



University of Tehran

Investigation of mechanical and physical properties of mycelium-based biocomposites from *Fomes fomentarius* using different lignocellulosic substrates

Razieh Shamsi^{1*} | Ali Bayatkashkoli² | Saeid-Reza Farukhpayam³ | Ali Abdolkhani⁴ | Mohsen Shahriari Moghadam⁵

1. Corresponding Author, Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: springwood07@yahoo.com
2. Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: ali.bayatkashkoli@uoz.ac.ir
3. Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: farokhpayam@uoz.ac.ir
4. Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: abdolkhani@ut.ac.ir
5. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: shahriari@uoz.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 24 March 2025
Revised: 25 June 2025
Accepted: 03 July 2025
Published online: 16 September 2025

Keywords:
Fungal mycelium,
Fomes fomentarius,
Lignocellulosic substrate,
Mechanical and physical properties,
Mycelium biocomposite.

ABSTRACT

Mycelium-based biocomposites have attracted significant attention from researchers and industries as sustainable alternatives to traditional composites due to their environmental compatibility, biodegradability, and low production costs. This study investigates the effects of different lignocellulosic substrates—cotton stalks, wheat straw, and beech wood waste—on the mechanical and physical properties of mycelium-based biocomposites produced with the fungus *Fomes fomentarius*. The production process involved substrate inoculation with fungal mycelium, incubation under controlled conditions, and hot/cold pressing to form dense structures. Physical (water absorption, thickness swelling) and mechanical tests (bending strength, bending modulus of elasticity, internal bonding strength) were conducted in accordance with EN standards. Results showed that the cotton stalk biocomposite, with the highest aspect ratio (54.78) and specific surface area of particles, formed a more continuous network of fungal hyphae, resulting in adequate bending strength (6.26 MPa), bending modulus of elasticity (1.3 GPa), and internal bonding strength (0.2 MPa). In contrast, the beech wood waste biocomposite showed the lowest mechanical performance due to high particle thickness and larger structural pores. Water absorption and thickness swelling were influenced by substrate hydrophilicity and structural density: wheat straw biocomposite had the highest water absorption (77.92%), while beech wood waste had the lowest (54.44%). This study highlights that selecting substrates with optimal physicochemical properties is crucial for optimizing the performance of mycelium-based composites. However, further interdisciplinary research is needed to enhance resistance and expand industrial applications of these biodegradable materials.

Cite this article: Shamsi, R., Bayatkashkoli, A., Farukhpayam, S.R., Abdolkhani, A., Shahriari Moghadam, M. (2025). Investigation of mechanical and physical properties of mycelium-based biocomposites from *Fomes fomentarius* using different lignocellulosic substrates. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (2), 133-145. DOI: <http://doi.org/10.22059/JFWP.2025.392475.1342>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/JFWP.2025.392475.1342>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی بایوکامپوزیت‌های میسلومی قارچ *Fomes fomentarius* با استفاده از بسترهای لیگنوسلولزی مختلف

راضیه شمسی^{۱*} | علی بیات کشکولی^۲ | سعیدرضا فرخ‌پیام^۳ | علی عبدالخانی^۴ | محسن شهریاری مقدم^۵

۱. نویسنده مسئول، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: springwood07@yahoo.com

۲. گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: ali.bayatkashkoli@uoz.ac.ir

۳. گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: farrokhpayam@uoz.ac.ir

۴. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: abdolkhani@ut.ac.ir

۵. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: shahriari@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

کلیدواژه‌ها:

بایوکامپوزیت میسلومی،

بستر لیگنوسلولزی،

خواص مکانیکی و فیزیکی،

Fomes fomentarius

میسلوم قارچ.

کامپوزیت‌های میسلومی به‌عنوان جایگزینی سازگار با محیط‌زیست، تجزیه‌پذیر و کم‌هزینه برای کامپوزیت‌های سنتی، مورد توجه صنعت و پژوهش قرار گرفته‌اند. این مطالعه، با هدف تحلیل تأثیر سه بستر لیگنوسلولزی متفاوت شامل ساقه پنبه، کاه گندم و ضایعات چوب راش بر خواص فیزیکی و مکانیکی بایوکامپوزیت‌های تولیدشده با قارچ *Fomes fomentarius* انجام شد. فرایند تولید شامل تلقیح بسترها با میسلوم قارچ، انکوباسیون در شرایط کنترل‌شده و پرس گرم و سرد برای ایجاد ساختار متراکم بود. آزمون‌های فیزیکی (جذب آب، واکنشیدگی ضخامت) و مکانیکی (مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته خمشی، چسبندگی داخلی) مطابق استانداردهای EN انجام شد. نتایج نشان داد بایوکامپوزیت خرده‌ساقه پنبه با دارا بودن بالاترین ضریب کشیدگی (۵۴/۷۸) و سطح ویژه بالاتر ذرات، شبکه پیوسته‌تری از ریشه‌های قارچ تشکیل داد که منجر به ایجاد مقاومت خمشی (۶/۲۶ مگاپاسکال)، مدول الاستیسیته خمشی (۱/۳۱ گیگاپاسکال) و چسبندگی داخلی (۰/۲۱ مگاپاسکال) مناسب شد. در مقابل، بایوکامپوزیت چوب راش به دلیل ضخامت بالای ذرات و حفرات ساختاری بزرگ، کمترین مقاومت مکانیکی را نشان داد. جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نیز تحت تأثیر ماهیت آبدوستی بسترها و تراکم ساختاری قرار گرفت و بایوکامپوزیت کاه گندم با جذب آب ۷۷/۹۲ درصدی، بالاترین و بایوکامپوزیت چوب راش با ۵۴/۴۴ درصدی، کمترین مقدار را ثبت کردند. واکنشیدگی ضخامت نیز روند مشابهی داشت. یافته‌ها تأکید می‌کنند انتخاب بستر با ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی مطلوب، نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد کامپوزیت‌های میسلومی دارد. با وجود نتایج امیدوارکننده، تحقیقات بین رشته‌ای بیشتری برای بهبود مقاومت‌ها و گسترش کاربردهای صنعتی این مواد زیست‌تخریب‌پذیر نیاز است.

استناد: شمسی، راضیه، بیات کشکولی، علی، فرخ‌پیام، سعیدرضا، عبدالخانی، علی، شهریاری مقدم، محسن (۱۴۰۴). بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی بایوکامپوزیت‌های میسلومی

قارچ *Fomes fomentarius* با استفاده از بسترهای لیگنوسلولزی مختلف. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۲)، ۱۴۵-۱۳۳.

DOI: <https://10.22059/JFWP.2025.392475.1342>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/JFWP.2025.392475.1342>



۱. مقدمه

بایوکامپوزیت‌های میسلومی نوع جدیدی از مواد هستند که از سال ۲۰۰۷، به‌عنوان اختراع در ایالات متحده آمریکا گزارش شده‌اند [۱]. با وجود اینکه تقریباً تمامی اجزای این نوع کامپوزیت‌ها تجزیه‌پذیر هستند، تولید آنها در گذشته به‌ندرت صورت می‌گرفت ولی در دهه گذشته به‌شدت مورد توجه محققان و صنایع قرار گرفته است. افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، یکی از دلایل اصلی رشد تولید و بازار این نوع محصولات محسوب می‌شود. بایوکامپوزیت‌های میسلومی، تولید آسان و دسترسی گسترده‌ای به مواد اولیه دارند و هزینه تولید آنها یک به هشتاد کامپوزیت‌های سنتی است [۲]. در مقایسه با تخته‌لایه، مواد مبتنی بر گچ، تخته‌گچ و همچنین کامپوزیت‌های پلیمری، بیش از ۹۰ درصد در هزینه‌های تولید صرفه‌جویی می‌کند و با مواد سیمانی قابل مقایسه است [۳].

از آنجا که چسب‌های معمول مورد استفاده در کامپوزیت‌های لیگنوسلولزی، مانند چسب اوره فرمالدئید با انتشار فرمالدئید برای سلامت انسان و محیط‌زیست مضر هستند، استفاده از چسب‌های زیستی مانند لیگنین، نشاسته، پروتئین، تانن و غیره برای کامپوزیت، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است ولی با توجه به هزینه نسبی بالا در مقایسه با چسب سنتی اوره فرمالدئید، تنها تعداد محدودی چسب زیستی عملاً مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. از این‌رو، یکی از منابع کاربردی پیشنهادی جهت اتصال خرده‌های چوبی و مواد لیگنوسلولزی، میسلوم قارچ می‌باشد. میسلوم به‌دلیل ساختار پیچیده و شبکه‌ای میسلوم و سطح ویژه بسیار بالا، به‌عنوان بایوچسب به خرده‌های بسترهای آلی مختلف می‌چسبد و شبکه‌ای متراکم تشکیل می‌دهد [۵]. دیواره سلولی قارچ‌ها از پلی‌ساکاریدهای فیبری (بتا-گلوکان‌ها و کیتین) تشکیل شده‌اند که به‌عنوان اسکلت باربر عمل می‌کنند و نقش مهمی در ساختار و ایجاد استحکام و انعطاف‌پذیری دیواره سلولی دارند و نیز باعث مقاومت میسلوم در برابر فشارهای داخلی و خارجی می‌شوند [۶].

در عین حال، کامپوزیت‌های میسلومی، ایمنی بسیار قابل اعتمادی دارند [۷] و با قارچ‌های خوراکی قابل مقایسه هستند [۳]. با توجه به اینکه بسترها از لیگنین، سلولز و همی‌سلولز تشکیل شده‌اند، قارچ مورد استفاده باید بتواند تمام این اجزای فیبری را به سرعت هضم کند. قارچ‌های پوسیدگی سفید، گروهی از قارچ‌های چوب هستند که به‌طور خاص برای این کار مناسب هستند [۸]. توانایی قارچ‌های پوسیدگی سفید برای تجزیه و تبدیل بسترهای لیگنوسلولزی به مواد کامپوزیتی، در طبیعت منحصربه‌فرد است. از جمله آنها، قارچ بازیدیومیست *Fomes fomentarius* است که مقاومت فشاری و خمشی نسبتاً خوبی ایجاد می‌کند [۹]. محققین معتقدند که قارچ‌های پوسیدگی سفید از طریق آنزیم‌های اکسیداتیو لیگنین که در مرحله اولیه کلونیزاسیون^۱ ترشح می‌شوند، با ایجاد رادیکال‌های لیگنین بر روی سطح ذرات، باعث بهبود پیوند در طی پرس گرم می‌شوند [۱۰]. همچنین سرعت رشد و تکثیر ریشه‌های آن متوسط است ولی سرعت بالایی در تجزیه بسترهای زیستی دارد [۱۱]. به‌طور کلی، قارچ‌ها منبع طبیعی و تجدیدپذیر پلیمرهای ساختاری با ارزشی مانند کیتین و کیتوزان هستند. دیواره‌های سلولی قارچ‌ها در ریشه‌ها وجود دارد و در کنار یکدیگر میسلوم را تشکیل می‌دهند که شامل یک شبکه فیبری ضخیم و پیچیده از کیتین و سایر پلی‌ساکاریدها مانند گلوکان‌ها، مانوپروتئین‌ها، کیتوزان، پلی‌گلوکورونیک اسید و غیره می‌باشد [۱۲]. این اجزا باعث می‌شوند که میسلوم خواص مکانیکی معمول مانند چوب و چوب پنبه را بروز دهد. هنگامی که یک بستر با قارچ تلقیح می‌شود، میسلوم از طریق ترشح آنزیم‌هایی مانند لاکاز، لیگنین پراکسیداز و منگنز پراکسیداز که حاوی رادیکال‌های آزاد زیادی هستند، با هضم مواد مغذی، حاوی کربن و نیتروژن، رشد می‌کند [۱۳]. در این فرآیند، میسلوم با رشد مداوم، متراکم‌تر و با نفوذ در ذرات چوب یا مواد لیگنوسلولزی سبب اتصال این بستر نیمه‌تخریب‌شده به یکدیگر و تشکیل بایوکامپوزیت می‌شود.

در واقع کامپوزیت میسلومی، حاصل تعامل دقیق دو فاز بستر و میسلوم قارچ است که هر کدام در تعیین موفقیت و ویژگی‌های این بایوکامپوزیت نقش حیاتی دارند. براساس پژوهش‌های انجام شده، ظرفیت باربری، مقاومت‌های مکانیکی و دوام نهایی کامپوزیت میسلومی شدیداً به نوع بسترهای مورد استفاده بستگی دارد [۱۴]. بسترهای لیگنوسلولزی، حدود ۹۵ درصد وزنی بایوکامپوزیت میسلومی را تشکیل می‌دهند [۱۵]. هر چه محیط کشت (بسترهای لیگنوسلولزی) ساده‌تر و ارزان‌تر باشد (بدون ترکیبات خاص، فاکتورهای رشد یا مواد مغذی گران‌قیمت)، هزینه‌های نهایی کمتر است. به‌همین دلیل، مهم است که سویه قارچ انتخاب‌شده روی بستر بسیار ارزان و ساده رشد کند [۱۶]. در پرورش قارچ و ساخت بایوکامپوزیت‌های میسلومی، عمدتاً از ترکیبات شیمیایی

¹Colonization

ارزان قیمت مانند کربنات کلسیم به میزان یک درصد وزن خشک بستر جهت تنظیم pH محیط و قلیایی کردن بهتر بسترها، جهت نفوذ میسلیوم قارچ [۱۷]، سولفات کلسیم به میزان یک درصد وزن خشک بستر برای جلوگیری از ایجاد شرایط بی‌هوای از طریق جذب بیش از حد آب و تنظیم pH بستر [۱۸] استفاده می‌شود. این نوع بایوکامپوزیت در حال ظهور، با استحکام قابل مقایسه با فوم‌ها و ذرات پلی‌استایرن، به‌عنوان جایگزین زیست‌تخریب‌پذیر برای آنها و سایر پلاستیک‌های مورد استفاده در بسته‌بندی، کاربرد دارد [۱۷]. همچنین، در این راستا، مواد مبتنی بر میسلیوم، به‌عنوان فیلتر میسلیومی برای تصفیه ذرات معلق موجود در هوا و فلزات سنگین، عایق حرارتی و آکوستیک، جایگزینی برای مصالح ساختمانی مرسوم و هسته درب‌های داخلی ساختمان [۱۹]، می‌تواند راه‌حل مناسبی برای استفاده‌های متفاوت، خصوصاً در حوزه ساخت‌وساز باشند.

کامپوزیت‌های میسلیومی مزایای بسیار زیادی دارند و فناوری بایو مواد، با بهره‌گیری از فرآیندهای بیولوژیکی و منابع تجدیدپذیر، راه‌حلی نویدبخش و چندوجهی در مواجهه با چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مرتبط با مواد سنتی ارائه می‌دهد [۲۰]. موفقیت و مقیاس‌پذیری تجاری آنها مستلزم تحقیقات مستمر در زمینه بهینه‌سازی انتخاب سوبه‌های قارچی، ترکیب بستر، فرآیند تولید و درک عمیق‌تر روابط ساختار-خاصیت در این سیستم‌های بیولوژیکی پیچیده است.

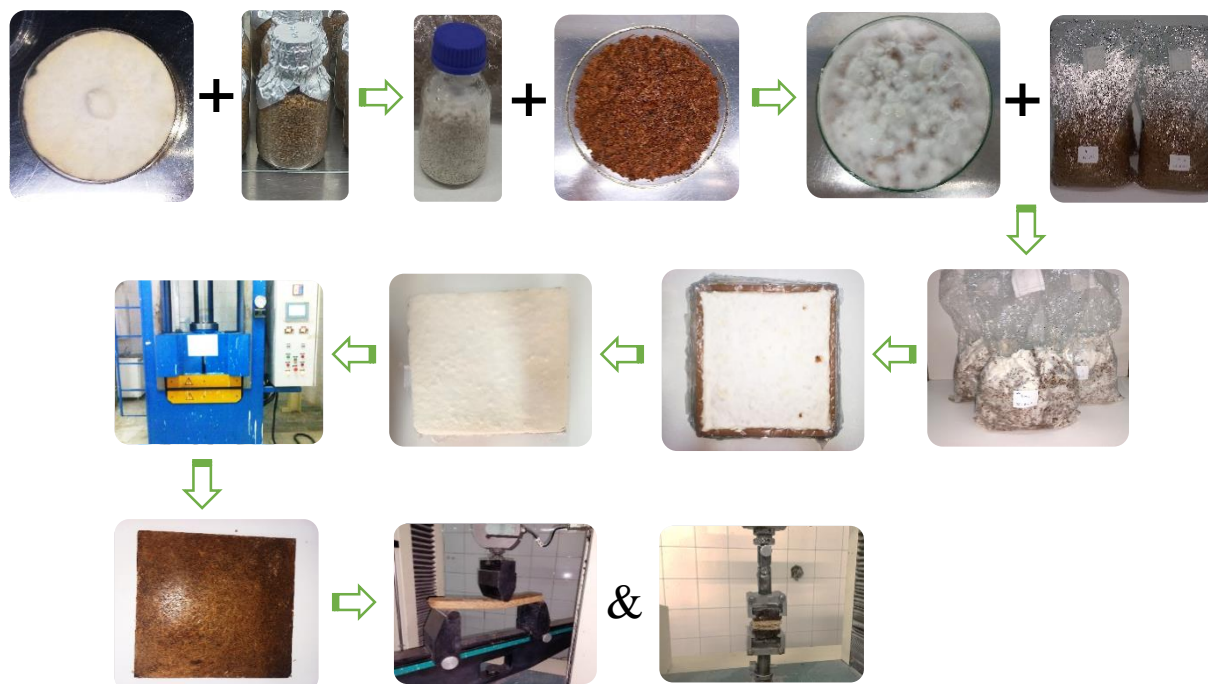
بنابراین در این پژوهش نیز تلاش شد به‌جای رزین‌های صنعتی آلوده‌کننده محیط‌زیست، میسلیوم قارچ *F. fomentarius*، به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده طبیعی خرده‌های لیگنوسلولزی جایگزین شود. همچنین تأثیر استفاده از بسترهای لیگنوسلولزی با ویژگی‌های متفاوت بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این بایوکامپوزیت سبک‌وزن، مورد بررسی قرار گرفت.

۲. روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، سه نوع بستر لیگنوسلولزی مورد استفاده قرار گرفت: کاه گندم، ساقه پنبه و ضایعات منبت‌کاری راش. بسترها با استفاده از آسیاب آزمایشگاهی به خرده‌هایی با ابعاد میانگین ۱۷/۲۵ تا ۲۲/۴۶ میلی‌متری تبدیل شدند. میسلیوم قارچ *F. fomentarius* از مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران با کد BRC-M ۳۰۴۲۷ خریداری و در محیط کشت سیب‌زمینی دکستروز آگار (PDA) تلقیح و تکثیر شد. در مرحله اول، آماده‌سازی انتقال میسلیوم قارچ از بستری غنی از مواد غذایی PDA به بسترهای لیگنوسلولزی با سطوح پایین‌تر مواد مغذی انجام شد و در مرحله دوم با استفاده از چند برش کوچک (کمتر از یک سانتی‌متر مربع) از میسلیوم قارچ همراه با محیط کشت PDA، میسلیوم به روی ارزن منتقل شد و به مدت ۱۰ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۶۵ درصد انکوبه شد. در گام بعد، دانه‌های ارزن تلقیح‌شده با میسلیوم (اسپان) به ۱۰ درصد از خرده‌های بسترهای لیگنوسلولزی (در پلیت‌های شیشه‌ای با قطر ۱۵ سانتی‌متر) منتقل و مانند شرایط مرحله قبل، انکوبه شدند. پس از پر شدن کامل حجم ۱۰ درصدی بسترها توسط میسلیوم قارچ، به بسترهای از پیش پخته و استریل‌شده (جوشانیدن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد اتوکلاو شده)، کاه گندم، ساقه پنبه و ضایعات منبت‌کاری چوب راش اضافه شد. سپس این بسترها، با مکمل‌های شیمیایی مانند کربنات کلسیم و سولفات کلسیم (یک درصد وزن خشک بستر) مخلوط و در نایلون‌های مناسب بسته‌بندی گردیدند و به مدت یک هفته در شرایط دمایی و رطوبتی ذکر شده، انکوبه شدند. بسترهای پر شده با میسلیوم پس از تبدیل شدن به تکه‌های کوچک به‌صورت دستی، به قالب‌های استریل با ابعاد ۸×۳۰×۳۰ سانتی‌متر مکعب منتقل شدند تا امکان رشد نهایی به مدت زمان یک هفته فراهم شود. الگوی تصویری مراحل ساخت و آزمون نمونه‌ها، در شکل یک نشان داده شده است.

قالب‌ها پس از یک هفته، با تشکیل کیک میسلیومی تقریباً یکنواخت و پرکردن کامل بسترها، باز شد و تخته‌های آماده‌شده با دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۶۰ بار به مدت ۶ دقیقه پرس شد. برای جلوگیری از متلاشی شدن تخته‌ها به مدت ۳ ساعت در پرس دستی تحت فشار قرار گرفتند و به مدت یک هفته در دمای اتاق نگهداری گردیدند. بعد از برش نمونه‌های آزمونی، مطابق استاندارد EN 326-1، آزمون‌های فیزیکی شامل درصد جذب آب و درصد واکنشیدگی ضخامت پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب (EN 317) و آزمون‌های مکانیکی شامل مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی (EN 317)، مقاومت چسبندگی داخلی (EN 319)، انجام شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی ارائه‌شده در این پژوهش، از سطح شکست نمونه‌های آزمون مقاومت خمشی با استفاده

از دستگاه پیشرفته میکروسکوپ الکترونی FESEM مدل EM-8000F ساخت شرکت KYKY تهیه شده‌اند. آنالیز حرارتی توسط دستگاه آنالیز حرارتی مدل PT 1600 STA ساخت شرکت LINSEIS کشور آلمان انجام گرفت. داده‌های حاصل از این آنالیز برای بررسی پایداری حرارتی و رفتار گرمایی مواد مورد مطالعه، استفاده شد. آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) با دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه Bruker مدل TENSOR 27 انجام شده است. نتایج حاصل از این آنالیز برای مطالعه ساختار مولکولی و شناسایی ترکیبات شیمیایی مواد مورد بررسی، به کار گرفته شد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار SPSS 26، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه در سطح اطمینان ۹۹ درصد و در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل با سه تکرار انجام شد و میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن تفکیک و ارزیابی شدند.



شکل ۱. الگوی تصویری مراحل ساخت و آزمون بایوکامپوزیت‌های میسلیمی

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

با توجه به جدول یک، حداکثر میانگین مقاومت خمشی به بایوکامپوزیت حاوی خرده‌ساقه پنبه با مقدار عددی ۶/۲۶ مگاپاسکال و پایین‌ترین مقدار میانگین به بایوکامپوزیت حاوی خرده چوب راش (۲/۳۵ مگاپاسکال) تعلق دارد (جدول ۱).

جدول ۱. میانگین (انحراف معیار) و گروه‌بندی دانکن مقاومت‌های مکانیکی و فیزیکی بایوکامپوزیت‌ها

نمونه	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)**	مدول الاستیسیته خمشی (گیگاپاسکال)	چسبندگی داخلی (مگاپاسکال)**	جذب آب ۲۴ ساعت (درصد)*	واکشی‌دگی ضخامت ۲۴ ساعت (درصد)*
بایوکامپوزیت خرده‌چوب راش	۲/۳۵(±۰/۴۳) ^c	۰/۹۲(±۰/۱۰)	۰/۱۵(±۰/۰۰۹) ^c	۵۴/۴۵(±۵/۰۷) ^a	۱۹/۶۶(±۳/۵۶) ^a
بایوکامپوزیت خرده‌ساقه پنبه	۶/۲۶(±۰/۶۵) ^a	۱/۳۱(±۰/۱۷)	۰/۲۱(±۰/۰۰۲) ^a	۶۹/۴۱(±۱۰/۶۶) ^b	۳۰/۵۸(±۳/۱۹) ^b
بایوکامپوزیت خرده‌کاه گندم	۵/۰۳(±۰/۴۴) ^b	۱/۲۹(±۰/۲۳)	۰/۱۹(±۰/۰۱) ^b	۷۷/۹۲(±۵/۴۵) ^c	۳۵/۷۶(±۷/۱۰) ^b

در سطح ۹۹ درصد (**) و در سطح ۹۵ درصد (*) معنی‌دار است و مقایسه میانگین‌ها با روش دانکن با حروف انگلیسی مشخص شده است.

براساس نتایج جدول ۲، ضریب کشیدگی خرده‌های ساقه پنبه از سایر خرده‌ها بیشتر است، در نتیجه خرده‌های با ضریب کشیدگی بالاتر، شبکه‌ای قوی و پیوسته در ساختار کامپوزیت تشکیل می‌دهند [۲۱]. خرده‌های ساقه پنبه، سطح ویژه بالاتری نیز دارند که باعث افزایش سطح تماس ذرات با یکدیگر و با ماتریس میسلومی می‌شود. به دنبال آن، افزایش قابل توجه پیوندهای شیمیایی و فیزیکی بین آنها، سبب توزیع یکنواخت‌تر تنش در ساختار بایوکامپوزیت و افزایش مقاومت مکانیکی، از جمله مقاومت خمشی می‌گردد [۲۲].

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی بسترهای لیگنوسلولزی و بایوکامپوزیت‌های میسلومی

نمونه	میانگین ضریب کشیدگی	میانگین طول (میلی‌متر)	میانگین ضخامت (میلی‌متر)	دانسیته اولیه (اسمی) بایوپنل (گرم/سانتی‌متر مکعب)	دانسیته ثانویه بایوپنل (گرم/سانتی‌متر مکعب)
بایوکامپوزیت ساقه پنبه	۵۴/۷۸	۲۲/۴۶	۰/۴۱	۰/۶۰	۰/۴۸
بایوکامپوزیت کاه گندم	۲۹/۷۴	۱۷/۲۵	۰/۵۸	۰/۶۰	۰/۵۱
بایوکامپوزیت خرده چوب راش	۶/۶۵	۱۸/۱۹	۲/۷	۰/۶۰	۰/۵۵

از طرف دیگر، دانسیته اسمی بایوکامپوزیت‌ها و دانسیته آنها بعد از رشد میسلوم بر روی بسترها (ثانویه) در جدول ۲ نشان می‌دهد که بیشترین کاهش دانسیته ثانویه، به ترتیب به بایوکامپوزیت خرده ساقه پنبه، بایوکامپوزیت خرده کاه گندم و بایوکامپوزیت خرده چوب راش تعلق دارد. کاهش ماده آلی بسترهای لیگنوسلولزی از طریق تخریب آنزیمی مواد آلی و از دست دادن CO₂ و H₂O در طول متابولیسم و توسعه میسلوم است [۲۳]. مصرف هر چه بیشتر ترکیبات بستر لیگنوسلولزی توسط میسلوم قارچ در بایوکامپوزیت خرده ساقه پنبه که با نتایج به دست آمده از آنالیز TGA مطابقت دارد، سبب تشکیل یک شبکه پیوند هیدروژنی ترکیبی در ناحیه سطحی، افزایش پیوندهای فیزیکی و شیمیایی بین آنها و در نتیجه افزایش مقاومت خمشی بایوکامپوزیت می‌شود.

بایوکامپوزیت خرده ساقه پنبه و خرده کاه گندم (به ترتیب ۱/۳۱ و ۱/۲۹ گیگاپاسکال)، بالاترین و بایوکامپوزیت خرده چوب راش (۰/۹۲ گیگاپاسکال)، پایین‌ترین میانگین مدول الاستیسیته خمشی را داشتند که تقریباً معادل ۱/۴۲-۱/۴۰ برابر مدول الاستیسیته بایوکامپوزیت خرده چوب راش است (جدول ۱). هر چند چوب راش به طور طبیعی دارای مدول الاستیسیته بالایی است، اما ضریب کشیدگی پایین خرده‌های ضایعات منبت کاری راش در این پژوهش سبب ایجاد اتصال ضعیف میسلوم قارچ و بستر می‌شود. همچنین وجود منافذ نسبتاً بزرگ به علت ضخامت بالای (۲/۷ میلی‌متر) خرده‌های چوب راش، مانع انتقال مؤثر نیروی تنش در بایوکامپوزیت می‌شود. در مقابل خرده‌های ساقه پنبه بالاترین ضریب کشیدگی (۵۴/۷۸) و به دنبال آن بالاترین سطح ویژه را در بین بسترها داشتند و در رتبه بعدی خرده‌های کاه گندم دارای همپوشانی خوبی بودند. در واقع مدول الاستیسیته خمشی، بر چگونگی واکنش مواد به نیروهای خارجی و توزیع تنش در سطح چسبندگی بین ماتریس و ذرات تأثیر می‌گذارد [۲۴]. مدول الاستیسیته خمشی بایوکامپوزیت‌ها، ارتباط نزدیکی با وضعیت رشد ریشه‌های قارچ دارد [۲۵]. به این ترتیب، براساس نتایج حاصل از این پژوهش، فعل و انفعال بین سطح اتصال میسلوم قارچ و ذرات بسترهای لیگنوسلولزی به شدت متأثر از میزان دسترسی ریشه‌های قارچ به لیگنین و پلی‌ساکاریدهای ذرات بستر می‌باشد.

بسترهایی با سازگاری بالاتر با رشد قارچ، منجر به پیوندهای قوی‌تر می‌شوند که به نوبه خود مدول الاستیسیته خمشی و عملکرد کلی کامپوزیت را افزایش می‌دهند [۲۶]. سطح چسبندگی بین خرده‌ها و ماتریس در تعیین مدول الاستیسیته بسیار مهم است و چسبندگی بهتر، معمولاً منجر به افزایش بازدهی انتقال بار بین اجزای کامپوزیت می‌شود [۲۴، ۲۷]. پس قطعاً وجود شبکه‌ای متراکم از ریشه‌های ضخیم‌تر (به ترتیب در بایوکامپوزیت‌های خرده ساقه پنبه و خرده کاه گندم) در کنار سایر عوامل مؤثر، نقش به سزایی در افزایش و بهبود مدول الاستیسیته بایوکامپوزیت‌های مذکور دارد.

با توجه به جدول ۱، حداکثر میانگین چسبندگی داخلی به بایوکامپوزیت خرده ساقه پنبه (۰/۲۱ مگاپاسکال) و حداقل میانگین به بایوکامپوزیت خرده چوب راش (۰/۱۵ مگاپاسکال) تعلق داشت. در دسترس بودن مواد مغذی (لیگنین، سلولز و همی سلولز) در طول رشد میسلوم، از جمله عوامل مؤثر بر چسبندگی و ویژگی‌های نهایی بایوکامپوزیت میسلومی می‌باشد [۲۸]. مکانیسم‌های

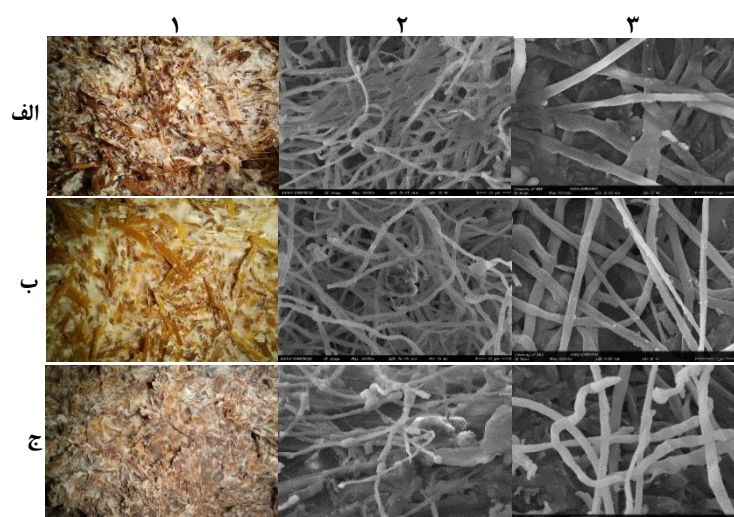
شبکه‌سازی میسلوم در بایوکامپوزیت‌ها، شامل پیوند سطحی بین ریشه‌ها و ذرات بسترهای لیگنوسلولزی است. این پیوند با تقویت ماتریس و پل زدن مؤثر بین ذرات بستر، چسبندگی ساختار بایوکامپوزیت را افزایش می‌دهد [۲۹].

اگر چه ریشه‌های موجود در بایوکامپوزیت حاوی خرده ساقه پنبه، بهترین رشد (ناشی از در دسترس بودن مواد مغذی به علت تناسب اندازه ذرات) را داشتند، اما تراکم و ضخامت نسبتاً بالای ریشه‌ها (شکل ۲)، به علاوه، وجود حجم بیشتر بایوچسب‌هایی مانند کیتین و الیگوساکاریدهای مبتنی بر بتاگلوکان [۴]، تحت تأثیر دما و فشار بالای پرس، سبب افزایش پلیمریزاسیون، استری شدن و تشکیل پیوند هیدروژنی [۳۰] بیشتر و بهبود چسبندگی داخلی این بایوکامپوزیت شد. ولی در بایوکامپوزیت خرده‌کاه گندم، وجود سطح صاف و صیقلی ناشی از لایه نازک سیلیس، علی‌رغم در دسترس بودن مواد مغذی (به علت تناسب اندازه خرده‌ها و قطر متوسط ریشه‌های قارچ)، از ایجاد اتصال قوی و مناسب جلوگیری می‌کند. پایین‌ترین میانگین جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در بایوکامپوزیت خرده‌چوب راش و بالاترین هم متعلق به بایوکامپوزیت حاوی خرده‌کاه گندم بود (جدول ۱). بایوکامپوزیت‌های میسلومی این پژوهش نیز به علت داشتن فضاهای خالی و منافذ ریز و درشت زیاد و همچنین انبساط ناشی از جذب آب، واکنشیدگی ضخامت قابل توجهی را نشان دادند. البته سطح ویژه پایین خرده‌های چوب راش و دانسیته بالا آن، سبب کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت این کامپوزیت شد. ماهیت آبدوست کاه گندم و دانسیته پایین آن، جذب آب کامپوزیت‌های میسلومی خرده‌کاه گندم را افزایش داد. از طرفی، علی‌رغم مقاومت‌های مکانیکی و چسبندگی بالاتر بایوکامپوزیت خرده‌ساقه پنبه، تخریب دیواره سلولی بسترهای لیگنوسلولزی توسط قارچ، فاصله بین الیاف و تعداد حفرات را بیشتر کرده [۹] و سبب افزایش سطح تماس مولکول‌های آب با خرده‌های بستر و در نتیجه افزایش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت این بایوکامپوزیت می‌شود.

به طور کلی، میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت کامپوزیت‌ها، مستقیماً بر دامنه کاربرد آنها تأثیر می‌گذارد. با توجه به اینکه پژوهش‌های متعددی بایوکامپوزیت‌های میسلومی را به عنوان مواد آبدوستی که به شدت تحت تأثیر نوع بستر و میسلوم هستند، معرفی کرده‌اند [۳۱]، استفاده از پرس گرم نیز مقاومت این بایوکامپوزیت‌ها در برابر آب را کاهش می‌دهد و ها را برای کاربردهای داخلی یا محیط خشک مناسب‌تر می‌کند [۳].

در روند بایوسنتز کامپوزیت‌های میسلومی، میسلوم قارچ بر روی خرده‌های بستر رشد کرده و از طریق رشد ریشه‌ها و بایوچسب‌هایی مانند کیتین و الیگوساکاریدهای مبتنی بر بتا گلوکان، خرده‌های بستر را به یکدیگر متصل و به هم پیوند می‌دهد [۴]. یک ساختار قفل‌کننده مکانیکی در سطح مشترک بین میسلوم قارچ و خرده‌های بستر به دلیل نفوذ ریشه‌های قارچ در خرده‌های لیگنوسلولزی پوسیده بستر شکل می‌گیرد. همچنین یک شبکه پیوند هیدروژنی ترکیبی در ناحیه سطحی از طریق اتصال میکرو فیبریل‌های سلولز با دیواره سلولی کیتین-بتا گلوکان قارچی تشکیل می‌شود [۳۲]. علاوه بر افزایش تراکم بایوکامپوزیت در مرحله پرس گرم، قندهای کاهنده آزاد شده در طی تجزیه زیستی خرده‌های بستر با اسیدهای آمینه موجود در میسلوم قارچ، پیوندهای هیدروژنی، آمید-استری [۳]، استریفیکاسیون و پیوندهای شیمیایی کووالانسی ایمین تشکیل می‌دهند و به طور همزمان، دیواره سلولی کیتینی میسلوم قارچ، چسبندگی را از طریق پیوند هیدروژنی افزایش داده و اثر هم‌افزایی از طریق پلیمریزاسیون مجدد لیگنین به به دست می‌آید [۳۳].

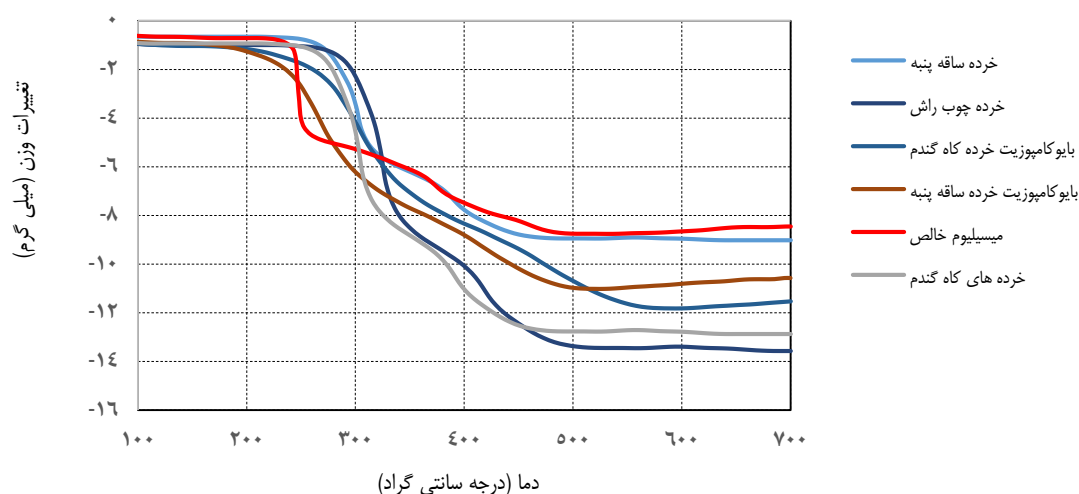
تمام تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان می‌دهند که شبکه‌ای از ریشه‌ها بر روی کل ذرات بستر لیگنوسلولزی پخش شده است. مطابق شکل ۲، قطر ریشه‌های قارچ در بایوکامپوزیت خرده‌ساقه پنبه، بیشتر از سایرین هستند و دارای شبکه‌ای پیوسته، در هم رفته و فشرده است. ساختار شبکه‌ای و درهم‌رفته در بایوکامپوزیت خرده‌کاه گندم تقریباً مشابه بایوکامپوزیت خرده‌ساقه پنبه است و با این تفاوت که ریشه‌ها، قطر کمتری دارند. میزان رشد و قطر ریشه‌های قارچ در بایوکامپوزیت خرده‌ای چوب راش، کمتر از سایرین است و دارای ضعیف‌ترین اتصالات، کمترین میزان تقسیم‌شدگی و رشد و بیشترین جداشدگی می‌باشد.



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح شکست نمونه‌های مقاومت خمشی

بایوکامپوزیت میسیلیومی ساقه پنبه (الف ۱)، بایوکامپوزیت میسیلیومی کاه گندم (ب ۱)، بایوکامپوزیت میسیلیومی خرده‌چوب راش (ج ۱) و تصاویر SEM با بزرگنمایی به ترتیب ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ برابر، از ریشه‌های قارچ در بایوکامپوزیت ساقه پنبه (الف ۲ و ۳)، ریشه‌های قارچ در بایوکامپوزیت کاه گندم (ب ۲ و ۳)، ریشه‌های قارچ در بایوکامپوزیت خرده‌های چوب راش (ج ۲ و ۳)

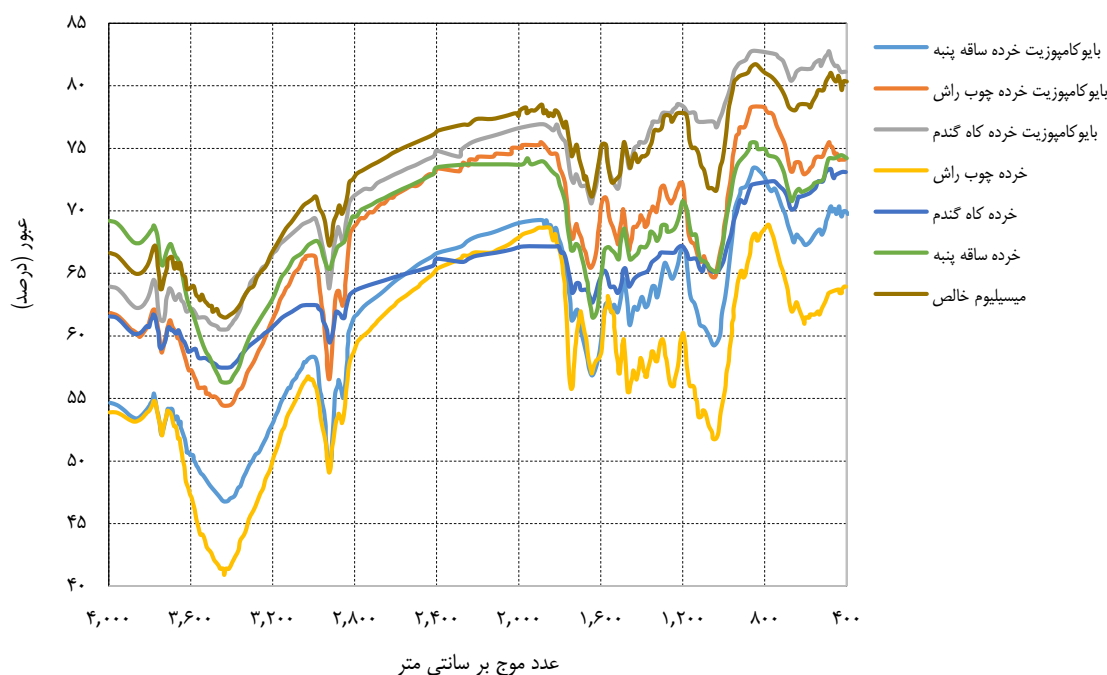
آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TGA) اصولاً جهت بررسی از دست دادن جرم، مواد فرار آزاد شده و ویژگی‌های تخریب حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس شکل ۳، بسترهای لیگنوسلولزی و بایوکامپوزیت‌های میسیلیومی سه مرحله کاهش جرم (به ترتیب: تبخیر آب آزاد، تجزیه پلی‌ساکاریدها/کیتین، تخریب و پیرولیز لیگنین) دارد [۳۴] و همچنین میسیلیوم خالص قارچ، چهار مرحله (به ترتیب: تبخیر آب آزاد، تجزیه زنجیره‌های جانبی پلی‌ساکاریدها، تخریب حرارتی ستون فقرات پلی‌ساکاریدی، تخریب کیتین-گلوکان) [۳۵] را نشان دادند. با توجه به منحنی‌های آنالیز، تخریب حرارتی بایوکامپوزیت‌ها در دمای پایین‌تر، از بسترهای لیگنوسلولزی آغاز شد که ناشی از حضور لیگنین و پلی‌ساکاریدهای (سلولز و همی سلولز) تخریب‌شده توسط میسیلیوم بود. بالاترین دمای شروع تخریب اصلی به بایوکامپوزیت خرده‌چوب راش (253°C) به دلیل ساختار پیچیده و لیگنین بالاتر و پایین‌ترین آن به بایوکامپوزیت خرده‌ساقه پنبه (174°C) به دلیل وجود پلیمرهای طبیعی تخریب‌شده، تعلق داشت. ترکیب بستر و پلیمرهای فنلی طبیعی مانند لیگنین با سیلیس سطحی در بایوکامپوزیت خرده‌کاه گندم، موجب افزایش دمای تخریب و مقاومت حرارتی شد [۳۶].



شکل ۳. طیف‌سنجی TGA میسیلیوم خالص، بسترهای مختلف و بایوکامپوزیت میسیلیومی بسترهای مختلف

از آنجا که پوسیدگی سفید بر شیمی الیاف و خرده‌های بستر تأثیر می‌گذارد [۳۷]، برای درک ترکیب شیمیایی بسترهای اولیه و بایوکامپوزیت‌های میسلیومی، از تجزیه و تحلیل منحنی‌های طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) استفاده می‌شود.

با توجه به طیف FTIR (شکل ۴)، پیک ۳۴۰۰ بر سانتی‌متر، به ارتعاش کششی گروه‌های O-H سلولز و همی‌سلولز، باند ۳۰۰۰-۲۸۰۰ بر سانتی‌متر، به ارتعاش کششی گروه‌های C-H موم‌ها و چربی‌های موجود در بایوکامپوزیت‌ها و بسترها [۳۸] و پیک ۱۷۳۰ بر سانتی‌متر، به ارتعاش کششی کربونیل گروه استیل در همی‌سلولزها و متیل‌استر در پکتین تعلق دارند. پیک ۱۰۴۰ بر سانتی‌متر در بایوکامپوزیت و بسترگاه گندم، نشان‌دهنده ارتعاش کششی Si-O و وجود پیوندهای سیلیکون-اکسیژن است [۳۹]. باند ۱۲۰۰-۱۵۵۰ بر سانتی‌متر، به ارتعاش کششی حلقه‌های غیر کربنی آروماتیک میسلیوم قارچ [۴۰] و حلقه‌های آروماتیک لیگنین [۳۸]، پیک ۱۰۲۵ بر سانتی‌متر و باند ۹۰۰-۴۰۰ بر سانتی‌متر، به ارتعاش کششی C-O، C-C، C-O-C در پلی‌ساکاریدها و همچنین پیک ۸۵۰ بر سانتی‌متر، به ارتعاش کششی پیوندهای گلیکوزیدی و حلقه‌های پیران سلولز اشاره دارند [۴۱]. علاوه بر این، پیک پهن در حدود ۳۷۵۰-۳۰۰۰ بر سانتی‌متر در همه بایوکامپوزیت‌ها، به ارتعاش کششی گروه O-H رطوبت باقیمانده در نمونه‌ها، سلولز و همی‌سلولز تعلق دارد [۳۸]. شدت کاهش یافته پیک در ۳۴۴۰ بر سانتی‌متر، مصرف O-H در طی واکنش‌های کاه گندم و میسلیوم قارچ را نشان می‌دهد [۳۹].



شکل ۴. طیف‌سنجی FTIR میسلیوم خالص، بسترهای مختلف و بایوکامپوزیت میسلیومی بسترهای مختلف

پیک‌ها و باندهای مشخصه میسلیوم قارچ نیز مانند باند ۱۵۷۵-۱۳۰۰ بر سانتی‌متر (ارتعاش کششی گروه‌های N-H و C-N امید II و امید III در میسلیوم قارچ) [۴۲]، پیک ۱۳۲۰ بر سانتی‌متر (ارتعاش کششی NH₂ در پروتئین میسلیوم)، ۱۶۳۰ بر سانتی‌متر (ارتعاش کششی گروه‌های C=C یا N-H امید I در میسلیوم قارچ)، و پیک ۲۹۲۰ بر سانتی‌متر (ارتعاش کششی گروه‌های C-H در اسیدهای چرب - لیپیدهای میسلیوم قارچ) [۴۳]، در همه بایوکامپوزیت‌ها قابل مشاهده است. از آنجا که رشد میسلیوم در بایوکامپوزیت‌ها عمدتاً به مصرف لیگنین و پلی‌ساکاریدها بستگی دارد، شدت پیک‌های ۸۵۰ بر سانتی‌متر (پیوندهای گلیکوزیدی و حلقه‌های پیران سلولز)، ۱۷۳۰ بر سانتی‌متر (گروه استیل همی سلولز)، ۱۲۰۰-۱۵۵۰ بر سانتی‌متر (حلقه آروماتیک در لیگنین) و ۳۴۰۰ بر سانتی‌متر (گروه هیدروکسیل سلولز و همی‌سلولز) که مشخصه بسترهای لیگنوسلولزی است، تضعیف شد [۳۸].

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

خواص مکانیکی و فیزیکی، سرعت و میزان رشد میسلیم قارچ *F. fomentarius*، همگی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اندازه و فرم ذرات بستر می‌باشد. دستیابی به تعادل بهینه بین ویژگی‌های ضریب کشیدگی مناسب، ریشه‌های ضخیم و ترکیبات در دسترس، یک چالش چند وجهی است، که به‌نظر می‌رسد در بایوکامپوزیت حاوی خرده‌ساقه پنبه فراهم شده است. بهترین گروه این پژوهش، بایوکامپوزیت حاوی خرده‌ساقه پنبه با مقاومت خمشی برابر با ۶/۲۶ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته خمشی معادل ۱/۳ گیگاپاسکال، چسبندگی داخلی برابر با ۰/۲۱ مگاپاسکال و میزان جذب آب و واکشیدگی ضخامت بعد از ۲۴ ساعت به‌ترتیب ۶۹/۴۱ و ۳۰/۵۸ درصد می‌باشد.

با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی، با وجود بالاتر بودن دانسیته و لیگنین ذرات خرده‌چوب راش، بالا بودن ضخامت آنها مانع از ایجاد یک شبکه متراکم و عمیق از میسلیم‌های قارچ شد و در پی آن، وجود حفرات بزرگ در ساختار این بایوکامپوزیت نیز تأثیر مضاعف بر کاهش مقاومت‌های مکانیکی داشت. لایه سطحی و نازک سیلیس و پایین بودن دانسیته ذرات در بایوکامپوزیت خرده‌کاه گندم باعث دسترسی مناسب به مواد مغذی (لیگنین و پلی‌ساکاریدها) در مقایسه با خرده‌های چوب راش به‌علت سطح ویژه پایین می‌شود.

بایوکامپوزیت‌های میسلیمی به‌علت داشتن فضاهای خالی و منافذ ریز و درشت زیاد، همچنین انبساط ناشی از جذب آب و تخریب دیواره سلولی بسترهای لیگنوسلولزی توسط قارچ، جذب آب و واکشیدگی ضخامت قابل توجهی نشان دادند. کامپوزیت‌های میسلیمی هنوز نیاز به تحقیقات گسترده جهت بهبود کیفیت دارند و قطعاً در آینده عملکردها و کاربردهای گسترده‌تری خواهند داشت. این امر، مستلزم تحقیقات مشترک بین محققان چند رشته‌ای و مشارکت عمیق پژوهشگران و صنعت برای ترویج و توسعه بایومواد می‌باشد.

۵. منابع

- [1] Sydor, M., Bonenberg, A., Doczekalska, B. & Cofta, G. (2021). Mycelium-based composites in art, architecture, and interior design: a review. *Polymers*, 14(1), 145-159.
- [2] Van Empelen, J.C. (2018). A Study into More Sustainable, Alternative Building Materials as A Substitute for Concrete in Tropical Climates. *Delft University of Technology, Delft, Netherlands*, 1-26.
- [3] Shao, G., Zhang, L., Xu, D., Jin, Y., Wu, F., Yang, N. & Xu, X. (2025). Green and sustainable bioboards: Biomanufacturing of mycelium-based composite boards with tunable properties. *Chemical Engineering Journal*, 503, 158382.
- [4] Liu, R., Li, X., Long, L., Sheng, Y., Xu, J. & Wang, Y. (2020). Improvement of mechanical properties of mycelium/cotton stalk composites by water immersion. *Composite Interfaces*, 27(10), 953-966.
- [5] Seethapathy, P., Subramani, T., Ayrilmis, N. & Patil, H. (2025). Therapeutic and Environmental Potential of Mushrooms in Ancient and Modern Contexts: A Review. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 27, 1-19.
- [6] Gow, N. A., Latge, J.P. & Munro, C.A. (2017). The fungal cell wall: structure, biosynthesis, and function. *Microbiology Spectrum*, 5(3), 10-1128.
- [7] Van den Brandhof, J.G. & Wösten, H.A. 2022. Risk assessment of fungal materials. *Fungal biology and Biotechnology*, 9(1), 3-12.
- [8] Větrovský, T., Voříšková, J., Šnajdr, J., Gabriel, J. & Baldrian, P. (2011). Ecology of coarse wood decomposition by the saprotrophic fungus *Fomes fomentarius*. *Biodegradation*, 22, 709-718.

- [9] Zhang, M., Xue, J., Zhang, R., Zhang, W., Peng, Y., Wang, M., & Cao, J. (2023). Mycelium composite with hierarchical porous structure for thermal management. *Small*, 19(46), 2302827.
- [10] De Paula, R.G., Antoniêto, A.C.C., Ribeiro, L.F.C., Srivastava, N., O'Donovan, A., Mishra, P.K., Gupta, V.K. & Silva, R.N. (2019). Engineered microbial host selection for value-added bioproducts from lignocellulose. *Biotechnology Advances*, 37(6), 107347.
- [11] Lustenhouwer, N., Maynard, D.S., Bradford, M.A., Lindner, D.L., Oberle, B., Zanne, A.E. & Crowther, T.W. (2020). A trait-based understanding of wood decomposition by fungi. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(21), 11551-11558.
- [12] Shin, H. J., Ro, H. S., Kawauchi, M. & Honda, Y. (2025). Review on mushroom mycelium-based products and their production process: from upstream to downstream. *Bioresources and Bioprocessing*, 12(1), 1-21.
- [13] Heisel, F., Lee, J., Schlesier, K., Rippmann, M., Saeidi, N., Javadian, A., Nugroho, A.R., Van Mele, T., Block, P. & Hebel, D.E. (2017). Design, cultivation and application of load-bearing mycelium components: The MycoTree at the 2017 Seoul Biennale of architecture and urbanism. *International Journal of Sustainable Energy*, 6(1), 296-303.
- [14] Voutetaki, M.E. & Mpalaskas, A.C. (2024). Natural fiber-reinforced mycelium composite for innovative and sustainable construction materials. *Fibers*, 12(7), 57-69.
- [15] Sun, W., Tajvidi, M., Hunt, C.G., Cole, B.J., Howell, C., Gardner, D.J. & Wang, J. (2022). Fungal and enzymatic pretreatments in hot-pressed lignocellulosic bio-composites: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 353, 131659.
- [16] Balaeş, T., Radu, B.M. & Tănase, C. (2023). Mycelium-composite materials—a promising alternative to plastics?. *Journal of Fungi*, 9(2), 210-219.
- [17] Womer, S., Huynh, T. & John, S. (2023). Hybridizations and reinforcements in mycelium composites: A review. *Bioresource Technology Reports*, 101456.
- [18] Doğan, N. & Doğan, C. (2022). Development of the non-grain spawn for edible mushroom (*Pleurotus ostreatus*): D-optimal mixture design approach. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 59(2), 265-274.
- [19] Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A. & John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials and Design*, 187, 108397.
- [20] Girometta, C., Picco, A.M., Baiguera, R.M., Dondi, D., Babbini, S., Cartabia, M., Pellegrini, M. & Savino, E. (2019). Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based biocomposites: A review. *Sustainability*, 11(1), 281-292.
- [21] Arabi, M., Haftkhani, A.R. & Pourbaba, R. (2023). Investigating the effect of particle slenderness ratio on optimizing the mechanical properties of particleboard using the response surface method. *BioResources*, 18(2), 2800-2814.
- [22] Bagheriehnajjar, G., Yousefpour, H. & Rahimnejad, M. (2023). Multi-objective optimization of mycelium-based bio-composites based on mechanical and environmental considerations. *Construction and Building Materials*, 407, 133346.
- [23] Attias, N., Danai, O., Tarazi, E., Pereman, I. & Grobman, Y. J. (2019). Implementing bio-design tools to develop mycelium-based products. *The Design Journal*, 22(sup1), 1647-1657.
- [24] Kraisornkachit, P., Naito, M., Kang, C. & Sato, C. (2024). Multi-Objective Optimization of Adhesive Joint Strength and Elastic Modulus of Adhesive Epoxy with Active Learning. *Materials*, 17(12), 2866-2875.

- [25] Manan, S., Ullah, M.W., Ul-Islam, M., Atta, O.M. & Yang, G. (2021). Synthesis and applications of fungal mycelium-based advanced functional materials. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6, 1-10.
- [26] Rigobello, A. & Ayres, P. (2023). Design strategies for mycelium-based composites. In *Fungi and Fungal Products in Human Welfare and Biotechnology* (pp. 605-635). *Singapore: Springer Nature Singapore*.
- [27] Somal, M., Chauhan, S.S. & Kumar, R. (2024). Mycelium-Based Lignocellulosic Composites: Sustainable Innovations in Green Materials. In *Encyclopedia of Green Materials* (pp. 1-9). *Singapore: Springer Nature Singapore*.
- [28] Jin, Y., De, G., Wilson, N., Qin, Z. & Dong, B. (2025). Towards Carbon-Neutral Built Environment: A Critical Review of Mycelium-Based Composites. *Energy and Built Environment*.
- [29] Voutetaki, M. E., & Mpalaskas, A. C. (2024). Natural fiber-reinforced mycelium composite for innovative and sustainable construction materials. *Fibers*, 12(7), 57-69.
- [30] Liu, R., Long, L., Sheng, Y., Xu, J.F., Qiu, H.Y., Li, X.Y., Wang, Y.X. & Wu, H.G. (2019). Preparation of a kind of novel sustainable mycelium/cotton stalk composites and effects of pressing temperature on the properties. *Industrial Crops and Products*, 141, 111732.
- [31] Aiduang, W., Kumla, J., Srinuanpan, S., Thamjaree, W., Lumyong, S. & Suwannarach, N. (2022). Mechanical, physical, and chemical properties of mycelium-based composites produced from various lignocellulosic residues and fungal species. *Journal of Fungi*, 8(11), 1125-1132.
- [32] Weiland, K., Jones, M. P., Zinsser, F., Kontturi, E., Mautner, A. & Bismarck, A. (2021). Grow it yourself composites: Delignification and hybridisation of lignocellulosic material using animals and fungi. *Green Chemistry*, 23(19), 7506-7514.
- [33] Cheng, Y., Long, C., Zhang, M., Wang, W. & Sun, W. (2024). Investigation of mycelium film as the adhesive for poplar veneer bonding: insight into interfacial bonding mechanisms. *Wood Material Science & Engineering*, 1-10.
- [34] Gezer, E.D. & Kuştaş, S. (2024). Acoustic and thermal properties of mycelium-based insulation materials produced from desilicated wheat straw—Part B. *BioResources*, 19(1), 1348.
- [35] Girometta, C., Dondi, D., Baiguera, R. M., Bracco, F., Branciforti, D.S., Buratti, S., Lazzaroni, S. & Savino, E. (2020). Characterization of mycelia from wood-decay species by TGA and IR spectroscopy. *Cellulose*, 27, 6133-6148.
- [36] Kalpokaitė-Dičkuvienė, R., Pitak, I., Sholokhova, A., Kriūkienė, R. & Baltušnikas, A. (2024). Surface-modified wheat straw for the production of cement-free geopolymer composite: effects of wheat variety and pre-treatment method. *Journal of Composites Science*, 8(4), 116-124.
- [37] Elsacker, E., Vandeloek, S., Brancart, J., Peeters, E. & De Laet, L. (2019). Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS One*, 14(7), e0213954.
- [38] Peng, L., Yi, J., Yang, X., Xie, J. & Chen, C. (2023). Development and characterization of mycelium bio-composites by utilization of different agricultural residual byproducts. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(1), 78-89.
- [39] Sun, F.F., Wang, L., Hong, J., Ren, J., Du, F., Hu, J., Zhang, Z. & Zhou, B. (2015). The impact of glycerol organosolv pretreatment on the chemistry and enzymatic hydrolyzability of wheat straw. *Bioresource Technology*, 187, 354-361.
- [40] Chulikavit, N., Huynh, T., Khatibi, A., Das, R. & Kandare, E. (2023). Thermal degradation and flame spread characteristics of epoxy polymer composites incorporating mycelium. *Scientific Reports*, 13(1), 17812.

- [41] Sisti, L., Gioia, C., Totaro, G., Verstichel, S., Cartabia, M., Camere, S. & Celli, A. (2021). Valorization of wheat bran agro-industrial byproduct as an upgrading filler for mycelium-based composite materials. *Industrial Crops & Products*, 170, 113742.
- [42] Pena, R., Lang, C., Naumann, A. & Polle, A. (2014). Ectomycorrhizal identification in environmental samples of tree roots by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Frontiers in Plant Science*, 5, 229.
- [43] Răut, I., Călin, M., Vuluga, Z., Oancea, F., Paceagiu, J., Radu, N., Doni, M., Alexandrescu, E., Purcar, V., Gurban, A.M. & Petre, I. (2021). Fungal based biopolymer composites for construction materials. *Materials*, 14(11), 2906-2919.