8i1p3>
- Pralat, K., Ciernicka, J., Koper, A., Buczkowska, K. E., & Łoś, P. (2021). Comparison of the thermal properties of geopolymer and modified gypsum. *Polymers*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/polym13081220>
- Rahmanian, I., & Wang, Y. C. (2012). A combined experimental and numerical method for extracting temperature-dependent thermal conductivity of gypsum boards. *Construction and Building Materials*, 26(1), 707–722. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.078>
- Rasheed, A., Zehra, H., Ahmad, S., & Ahmad, F. (2023). Development of multi-layer needle-punched nonwoven electric heating pad. *The Journal of The Textile Institute*, 114(3), 462–469. <https://doi.org/10.1080/00405000.2022.2049049>
- Razumić, A., Runje, B., Alar, V., Štrbac, B., & Trzun, Z. (2025). A Review of Methods for Assessing the Quality of Measurement Systems and Results. *Applied Sciences*, 15(17), 9393. <https://doi.org/10.3390/app15179393>
- Rubino, C., Liuzzi, S., Stefanizzi, P., & Martellotta, F. (2023). Characterization of sustainable building materials obtained from textile waste: From laboratory prototypes to real-world manufacturing processes. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136098. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136098>
- Samardzioska, T., Jovanoska, M., & Grujoska, V. (2023). Sustainable thermal insulation derived from recycled textile waste. *Advances in Environmental and Engineering Research*, 4(1), 1–8. <https://doi.org/10.21926/aeer.2301004>
- Sasi, S., Joseph, P., Haigh, R., Sandanayake, M., Vrcelj, Z., & Yaghoubi, E. (2024). A review on the effects of waste textile polymer fiber on concrete strength: Exploring the key parameters. *Buildings*, 14(5), 1486. <https://doi.org/10.3390/buildings14051486>
- Seyf, A. (2001). Iranian textile handicrafts in the nineteenth century: A note. *Middle Eastern Studies*, 37(3), 49–58. <https://doi.org/10.1080/714004403>
- Singh, A. (2024). Integration of waste management in textile industries of India. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 8(7), 1–13. <https://doi.org/10.55041/IJSREM36458>
- Sun, C., Liu, Q., & Han, Y. (2020). Many-objective optimization design of a public building for energy, daylighting and cost performance improvement. *Applied Sciences*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/app10072435>
- Tang, K. H. D. (2023). State of the art in textile waste management: A review. *Textiles*, 3(4), 454–467. <https://doi.org/10.3390/textiles3040027>
- Trajković, D., Jordeva, S., Tomovska, E., & Zafirova, K. (2016). Polyester apparel cutting waste as insulation material. *The Journal of The Textile Institute*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1237335>
- Vo Thong, N., & Hung, T. (2019). Research on the parameters influencing the thermal conductivity of gypsum plasterboard under fire conditions. *Cogent Engineering*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1569796>
- Voigt, L. K. (2000). Comparison of turbulence models for numerical calculation of airflow in an Annex 20 room. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197565059>
- El Wazna, M., El Gounni, A., El Bouari, A., El Alami, M., & Cher-

- kaoui, O. (2019). Development, characterization and thermal performance of insulating nonwoven fabrics made from textile waste. *Journal of Industrial Textiles*, 48(7), 1167–1183. <https://doi.org/10.1177/1528083718757526>
- Yin, Y., Yao, D., Wang, C., & Wang, Y. (2014). Removal of spandex from nylon/spandex blended fabrics by selective polymer degradation. *Textile Research Journal*, 84(1), 16–27. <https://doi.org/10.1177/0040517513487790>
- Zach, J., Hroudová, J., & Korjenic, A. (2019). Sustainable materials with potential application as core materials in vacuum insulations. *Applied Mechanics and Materials*, 887, 90–97. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.887.90>

