



University of Tehran

Investigation of the thermo-physical performance of sandwich panels with MDF skin and Paulownia wood-polyurethane foam hybrid core

Hossein Manouchehri¹ | Payam Moradpoor^{2*} |
Mosayeb Dalvand³ | Carsten Mai⁴

1. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: hmanouchehri@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: pmoradpour@ut.ac.ir
3. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: m.daland@ut.ac.ir
4. Department of Wood Biology and Wood Products, University of Göttingen, Göttingen, Germany. Email: carsten.mai@uni-goettingen.de

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 21 June 2025
Revised: 02 August 2025
Accepted: 07 August 2025
Published online: 16 September 2025

Keywords:
Continuous lattice,
Discontinuous lattice,
Honeycomb,
Thermal insulation.

ABSTRACT

In this study, the physical properties and thermal performance of lightweight sandwich panels with a hybrid paulownia wood-polyurethane foam core were investigated. The type of core (honeycomb, continuous lattice, and discontinuous lattice) and the core composition (with and without polyurethane foam) were selected as variable factors. MDF with a thickness of 3 mm was used as the skin of the sandwich panels. Panels were manufactured according to the experimental design, with dimensions of 90 × 60 × 3.1 cm. After manufacturing, test samples were prepared and evaluated for density, water absorption, and thermal properties. Results showed that the density of panels with continuous and discontinuous lattice cores increased by about 30% and 50%, respectively, compared to the honeycomb core (control), while remaining within the allowable limit for lightweight panels. Water absorption results indicated that panels with a honeycomb core without foam had the highest absorption (84.3%), while panels with a continuous lattice core with foam had the lowest (52.5%). The use of polyurethane foam increased panel density, reduced water absorption, and significantly improved thermal insulation. The continuous lattice core containing foam, with a thermal conductivity of 0.043 W/m·K, was selected as the optimal treatment for thermal insulation. Despite the increased density of wood-core sandwich panels compared to the control, they still fall within the lightweight panel category. Therefore, their use as thermal insulation panels is recommended.

Cite this article: Manouchehri, H., Moradpoor, P., Dalvand, M., Mai, C. (2025). Investigation of the thermo-physical performance of sandwich panels with MDF skin and Paulownia wood-polyurethane foam hybrid core. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (2), 163-176. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.399220.1360>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.399220.1360>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

بررسی عملکرد فیزیکی-حرارتی پانل‌های ساندویچی با پوسته MDF و هسته هیبریدی چوب پائولونیا-فوم پلی‌اورتان

حسین منوچهری^۱ | پیام مرادپور^{۲*} | مسیب دالوند^۳ | کارستن مای^۴

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hmanouchehri@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: pmoradpour@ut.ac.ir
۳. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: m.daland@ut.ac.ir
۴. گروه بیولوژی چوب و فرآورده‌های چوبی، دانشگاه جورج‌آگوست، دانشکده جنگلداری، گوتینگن، آلمان. رایانامه: carsten.mai@uni-goettingen.de

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، خواص فیزیکی و عملکرد حرارتی پانل‌های ساندویچی سبک وزن با هسته هیبریدی چوب پائولونیا-فوم پلی‌اورتان مورد بررسی قرار گرفتند. نوع هسته (لانه‌زنبوری، مشبک پیوسته و مشبک ناپیوسته) و ترکیب هسته (با و بدون فوم پلی‌اورتان) به عنوان عوامل متغیر انتخاب شدند. از MDF خام با ضخامت ۳ میلی‌متر در ساخت پوسته پانل‌های ساندویچی استفاده شد. پانل‌ها با توجه به طرح آزمایش‌های پیش‌بینی شده در تحقیق با ابعاد ۹۰×۶۰×۳/۱ سانتی‌متر ساخته شدند. پس از ساخت پانل‌ها، نمونه‌های آزمونی جهت تعیین دانسیته، جذب آب و خواص حرارتی تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که دانسیته پانل‌های ساندویچی با هسته مشبک پیوسته و ناپیوسته در مقایسه با هسته لانه‌زنبوری (نمونه شاهد) به ترتیب افزایشی در حدود ۳۰ و ۵۰ درصد داشت و این در حالی است که این افزایش دانسیته در حد مجاز پانل‌های سبک بوده است. نتایج جذب آب پانل‌های ساندویچی نشان داد که پانل‌های دارای هسته لانه‌زنبوری فاقد فوم، دارای بیشترین مقدار جذب آب (۸۴/۳ درصد) و پانل‌های دارای هسته مشبک پیوسته، دارای فوم کمترین مقدار جذب آب (۵۲/۵ درصد) را داشته‌اند. استفاده از فوم پلی‌اورتان منجر به افزایش دانسیته پانل‌ها و کاهش جذب آب نمونه‌ها شده و تأثیر چشمگیری بر بهبود خاصیت عایق حرارتی پانل‌ها داشت. هسته مشبک پیوسته دارای فوم با ضریب هدایت حرارتی ۰/۰۴۳ وات بر مترکلوین به عنوان تیمار بهینه جهت استفاده در عایق‌های حرارتی انتخاب شد. علی‌رغم افزایش دانسیته پانل‌های با هسته چوبی نسبت به نمونه شاهد، به دلیل قرارگیری این پانل‌ها در کلاس پانل‌های سبک، استفاده از آنها به عنوان پانل‌های عایق حرارتی توصیه می‌شوند.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

کلیدواژه‌ها:

عایق حرارتی،

لانه‌زنبوری،

مشبک پیوسته،

مشبک ناپیوسته.

استاد: منوچهری؛ حسین، مرادپور؛ پیام، دالوند؛ مسیب، مای؛ کارستن (۱۴۰۴). بررسی عملکرد فیزیکی-حرارتی پانل‌های ساندویچی با پوسته MDF و هسته هیبریدی چوب

پائولونیا-فوم پلی‌اورتان. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۲)، ۱۷۶-۱۶۳. DOI: <https://10.22059/jfwf.2025.399220.1360>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.399220.1360>



۱. مقدمه

پانل‌های ساندویچی به دلیل ساختار مرکب خود، از دو لایه نازک و مقاوم در طرفین به عنوان پوسته و یک هسته ضخیم و سبک در مرکز ساخته شده و به دلیل داشتن سختی و نسبت مقاومت به وزن بالا، پتانسیل بالایی در توسعه سازه‌های سبک وزن دارند [۱]. اتصال لایه‌های رویی از طریق چسب‌های صنعتی موجب شده این فناوری در طیف گسترده‌ای از کاربردها جایگاه ویژه‌ای پیدا کند [۲]. در مقایسه با مواد سنتی مانند تخته خرده چوب، تخته فیبر و یا دیگر فرآورده‌های چوبی و غیرچوبی، پانل‌های ساندویچی عملکرد بهتری از نظر سختی، وزن و قابلیت تولید انبوه دارند [۳]. از مزایای مهم این پانل‌ها می‌توان به وزن پایین، استحکام بالا، ضخامت مؤثر، صرفه‌جویی اقتصادی و قابلیت تولید در حجم بالا اشاره کرد [۴]. امروزه استفاده از پانل‌های ساندویچی در حوزه‌هایی مانند ساختمان‌سازی، صنایع دریایی و هوافضا به دلیل عملکرد فنی و اقتصادی مطلوب آنها افزایش یافته است. در صنعت ساخت و ساز، این پانل‌ها جایگزین مناسبی برای مواد سنتی مورد استفاده بوده، که می‌توانند با کاهش وزن سازه، کاهش بار مرده ساختمان و هزینه‌های تولید را نیز در پی داشته باشند [۵-۷]. با رشد جمعیت و نیاز به توسعه پایدار و استفاده بهینه از انرژی، توجه به مصالح ساختمانی با قابلیت عایق حرارتی افزایش یافته است [۸]. عایق‌های حرارتی کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌هایی چون ساختمان‌سازی، سردخانه‌ها، لوازم خانگی، لوله‌های نفت و حمل و نقل گاز طبیعی دارند [۹]. طبق گزارش‌های به دست آمده، صنعت ساختمان حدود ۳۲ درصد از مصرف جهانی انرژی را به خود اختصاص می‌دهد و همچنین نزدیک به ۴۰ درصد از اتلاف حرارتی ساختمان‌ها از طریق دیوارهای خارجی اتفاق می‌افتد [۱۰]. این آمار نشان‌دهنده اهمیت استفاده از عایق‌های حرارتی در پوسته ساختمان برای کاهش اتلاف انرژی و ارتقاء بهره‌وری حرارتی است. بهره‌گیری از عایق‌های مناسب نه تنها می‌تواند در کاهش هزینه‌های انرژی مؤثر باشد، بلکه کیفیت محیط داخلی ساختمان را بهبود داده و ارتقاء رفاه و سلامت ساکنان را نیز به همراه دارند [۱۱].

فوم‌های پلیمری، به ویژه پلی‌اورتان یکی از مؤثرترین انواع عایق‌های حرارتی به شمار می‌روند که به واسطه ساختار متخلخل بسته، عملکرد مطلوبی به عنوان عایق حرارتی دارند. فوم پلی‌اورتان از پلیمریزاسیون ایزوسیانات و پلی‌ال در حضور عوامل کف ساز تولید می‌شود. انتخاب عامل کف ساز مناسب نقش کلیدی در کاهش رسانایی حرارتی دارد، به طوری که باید از نظر شیمیایی پایدار، غیرقابل اشتعال و سازگار با محیط زیست باشد [۱۲]. با توجه به مسائل محیط زیستی و اقتصادی، پانل‌های ساندویچی سبک وزن با هسته فوم می‌توانند جایگزین مناسبی برای تخته خرده چوب‌های سنتی در صنعت ساختمان باشند [۳]. با انتخاب صحیح مصالح، می‌توان وزن این پانل‌ها را بدون آنکه از مقاومت مکانیکی آنها کاسته شود، در حدود ۵۰ درصد کاهش داد، با این حال، یکی از چالش‌های اصلی استفاده از فوم‌ها، محدودیت در مقاومت مکانیکی آنهاست، که مانع کاربرد گسترده در تمام بخش‌های سازه می‌شود [۱۳]. برای رفع این محدودیت، استفاده از ساختارهایی همچون شبکه‌های لانه زنبوری به صورت ترکیبی با فوم پیشنهاد شده است که می‌تواند با افزایش وزن جزئی، مقاومت مکانیکی را به طور چشمگیری افزایش دهد [۱۴، ۱۵]. در سال‌های اخیر، تحقیق در مطالعات متعددی به بررسی و بهینه‌سازی ویژگی‌های حرارتی فوم‌های پلی‌اورتان پرداخته‌اند که به عنوان نمونه می‌توان به اندازه‌گیری رسانایی حرارتی فوم‌های سخت پلی‌اورتان [۱۶]، ظرفیت گرمایی ویژه و رسانایی حرارتی چند نوع فوم پلی‌اورتان [۱۷]، فیزیکی فوم‌های پلی‌اورتان ساخته شده از پلی‌ال سویا-فسفات با عامل کف ساز آب [۱۸]، اشاره کرد. نتایج این تحقیقات نشان داده‌اند که دانسیته، دما، نوع عامل کف ساز و ساختار سلولی، همگی در عملکرد حرارتی فوم‌های پلی‌اورتان تأثیرگذارند [۱۷، ۱۸]. هدایت حرارتی پانل‌های ساخته شده از الیاف چوبی نیز به نوع چوب، اندازه الیاف و دانسیته ماده بستگی دارد. گونه‌های چوبی با دانسیته بالا، هدایت حرارتی بالاتری نسبت به چوب‌های سبک دارند. الیاف بلند نیز موجب افزایش هدایت حرارتی شده، در حالی که الیاف ریز، عملکرد عایق حرارتی بهتری دارند. به طور کلی، جذب بالای رطوبت در الیاف چوبی نسبت به مواد معدنی، باعث افزایش هدایت حرارتی می‌شود. افزایش دانسیته حجمی، ضخامت و فشار فرآیند تولید نیز تأثیر قابل توجهی بر خواص حرارتی نهایی دارند [۱۹]. در حال حاضر، در ایران عمدتاً از شبکه‌های لانه زنبوری تهیه شده از مقوای نازک در ساخت هسته پانل‌های ساندویچی چوبی صفحه‌ای استفاده می‌شود که علی‌رغم وزن سبک، دارای استحکام بالایی نیستند و به عنوان عایق‌های حرارتی از عملکرد مناسبی برخوردار نمی‌باشند. ساخت پانل‌های ساندویچی با طراحی هسته‌های مشبک چوبی از گونه‌های چوبی سبک وزن (به عنوان مثال چوب پائولونیا (*Paulownia fortunei*)) و تقویت آن با مواد عایقی (فوم پلی‌اورتان) به عنوان یک راهکار، می‌تواند ضمن حفظ سبکی، استحکام و عملکرد عایق حرارتی پانل‌های ساندویچی را نیز

ارتقاء دهد. فوم پلی‌اورتان، ضمن پُر کردن فضای بین اجزای شبکه چوبی، به تقویت استحکام ساختاری کمک کرده و در عین حال می‌تواند به عنوان عایق حرارتی عمل کند. این ترکیب، می‌تواند گزینه‌ای مؤثر برای کاربردهای ساختمانی با هدف بهینه‌سازی انرژی و کاهش مصرف مواد اولیه باشد. با توجه به موارد فوق، هدف از این تحقیق، ارزیابی عملکرد فیزیکی-حرارتی پانل‌های ساندویچی با پوسته MDF و هسته هیبریدی چوب-پلی‌اورتان می‌باشد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد

در این مطالعه، از چوب پائولونیا (*Paulownia fortunei*) در ساخت هسته‌های مشبک پیوسته و ناپیوسته پانل‌های ساندویچی مورد نظر استفاده شد که از مزرعه کشت گونه‌های سریع‌الرشد واقع در روستای دلیر استان مازندران تهیه گردید. هسته مشبک لانه‌زنبوری^۱ مورد استفاده در این تحقیق از شرکت هانی کامب^۲ سپاهان تهیه گردید. در ساخت پوسته پانل از MDF خام با ضخامت ۳ میلی‌متر استفاده شد که از بازار چوب کرج (استان البرز) تأمین شد. فوم پلی‌اورتان^۳ مورد استفاده برای هیبریدسازی هسته پانل‌های ساندویچی از شرکت عایق‌کاران سرد تهیه شد. به منظور اتصال پوسته‌ها به هسته از چسب پلی‌اورتان با نام تجاری "STERN 711" محصول کشور ترکیه استفاده شد. مشخصات فوم و چسب پلی‌اورتان مورد استفاده در این تحقیق در جدول یک ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فوم و چسب پلی‌اورتان مورد استفاده در این تحقیق

نوع ماده	فوم پلی‌اورتان			چسب پلی‌اورتان		
مشخصه	دانشیه	زمان اختلاط	زمان ژله‌ای شدن	دمای فرایند	رنگ	دانشیه
(گرم بر سانتی‌مترمکعب)	(ثانیه)	(ثانیه)	(ثانیه)	(درجه سانتی‌گراد)	-	(گرم بر سانتی‌مترمکعب)
۰/۰۴۲	۱۰-۷	۶۰-۵۰	۲۵-۲۸	کرمی	۱/۲	۱۰۰
مقادیر						۲۵
						مقدار ماده جامد
						زمان مصرف
						(دقیقه)

۲-۲. ساخت پانل‌های ساندویچی

در این تحقیق، در طراحی و ساخت پانل‌های ساندویچی، سه نوع هسته مختلف در دو حالت با و بدون فوم پلی‌اورتان شامل: ۱- هسته مشبک لانه‌زنبوری به عنوان شاهد (شکل ۱- الف)، ۲- هسته مشبک ناپیوسته^۴ شامل قطعات چوبی با ابعاد ۲۵×۲۵×۲۵ میلی‌متر و پین‌های چوبی با قطر ۸ میلی‌متر از چوب پائولونیا (شکل ۱- ب) و ۳- هسته مشبک پیوسته^۵ ساخته شده از چوب پائولونیا با ضخامت ۵ میلی‌متر و پهنای ۲۵ میلی‌متر (شکل ۱- ج) مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۱). پوسته‌های مورد استفاده برای تمامی پانل‌ها از جنس MDF خام با ضخامت ۳ میلی‌متر بود. سایر پارامترها در طول تحقیق ثابت نگه داشته شدند. جدول ۲، طرح آزمایش‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

آماده‌سازی و ساخت هسته‌ها، در آزمایشگاه مبلمان و فرآورده‌های مرکب گروه علوم چوب و کاغذ دانشگاه تهران انجام شد. لازم به ذکر است، به منظور ساخت هسته‌های چوبی، قطعات چوبی پائولونیا در داخل آون تا رطوبت ۱۲ درصد خشک شدند. شکل ۲، فرآیند ساخت هسته‌های چوبی را نشان می‌دهد. هسته‌های آماده شده، جهت ساخت پانل‌های ساندویچی به مرکز فنی و حرفه‌ای شماره ۱ شهید خدایی استان البرز انتقال یافتند. برای ساخت پانل‌های ساندویچی، ابتدا قالبی با ابعاد ۱۰۰×۶۵×۲/۵ سانتی‌متر با MDF ساخته شد. بعد از استقرار هسته‌ها در قالب، فوم پلی‌اورتان به میزان ۸۰۰ گرم با ترکیب ۵۰ درصد ایزوسیانات و ۵۰ درصد پلی‌ال به صورت دستی در قالب تزریق شده و به مدت یک ساعت داخل پرس در دمای محیط قرار گرفتند (شکل ۳). پس از ساخت

^۱Honeycomb lattice core

^۲Sepahan Honeycomb Company

^۳Polyurethane foam

^۴Discontinuous lattice core

^۵Continuous lattice core



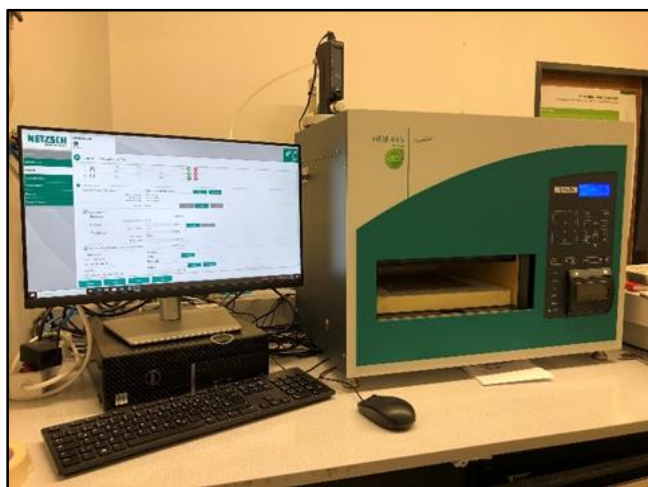
شکل ۳. نمونه هیبریده شده هسته مشبک پیوسته (سمت راست) و هسته مشبک ناپیوسته (سمت چپ)

۳-۲. آزمون دانسیته و جذب آب پانل‌های ساندویچی

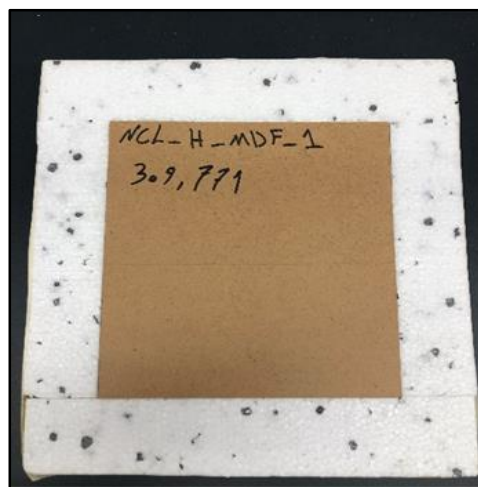
دانسیته و جذب آب پانل‌های ساندویچی به ترتیب مطابق با استاندارد ASTM C 271 و با ابعاد 30×30 سانتی‌متر و ASTM C 272 و با ابعاد $7/5 \times 7/5$ سانتی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفتند [۲۱، ۲۲].

۴-۲. آزمون هدایت حرارتی

آزمون هدایت حرارتی، با استفاده از دستگاه هدایت حرارتی HFM 446 Lambda Eco Medium ساخت شرکت Netzsch-Gerätebau GmbH، سلپ، آلمان (شکل ۴-الف)، مطابق با استاندارد DIN EN 12667 2001 [۲۳] در دمای متوسط 20°C درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه‌های با ابعاد $20 \times 20 \times 3$ سانتی‌متر، در گروه بیولوژی چوب دانشگاه جورج آگوست گوتینگن آلمان انجام شد. جهت انجام آزمایش، دستگاه برای اختلاف 10°C درجه کلون، نرخ گرمایش 1°C درجه کلون در دقیقه و جریان هوای خشک، 15 لیتر در دقیقه تنظیم شد. برای اطمینان از تماس یکنواخت میان صفحات حسگر و نمونه‌ها، فشاری معادل $0/4$ کیلوپاسکال اعمال شد. همچنین کیفیت پایداری مطابق با استاندارد ASTM C518 در نظر گرفته شد [۲۴]. برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی در صفحه پانل و در جهت X و Y نوارهای 10 سانتی‌متری از جنس پلی‌استایرن برش داده شد و به صورت 90° درجه‌ای سراسری با چسب کاغذی نازک به هم متصل گردید (شکل ۴. ب).



(الف)



(ب)

شکل ۴. الف) دستگاه اندازه‌گیری آزمون هدایت حرارتی و ب) نمونه مورد آزمون همراه با پرکننده

به‌منظور بررسی و تحلیل عوامل متغیر و نتایج به‌دست آمده، از طرح پایه کاملاً تصادفی در قالب آزمایش فاکتوریل استفاده شد. بر این اساس، از ترکیب سطوح عوامل متغیر ۶ تیمار به‌دست آمد که برای هر تیمار سه تکرار جهت انجام آزمون‌های فیزیکی و دو تکرار برای آزمون هدایت حرارتی تهیه شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، برای مقایسه و تحلیل نتایج از آزمون تجزیه واریانس استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام شد. تمام آنالیزهای آماری در بستر نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۵ صورت گرفت. سطح معنی‌داری در این مطالعه ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

۳. یافته‌های پژوهشی و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر دانسیته، جذب آب و هدایت حرارتی پانل‌های ساندویچی ساخته شده در جدول ۳ ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، در سطح معنی‌داری ۰/۰۱، به‌جز اثر مستقل نوع هسته بر هدایت حرارتی پانل‌های ساندویچی، اثر مستقل بقیه عوامل متغیر بر دانسیته، جذب آب و هدایت حرارتی معنی‌دار می‌باشند. همچنین در سطح معنی‌داری ۰/۰۱، اثر متقابل عوامل متغیر (نوع هسته×ترکیب هسته)، صرفاً بر جذب آب پانل‌های ساخته شده معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر خواص فیزیکی-حرارتی پانل‌های ساندویچی ساخته شده

منابع تغییرات	درجه آزادی	دانسیته		جذب آب		هدایت حرارتی	
		میانگین مربعات	سطح معنی‌داری	میانگین مربعات	سطح معنی‌داری	میانگین مربعات	سطح معنی‌داری
نوع هسته	۲	۰/۰۰۹**	۰/۰۰۰	۴۴۴/۷۳۹**	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۸۴ ns	۰/۶۰۰
ترکیب هسته	۱	۰/۰۱۵**	۰/۰۰۰	۱۴۹۷/۶۹۸**	۰/۰۰۰	۰/۰۰۴۶۲۳**	۰/۰۰۱
نوع هسته×ترکیب هسته	۲	۷/۹۱۷×۱۰ ^{-۵} ns	۰/۸۳۰	۸۴/۴۰۷**	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۵۵۱ ns	۰/۰۹۲
خطا	۱۸	۰/۰۰۰	-	۱۲/۶۹۳	-	۰/۰۰۰۱۵۲	-
کل	۲۴	-	-	-	-	-	-

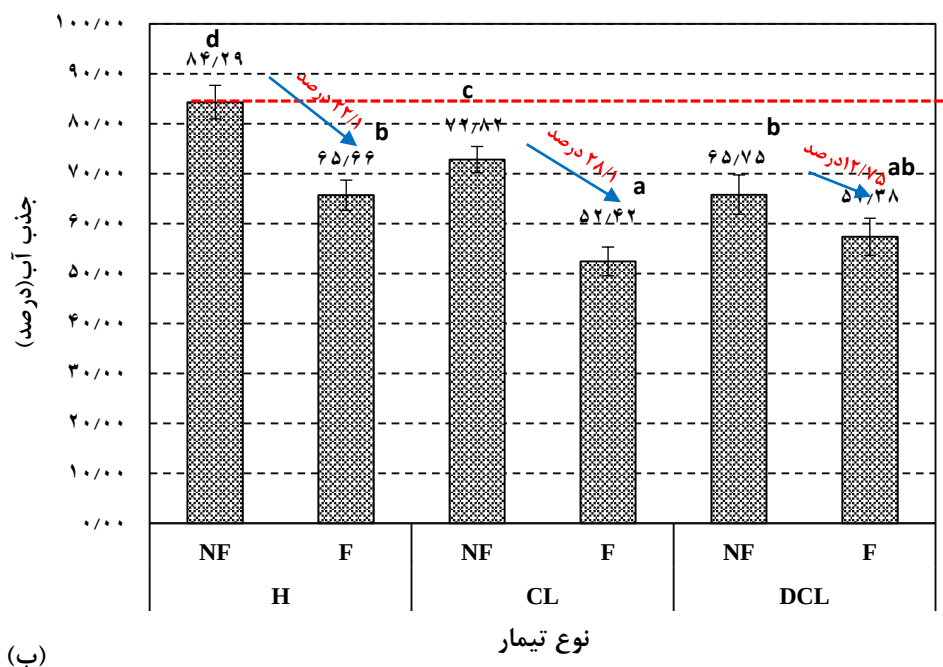
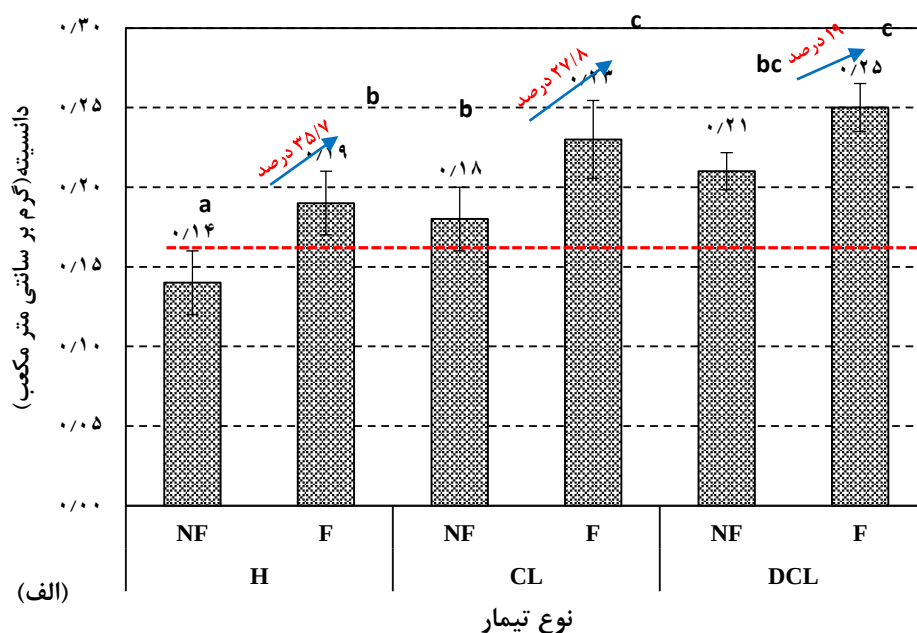
(**): معنی‌داری در سطح ۱ درصد، (*): معنی‌داری در سطح ۵ درصد، (ns): غیر معنی‌دار

۳-۱. دانسیته و جذب آب پانل‌های ساندویچی

اثر عوامل متغیر بر دانسیته و جذب آب پانل‌های ساندویچی ساخته‌شده به‌همراه انحراف معیار داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها در شکل ۵ (الف و ب) ارائه شده است. با توجه به نتایج (شکل ۵-الف)، پانل‌های ساخته شده با هسته مشبک لانه‌زنبوری فاقد فوم (نمونه شاهد) و هسته مشبک ناپیوسته دارای فوم به‌ترتیب کمترین (۰/۱۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب) و بیشترین (۰/۲۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب) مقادیر دانسیته را به‌خود اختصاص دادند. استفاده از فوم پلی‌اورتان و پر شدن شبکه‌ها توسط آن، منجر به افزایش دانسیته پانل‌ها گردید. واضح است که دانسیته لایه میانی، تأثیر عمده‌ای بر دانسیته کلی پانل‌ها داشته و می‌تواند نقش اساسی در تعیین خواص فنی پانل‌های ساندویچی داشته باشد. با توجه به کاربرد پانل‌های ساندویچی، تیمار با دانسیته پایین در مقایسه میانگین‌ها به‌عنوان مطلوب‌ترین تیمار انتخاب شد. طبق استاندارد DIN CEN/TS 16368 [۲۵]، کلیه پانل‌های ساخته شده به‌دلیل داشتن دانسیته زیر ۰/۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب، به‌عنوان پانل‌های سبک طبقه‌بندی می‌شوند و با استفاده از این پانل‌ها می‌توان وزن سازه را به‌میزان قابل توجهی نسبت به مصالح موجود کاهش داد و در نتیجه تأثیر مثبتی در کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز دارد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری جذب آب پانل‌های ساندویچی ساخته‌شده در شکل ۵-ب نشان می‌دهند که پانل‌های دارای هسته مشبک لانه‌زنبوری فاقد فوم به‌عنوان نمونه‌های شاهد دارای بیشترین مقدار جذب آب (۸۴/۳ درصد) و پانل‌های دارای هسته مشبک پیوسته دارای فوم کمترین مقدار جذب آب (۵۲/۵ درصد) را داشته‌اند. با افزایش دانسیته، انتظار می‌رود جذب آب کلی پانل به‌دلیل حضور بیشتر ماده چوبی افزایش یابد، در صورتی که در این تحقیق، روند معکوس و کاهشی مشاهده شد که لازم است در این رابطه به چند نکته توجه داشت. در این پانل‌ها، جذب آب توسط پوسته‌ای از جنس MDF با ضخامت ۳ میلی‌متر که هسته را احاطه کرده

است، شروع می‌شود و این پوسته برای تمام پانل‌ها یکسان می‌باشد و طبق مشاهدات رفتار جذب آب پوسته برای تمام پانل‌ها تقریباً مشابه بوده است، اما افزایش جذب آب پانل‌های دارای هسته لانه‌زنبوری می‌تواند ناشی از جنس کاملاً سلولزی آن (کارتن یا مقوای نازک) باشد که توانسته است در کوتاه‌ترین مدت، بیشترین جذب آب را به همراه داشته باشد، به‌طوری‌که در نمونه‌های حاوی هسته لانه‌زنبوری، گاهی تخریب کامل نمونه‌ها مشاهده گردید. نتایج حاکی از آن است که اضافه کردن فوم پلی‌اورتان به شبکه هسته پانل‌ها منجر به کاهش جذب آب شده است، که ناشی از خاصیت آب‌گریزی فوم پلی‌اورتان مورد استفاده می‌باشد.



شکل ۵. اثر متقابل عوامل متغیر بر الف) دانشیه و ب) جذب آب پانل‌های ساندویچی مختلف
(H=مشبک لانه‌زنبوری، CL=هسته مشبک پیوسته، DCL=هسته مشبک ناپیوسته، NF=بدون فوم و F=با فوم)

۳-۲. خواص حرارتی پانل‌ها

مقادیر میانگین و انحراف معیار مربوط به آزمون هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی هسته‌های: مشبک لانه‌زنبوری، مشبک پیوسته و مشبک ناپیوسته با و بدون فوم در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین مقدار ضریب هدایت حرارتی مربوط به پانل ساندویچی با هسته مشبک پیوسته حاوی فوم به مقدار $0/043$ وات بر مترکلین و بیشترین مقدار در پانل‌های با هسته مشبک پیوسته فاقد فوم به مقدار $0/106$ وات بر مترکلین مشاهده شد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان اظهار داشت که مهمترین عامل در بهبود عایق حرارتی پانل‌های ساندویچی، هیبرید شدن آنها با فوم پلی‌اورتان است که در مقایسه با سایر پانل‌ها برای استفاده در داخل ساختمان به عنوان دیوارهای عایقی-پوششی همراه با روکش‌های تزئینی در دکوراسیون داخلی و پارتیشن‌بندی می‌توانند مناسب و مؤثر باشند. با توجه به مطالعات قبلی صورت گرفته [۲۶-۲۸]، میانگین مقادیر ضریب هدایت حرارتی به دست آمده در دامنه عددی $0/040$ تا $0/080$ وات بر متر کلین گزارش شده است که با استاندارد DIN 4108-4 [۲۹]، مطابقت دارد و نتایج آن مطلوب و مورد تأیید می‌باشد. دمای میانی اندازه‌گیری شده در این مطالعه، 20 درجه سانتی‌گراد بود. استاندارد DIN EN 13171 [۳۰]، اجازه می‌دهد با استفاده از دماهای میانی مختلف، میزان هدایت حرارتی پانل‌ها را دقیق‌تر بررسی کرد که در این پژوهش حدود 10 درجه از دمای اندازه‌گیری متداول در صنعت بیشتر بود. با افزایش دمای میانی می‌توان به میزان بیشتر از هدایت حرارتی دست یافت، که این افزایش مشروط بر این است که دستگاه اندازه‌گیری توانایی آن را داشته باشد [۳۱].

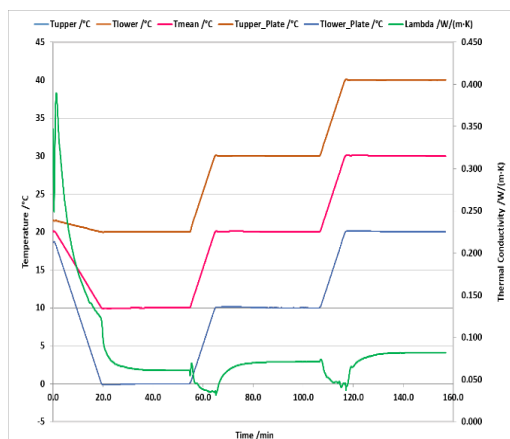
جدول ۴. مقادیر میانگین خواص حرارتی پانل‌های ساندویچی

نوع هسته	ترکیب هسته	هدایت حرارتی (وات بر مترکلین)	مقاومت حرارتی (مترمربع کلین بر وات)
لانه‌زنبوری	بدون فوم	$0/084$ (d)-(0/006)	$0/37$ (d)-(0/07)
	با فوم	$0/047$ (b)-(0/001)	$0/63$ (b)-(0/02)
مشبک پیوسته	بدون فوم	$0/106$ (f)-(0/000)	$0/28$ (f)-(0/0005)
	با فوم	$0/043$ (a)-(0/000)	$0/71$ (a)-(0/008)
مشبک ناپیوسته	بدون فوم	$0/081$ (d)-(0/004)	$0/38$ (d)-(0/07)
	با فوم	$63/064$ (c)-(0/003)	$0/49$ (c)-(0/09)

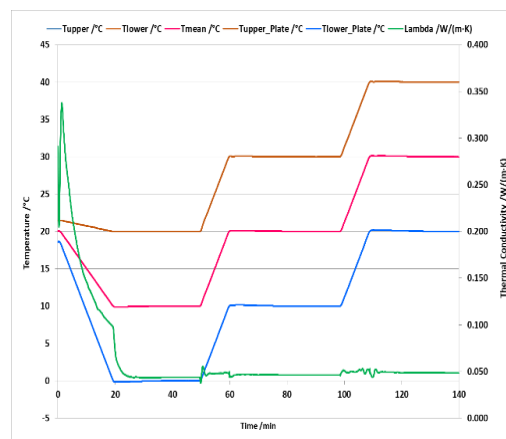
اعداد داخل پرانتز انحراف معیار و گروه بندی میانگین‌ها را نشان می‌دهند.

شکل ۶، تغییرات دما و ضریب هدایت حرارتی (λ) که در طول زمان برای چندین نقطه در یک سیستم حرارتی اندازه‌گیری می‌شود را نشان می‌دهد. هدف از این تحلیل، بررسی رفتار حرارتی اجسام مختلف و تعیین نحوه تغییر ضریب هدایت حرارتی در شرایط مختلف دمایی است که در آن، داده‌هایی برای دمای اجسام و صفحات در تماس با آنها ثبت می‌شود و شامل سه مرحله است: مرحله اول: سرد شدن اولیه (0 تا 20 دقیقه): در ابتدای آزمایش، دمای اجسام Tupper و Tlower افت شدیدی را نشان می‌دهند. این کاهش ناگهانی ناشی از قرار گرفتن اجسام در محیطی با دمای پایین‌تر است. به دنبال آن، ضریب هدایت حرارتی نیز کاهش قابل توجهی را تجربه می‌کند. این رفتار ناشی از انتقال حرارت سریع بین اجسام و محیط اطراف در اثر اختلاف دمای بالا می‌باشد. مرحله دوم: تعادل حرارتی (20 تا 60 دقیقه): در این بازه زمانی، دمای اجسام تقریباً ثابت باقی می‌ماند و سیستم به تعادل حرارتی می‌رسد. در این شرایط، ضریب هدایت حرارتی نیز در محدوده‌ای پایدار قرار می‌گیرد. این پایداری بیانگر آن است که شرایط برای محاسبه دقیق ضریب هدایت حرارتی فراهم شده است. مقدار ضریب هدایت حرارتی در این مرحله می‌تواند با استفاده از قانون هدایت حرارتی فوریه به دست آید.

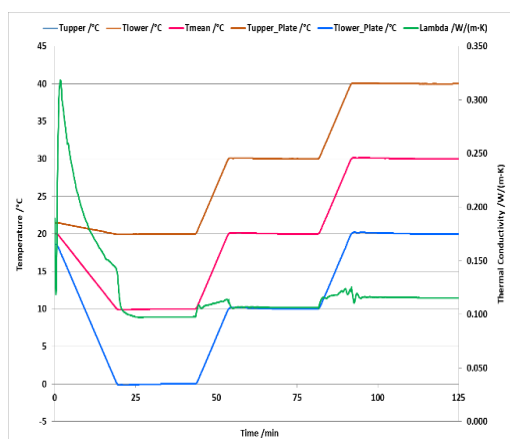
مرحله سوم: افزایش تدریجی دما (۶۰ تا ۱۴۰ دقیقه): پس از مرحله تعادل، دماهای صفحات (Tupper_Plate و Tlower_Plate) به صورت پله‌ای افزایش می‌یابند. این افزایش، به تدریج منجر به بالا رفتن دمای اجسام نیز می‌شود. تغییرات دما با تأخیر و دامنه کمتر در اجسام نسبت به صفحات قابل مشاهده است. در این بازه، مقدار ضریب هدایت حرارتی نیز با نوساناتی جزئی، در همان محدوده قبلی باقی می‌ماند.



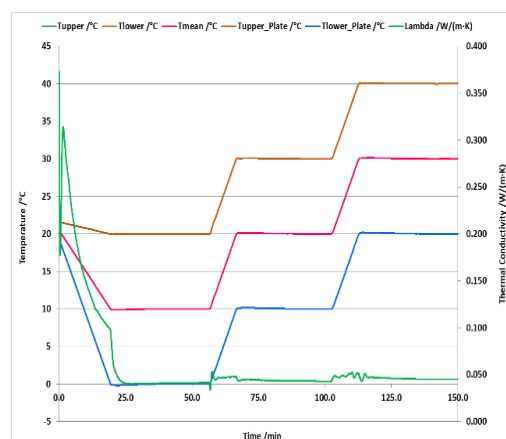
لانه زنبوری فاقد فوم



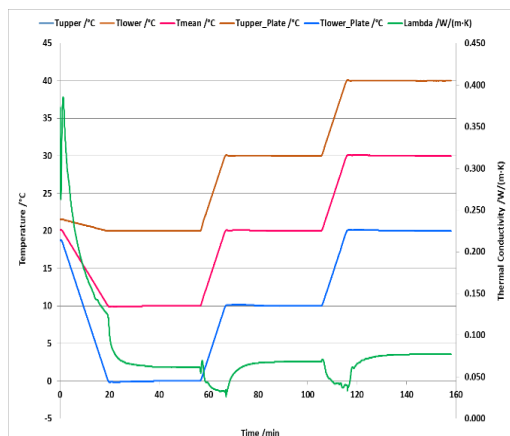
لانه زنبوری دارای فوم



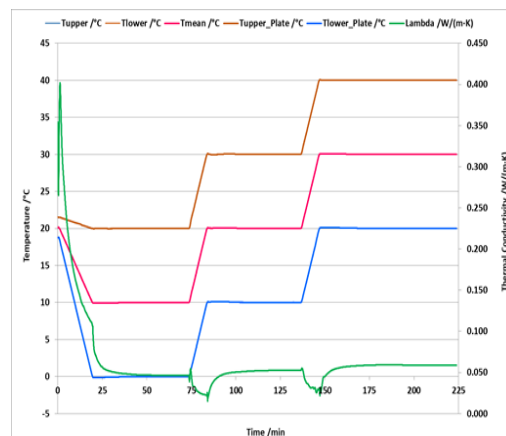
مشبک پیوسته فاقد فوم



مشبک پیوسته دارای فوم



مشبک ناپیوسته فاقد فوم



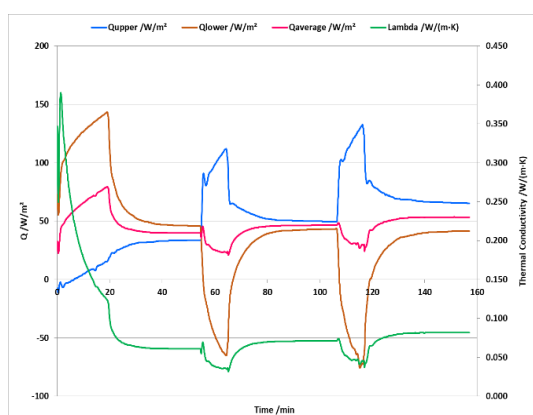
مشبک ناپیوسته دارای فوم

شکل ۶. مقادیر هدایت حرارتی در انواع پانل ساندویچی ساخته شده تحت تأثیر تغییرات دمایی و با گذشت زمان

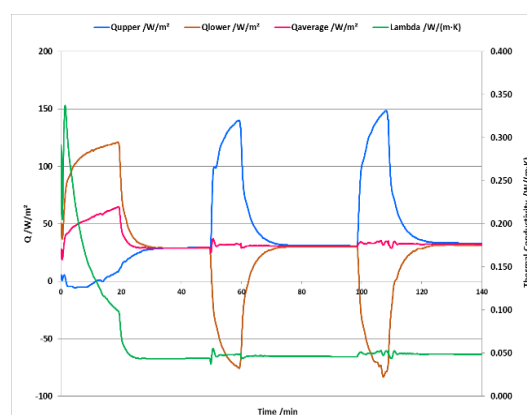
Tupper-Plate: صفحه بالایی، Tlower-Plate: صفحه پایینی، Tmean: دمای میانگین و ضریب هدایت حرارتی برحسب زمان.

محور افقی زمان (دقیقه)، محور عمودی سمت چپ دما (درجه سلسیوس) و محور عمودی سمت راست ضریب هدایت حرارتی (وات بر متر کلوین)

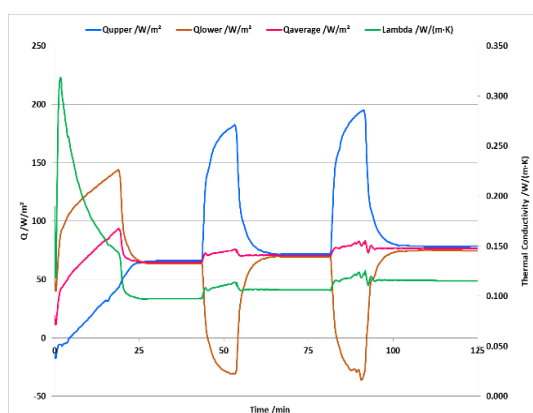
در شکل ۷، تغییرات شار حرارتی (Q) و ضریب هدایت حرارتی (λ) در یک سیستم حرارتی طی ۱۴۰ دقیقه بررسی شده‌اند. نتایج مقدار Q vs. Time نشان می‌دهد که در فاز ابتدایی، شار حرارتی در بخش‌های بالایی Qupper و پایینی Qlower ماده دارای نوسانات شدید است. این رفتار ناشی از تلاش سیستم برای رسیدن به تعادل حرارتی اولیه می‌باشد. در ادامه، با اعمال گرمایش پله‌ای در سه مرحله مجزا، مقادیر Qupper و Qlower به شدت تغییر می‌کنند. Qupper افزایش چشمگیری داشته و Qlower به مقادیر منفی می‌رسد که نشان‌دهنده عبور جریان گرما از بالا به پایین است. با این حال، Qaverage نسبتاً پایدار باقی می‌ماند، که نشان می‌دهد گرما به صورت متوازن در سیستم توزیع شده است. همچنین با توجه به این نمودارها مشخص می‌شود بین ترکیب‌های مختلف هسته، افزودن فوم به ساختارهای مختلف چوبی باعث بهبود قابل توجهی در عملکرد حرارتی می‌شود. به عنوان مثال، در ساختار مشبک پیوسته با فوم، کمترین مقدار هدایت حرارتی (0.043 وات بر مترکلین) و بیشترین مقدار مقاومت حرارتی (0.71 مترمربع کلین بر وات) و در مقابل، ساختار مشبک پیوسته بدون فوم بیشترین هدایت حرارتی (0.106 وات بر مترکلین) و کمترین مقاومت حرارتی (0.28 مترمربع کلین بر وات) را نشان داده است. این اختلاف عملکرد نشان می‌دهد که ترکیب فوم در هسته، با کاهش انتقال حرارت و افزایش مقاومت حرارتی، نقش کلیدی در عملکرد پانل ساندویچی دارد. همچنین در ساختارهای لانه زنبوری و مشبک ناپیوسته نیز روند مشابهی مشاهده شد. هرچند میزان بهبود نسبت به ساختار مشبک پیوسته کمتر بود. نکته مهم در این آزمایش، پایداری ضریب هدایت حرارتی پس از مرحله اول است. با وجود افزایش و کاهش شدید در شار حرارتی، مقدار ضریب هدایت حرارتی پس از ۲۰ دقیقه ابتدایی در حدود 0.15 وات بر مترکلین باقی می‌ماند. این پایداری نشان‌دهنده همگن بودن ماده و عدم وابستگی شدید ضریب هدایت حرارتی به دما در محدوده‌های اعمال شده است. بنابراین جهت انتخاب تیمار بهینه در این نمودارها می‌توان به کمترین میزان هدایت حرارتی که هسته مشبک پیوسته است، اشاره نمود.



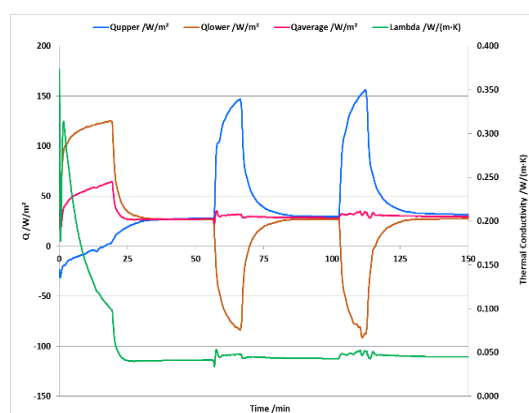
لانه زنبوری فاقد فوم



لانه زنبوری دارای فوم

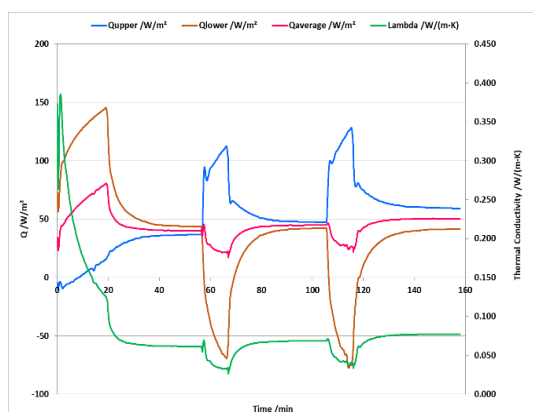


مشبک پیوسته فاقد فوم

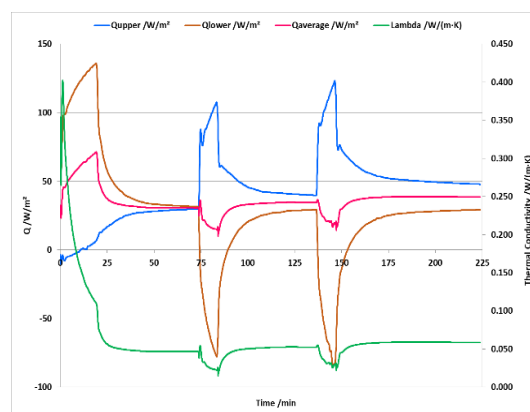


مشبک پیوسته دارای فوم

شکل ۷. مقادیر هدایت حرارتی در انواع پانل ساندویچی ساخته شده تحت تأثیر شار حرارتی و با گذشت زمان



مشبک ناپيوسته فاقد فوم



مشبک ناپيوسته دارای فوم

ادامه شکل ۷.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی پانل‌های ساندویچی با هسته‌های مختلف و ترکیب آنها با فوم پلی‌اورتان مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی‌های انجام شده در پانل‌های ساندویچی فاقد فوم نشان داد، هسته مشبک لانه‌زنبوری (نمونه شاهد)، هسته مشبک پیوسته و هسته مشبک ناپیوسته به ترتیب کمترین تا بیشترین مقادیر دانسیته و بالعکس بیشترین تا کمترین مقادیر جذب آب را به خود اختصاص داده‌اند. براساس استاندارد، تمام پانل‌های ساخته شده در کلاس پانل‌های سبک طبقه‌بندی شدند، به‌طوری‌که با استفاده از این پانل‌ها می‌توان وزن سازه‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش داد. پانل‌های ساندویچی با هسته مشبک پیوسته دارای فوم، به دلیل جذب آب پایین، در کاربردهایی که در معرض رطوبت بالا قرار می‌گیرند، توصیه می‌شوند. نتایج نشان دادند، هدایت حرارتی در هسته‌های فاقد فوم به ترتیب در هسته مشبک ناپیوسته، هسته مشبک لانه‌زنبوری و هسته مشبک پیوسته روند افزایشی داشته است. استفاده از فوم پلی‌اورتان در هسته پانل‌های ساندویچی منجر به افزایش دانسیته و کاهش جذب آب نمونه‌ها شده و تأثیر چشمگیری بر بهبود ویژگی عایق حرارتی پانل‌ها داشت. هسته مشبک پیوسته دارای فوم به عنوان تیمار بهینه جهت استفاده در عایق‌های حرارتی پیشنهاد می‌شوند. همچنین بررسی تغییرات شار حرارتی (Q) و ضریب هدایت حرارتی (λ)، نشانه‌دهنده پایداری این ضریب پس از مرحله اول بوده و با وجود افزایش و کاهش شدید در شار حرارتی، مقدار ضریب پس از ۲۰ دقیقه ابتدایی در حدود ۰/۱۵ وات بر مترکلین باقی ماند که حاکی از همگن بودن ماده و عدم وابستگی شدید این ضریب به دما در محدوده‌های اعمال شده است. همچنین با توجه به استفاده از چوب پائولونیا و فوم پلی‌اورتان در هسته پانل‌های ساندویچی، توصیه می‌شود جنبه‌های محیط‌زیستی و اقتصادی ساخت این پانل‌ها در تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرند.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب رساله دکتری با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشکده منابع طبیعی دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با شماره گرنت ۳۰۵۴۱/۶/۲۶ انجام شده است. با توجه به اینکه بخشی از این تحقیق در گروه بیولوژی چوب دانشگاه جورج آگوست گوتینگن آلمان انجام شده است، بنابراین نویسندگان لازم می‌دانند از کمک‌های علمی و عملی اعضای هیأت علمی و همچنین کارشناسان آن دانشگاه تقدیر و تشکر نمایند.

References

- [1] Ma, Q., Rejab, M.R.M., Siregar, J.P. & Guan, Z. (2021). A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. *Journal of Composite Materials*, 55(18), 2513-2555.

- [2] Brockmann, W., Geiß, P.L., Klingen, J. & Schröder, K.B. (2009). Adhesive bonding: materials, applications and technology. John Wiley & Sons.
- [3] Monteiro, S., Martins, J., Magalhães, F.D. & Carvalho, L. (2017). Lightweight wood composites: challenges, production and performance. In *Lignocellulosic Composite Materials* (pp. 293-322). Cham: Springer International Publishing.
- [4] Ahmad, F., Choi, H.S. & Park, M.K. (2015). A review: natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular Materials & Engineering*, 300(1), 10-24.
- [5] Alavez-Ramirez, R., Chiñas-Castillo, F., Morales-Dominguez, V.J. & Ortiz-Guzman, M. (2012). Thermal conductivity of coconut fiber filled with ferrocement sandwich panels. *Construction & Building Materials*, 37, 425-431.
- [6] Knox, E. M., Cowling, M.J. & Winkle, I.E. (1998). Adhesively bonded steel corrugated core sandwich construction for marine applications. *Marine Structures*, 11(4-5), 185-204.
- [7] Castanie, B., Bouvet, C. & Ginot, M. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access*, 1, 100004.
- [8] Sharma, P. & Kumar, V.R. (2022). Energy analysis in residential buildings for insulation roof material using building information modelling. *Journal of Engineering Research*, 10.
- [9] Yihan, X. U. E. (2016). Review of Thermal Insulation Materials for Pipelines. *Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET)*, 4(5), 258-260.
- [10] Boafu, F.E., Kim, J.H., Ahn, J.G., Kim, S.M., Kim, J.T. & Zhang, L. (2022). Study on thermal characteristics and electrical performance of a hybrid building integrated photovoltaic (BIPV) system combined with vacuum insulation panel (VIP). *Energy & Buildings*, 277, 112574.
- [11] Qi, C., Zhang, F., Mu, J., Zhang, Y. & Yu, Z. (2020). Enhanced mechanical and thermal properties of hollow wood composites filled with phase-change material. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120373.
- [12] Zhang, H., Fang, W.Z., Li, Y.M. & Tao, W.Q. (2017). Experimental study of the thermal conductivity of polyurethane foams. *Applied Thermal Engineering*, 115, 528-538.
- [13] Ahmad, F., Choi, H. S., & Park, M. K. (2015). A review: natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, 300(1), 10-24.
- [14] Critchley, R., Corni, I., Wharton, J A., Walsh, F.C., Wood, R.J. & Stokes, K.R. (2013). A review of the manufacture, mechanical properties and potential applications of auxetic foams. *Physica Status Solidi (b)*, 250(10), 1963-1982.
- [15] Wei, X., Xiong, J., Wang, J. & Xu, W. (2020). New advances in fiber-reinforced composite honeycomb materials. *Science China Technological Sciences*, 63(8), 1348-1370.
- [16] Harikrishnan, G. (2007). Polyurethane foams: processing and material development (Doctoral dissertation, Indian Institute of Technology, Bombay (India)).
- [17] Pau, D.S.W., Fleischmann, C.M., Spearpoint, M.J. & Li, K.Y. (2014). Thermophysical properties of polyurethane foams and their melts. *Fire & Materials*, 38(4), 433-450.
- [18] Fan, H., Tekeci, A., Suppes, G.J. & Hsieh, F.H. (2012). Physical properties of soy- phosphate polyol- based rigid polyurethane foams. *International Journal of Polymer Science*, 2012(1), 907049.
- [19] Brinker, S., Ahrens, C., Gurnik, M., Mayer, A.K. & Mai, C. (2025). Influence of screened fibre fractions on the properties of insulation panels made of different wood species. *Wood Material Science & Engineering*, 1-11.
- [20] ASTM International. (1932). Standard test methods of evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials (ASTM D1037-32). ASTM International.
- [21] ASTM International. (2016). Standard test method for density of sandwich core materials (ASTM C271/C271 M-16). ASTM International.
- [22] ASTM International. (2024). Standard Test Method for Water Absorption of Core Materials for Sandwich Constructions. (ASTM C272/C272 M-18). ASTM International.

- [23] Deutsches Institut für Normung. (2001). Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Products of high and medium thermal resistance (DIN EN 12667:2001). Beuth Verlag.
- [24] ASTM International. (2021). A standard test method for steady-state thermal transmission properties is by means of the heat flow meter apparatus (ASTM C518-21). ASTM International.
- [25] Deutsches Institut für Normung. (2012). Characterization of waste – Leaching behaviour test cases (DIN CEN/TS 16368:2012). Beuth Verlag.
- [26] Brombacher, V. (2015). Untersuchungen zur Optimierung von Holzfaserdämmstoffen in Abhängigkeit von Rohstoff, Herstellverfahren und Aufschlussbedingungen (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- [27] Imken, A.A., Plinke, B. & Mai, C. (2021). Characterisation of hardwood fibres used for wood fibre insulation boards (WFIB). *European Journal of Wood & Wood Products*, 79, 915-924.
- [28] Park, B.D., Kim, Y.S. & Riedl, B. (2001). Effect of wood-fiber characteristics on medium density fiberboard (MDF) performance. *Journal of the Korean Wood Science & Technology*, 29(3), 27-35.
- [29] Deutsches Institut für Normung. (2020). Thermal insulation and energy economy in buildings – Part 4: Thermal and moisture protection values for building materials and products (DIN 4108-4:2020). Beuth Verlag.
- [30] Thermal insulation products for buildings - Factory-made wood fibre (WF) products - Specification; German version EN 13171:2012+A1:2015
- [31] Imken, A.A., Kraft, R. & Mai, C. (2022). Production and characterization of wood-fibre insulation boards (WFIB) from hardwood fibers and fibre blends. *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 802-808.