

(OPEN ACCESS)

Evaluation of the properties of polylactic acid foam prepared with azodicarbonamide as blowing agent

Mohammad Poodineh¹, Babak Nosrati Sheshkal^{2*} , Mohammad Dahmardeh Ghalehno³
and Saeid Reza Farrokh Payam⁴

- 1- Ph.D. Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran
2*- Corresponding author, Associate professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran, Email: nosrati.babak@uoz.ac.ir
3- Assistant professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran
4- Associate professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 18 May 2025

Revised: 10 November 2025

Accepted: 20 November 2025

Published online: 19 December 2025

Keywords:

Polylactic acid (PLA),
Microcrystalline cellulose (MCC),
Azodicarbonamide (ACA),
Polystyrene foams,
Foaming agent,
Nucleating agent.

ABSTRACT

Background and purpose: Nowadays, natural polymers such as cellulose, starch, and polylactic acid (PLA) are used as alternatives to petroleum polymers in various fields. Among them, PLA has been considered as the polymer that has the most structural similarities to petroleum polymers. In this study, PLA was used as the base polymer for foam production. Wood flour as a mechanical enhancer and azodicarbonamide (ACA) was used as a foaming agent. Microcrystalline cellulose (MCC) was used as a nucleating agent.

Materials and methods: The PLA foams were prepared by combining wood flour, foaming agent, and nucleating agent in an extruder and then molding using pressing. MCC as a nucleating agent in the production of PLA/wood flour foam with ACA foaming agent was used. Thermal properties of the prepared panels were investigated using Thermogravimetric Analysis (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC).

Results: The results showed that by increasing the amount of foaming agent to 3% and nucleating agent to 4%, the density of the foam panel was reduced by 52.45%. The decrease in density was accompanied by an increase in porosity, an increase in water absorption, and an increase in thickness swelling at all treatment levels (1 to 3% foaming agent and 1 to 4% nucleating agent). This decrease in density led to a decrease in tensile and flexural strength as well as an increase in impact strength. The results of TGA and DSC tests showed that the use of foaming agent did not change the glass transition temperature of the manufactured foams, but the addition of MCC led to an increase in the glass transition temperature of the foams. Also, the DSC results showed a change in the crystallization behavior of the manufactured foams after the addition of MCC.

Conclusion: This study indicated that the nucleation property of MCC was

effective in controlling cell growth and reducing pore diameter. Therefore, MCC can be used to produce microcellular polylactic acid foam of acceptable quality. Considering this issue, the present study emphasizes the use of microcrystalline cellulose (MCC) due to its industrial applications, low cost, biodegradability, and environmental impacts.

Cite this article: Mohammad Poodineh, Babak Nosrati Sheshkal, Mohammad Dahmardeh Ghalehno and Saeid Reza Farrokh Payam. 2025. Evaluation of the Properties of Polylactic Acid Foam Prepared with Azodicarbonamide as Blowing Agent. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 40(4), 338-360. DOI: <http://doi.org/10.22092/ijwpr.2025.369518.1805>



Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (<http://ijwpr.areeo.ac.ir/>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

ارزیابی ویژگی‌های فوم پلی‌لاکتیک اسید تهیه شده با عامل فوم‌زای آزودی کربن آمید

محمد پودینه^۱، بابک نصرتی^{۲*}، محمد دهمرده قلعه‌نو^۳ و سعیدرضا فرخ پیام^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، زابل، ایران، پست الکترونیک: nosrati.babak@uoz.ac.ir

۳- استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، زابل، ایران

۴- دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، زابل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: امروزه پلیمرهای طبیعی مانند سلولز، نشاسته و پلی‌لاکتیک اسید (PLA) به‌عنوان جایگزین پلیمرهای نفتی در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بین، پلی‌لاکتیک اسید به‌عنوان پلیمری که بیشترین شباهت‌ها را از نظر ساختاری به پلیمرهای نفتی دارد، مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، پلی‌لاکتیک اسید به‌عنوان پلیمر پایه ساخت فوم و آرد چوب به‌عنوان تقویت‌کننده ویژگی‌های مکانیکی و از آزودی کربن آمید (ACA) به‌عنوان عامل فوم‌کننده و از میکروکریستالین سلولز (MCC) به‌عنوان عامل هسته‌زا استفاده شد.
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸	مواد و روش‌ها: فوم‌های پلی‌لاکتیک اسید با ترکیب آرد چوب، عامل فوم‌زا و عامل هسته‌زا در دستگاه اکسترودر و بعد قالب‌گیری زیر پرس تهیه شدند. اثر میکروکریستالین سلولز به‌عنوان عامل هسته‌زا در تولید فوم پلی‌لاکتیک اسید/آرد چوب با عامل فوم‌زای آزودی کربن آمید بررسی شد. خواص حرارتی پانل‌های تهیه شده با استفاده از آزمون‌های وزن‌سنجی حرارتی (TGA) و گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) مورد بررسی قرار گرفت.
واژه‌های کلیدی: پلی‌لاکتیک اسید (PLA)، میکروکریستالین سلولز (MCC)، آزودی کربن آمید (ACA)، فوم‌های پلی استایرن، عامل فوم‌زا، عامل هسته‌زا.	یافته‌ها: نتایج نشان داد که با افزایش مقدار عامل فوم‌زا تا سطح ۳ درصد و عامل هسته‌زا تا سطح ۴ درصد، چگالی پانل فوم ساخته شده تا ۵۲/۴۵ درصد کاهش یافته است. کاهش چگالی همراه با افزایش تخلخل، افزایش جذب آب و افزایش واکنش‌پذیری ضخامت در تمام سطح تیمارها (۱ تا ۳ درصد عامل فوم‌زا و ۱ تا ۴ درصد عامل هسته‌زا) معنی‌دار بوده است. همچنین، این کاهش چگالی منجر به کاهش مقاومت کششی و خمشی و افزایش مقاومت به ضربه شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های TGA و DSC نشان داد که استفاده از عامل فوم‌زا تغییری در دمای شیشه‌ای شدن فوم‌های ساخته شده ندارد، اما اضافه کردن میکروکریستالین سلولز منجر به افزایش دمای شیشه‌ای فوم‌ها شده است. همچنین، نتایج DSC تغییر رفتار کریستالینه شدن فوم‌های ساخته شده را پس از اضافه نمودن میکروکریستالین سلولز نشان داد.
	نتیجه‌گیری: این تحقیق نشان داد که خاصیت هسته‌زایی MCC در کنترل رشد سلولی و کاهش قطر حفره‌ها مؤثر بوده است، از این رو، می‌توان از آن برای تولید فوم پلی‌لاکتیک اسید میکرو سلولی باکیفیت قابل قبول استفاده نمود. با توجه به این موضوع، این مطالعه استفاده از میکروکریستالین سلولز (MCC) را به دلیل کاربردهای صنعتی، ارزان‌قیمت بودن، زیست‌تخریب‌پذیری و آثار محیط‌زیستی آن مورد تأکید قرار می‌دهد.

استناد: محمد پودینه، بابک نصرتی، محمد دهمرده قلعه‌نو و سعیدرضا فرخ پیام. ۱۴۰۴. ارزیابی ویژگی‌های فوم پلی‌لاکتیک اسید تهیه

شده با عامل فوم‌زای آزودی کربن آمید. نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۴۰(۴)، ۳۶۰-۳۳۸.

مقدمه

در طی چند دهه اخیر، مصرف بی‌رویه پلاستیک‌ها و مشکلات دفن آنها، خطرات زیست‌محیطی جدی را به همراه داشته است؛ بنابراین استفاده از پلیمرهای زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر روزبه‌روز در حال گسترش است ([Williams and Rangel-Buitrago, 2022](#)). پلی‌لاکتیک اسید (PLA) (Poly Lactic Acid) یک پلیمر زیست‌پایه، زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر است که به دلیل مشکلات زیست‌محیطی ناشی از پلاستیک‌های سنتزی پایه نفتی، موردتوجه قرار گرفته است ([Balasubramanian, 2014](#)). PLA دارای ساختار آلیفاتیک خطی است که از طریق فرایند پلیمریزاسیون از مونومر لاکتیک اسید به دست می‌آید. لاکتیک اسید از فرایند تخمیر قند مواد زیستی ذرت، گندم و غیره تولید می‌شود. هزینه تولید PLA در مقایسه با پلیمرهای سنتزی نفتی که در کاربردهای مشابه استفاده می‌شوند، بیشتر است اما با توجه به مسائل زیست‌محیطی، استفاده از PLA در کاربردهای مختلف در حال گسترش است ([Hsissou et al., 2021](#)). باوجوداین، این زیست‌پلیمر دارای معایبی نظیر میزان کریستالیزاسیون پایین، دمای ذوب پایین و خاصیت شکنندگی است که در صورت استفاده صنعتی، نیازمند استفاده از مواد افزودنی برای بهبود این ویژگی‌هاست. یکی از کاربردهایی که PLA قابلیت جایگزینی با پلیمرهای نفتی را دارد، در ساخت فوم پلیمری است. این فوم‌ها به دلیل خواص مطلوبی که دارند (وزن پایین، نسبت مقاومت به دانسیته مناسب، عایق فوق‌العاده و توانایی جذب انرژی) در زمینه‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند ([Balla et al., 2021](#)).

در حال حاضر، ماده اصلی تولید فوم، پلیمرهای پلی‌یورتان، پلی‌استایرن و پلی‌پروپیلن می‌باشند. به دلیل مصرف کم پلیمر در ساخت این مواد، هزینه‌هایی نیز کاهش پیدا کرده و در این صورت استفاده از PLA به‌عنوان جایگزین پلیمرهای نفتی مانند پلی‌استایرن توجیه‌پذیر است ([Westman et al., 2010](#); [Young & Lovell, 2011](#)).

فوم‌های پلیمری اغلب براساس اندازه سلول، چگالی، میزان انبساط و ساختار سلول دسته‌بندی می‌شوند. دسته‌بندی اندازه و چگالی این نوع فوم‌ها شامل فوم معمولی، فوم سلول ریز، فوم میکروسلولی و فوم نانوسلولی می‌باشند که اندازه متوسط سلولی در آنها به ترتیب بالای ۱۰۰ میکرومتر، بین ۱۰۰-۱۰ میکرومتر، بین ۱۰۰ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر و زیر ۱۰۰ نانومتر هستند. همچنین چگالی سلولی این فوم‌ها نیز کمتر از 1.06 cell/cm^3 ، $1.06-1.09 \text{ cell/cm}^3$ ، $1.09-1.12$ و بیشتر از 1.15 سلول بر سانتی‌متر مکعب است ([Ehrenstein, 2012](#); [Osswald & Menges, 2012](#)). در سال‌های اخیر، فوم‌های میکروسلولی و نانوسلولی به دلیل اندازه سلولی کوچک‌تر که خواص عایق حرارتی و برخی ویژگی‌های مکانیکی (مانند مقاومت ضربه، مقاومت به خستگی و سفتی) بهتری دارند موردتوجه قرار گرفته‌اند ([Osswald & Menges, 2012](#)). به‌منظور دستیابی به یک فوم مناسب و با کیفیت، فرایند فوم‌سازی می‌بایست شامل مراحل زیر باشد: الف) حل کامل گاز دمنده در یک پلیمر تحت شرایط فشار و دمای مناسب، ب) ایجاد یک ناپایداری ترمودینامیکی ناگهانی برای تشکیل همگن مخلوط گاز/پلیمر، ج) کنترل رشد سلول برای جلوگیری از ادغام یا فروپاشی سلول. عوامل دمنده گازی می‌توانند در وضعیت جامد (افزودنی) یا مذاب پلیمر (تزریق گاز) به آن اضافه شوند ([Young & Lovell, 2011](#)).

براساس نوع عامل دمنده، روش‌های فوم‌سازی می‌توانند به دو دسته شیمیایی و فیزیکی تقسیم‌بندی شوند ([Nofar & Park, 2014](#)). در فوم‌سازی شیمیایی، فوم از طریق تخریب یک عامل شیمیایی دمنده (CBAs) (Chemical Blowing Agent) که با پلیمر ترکیب شده است، ساخته می‌شود. آزو-دی‌کربن‌آمید (Azodicarbonamide) سدیم بی‌کربنات، سیتریک اسید و بنزن سولفونیل هیدرازید ازجمله رایج‌ترین CBAs هستند ([Mittal, 2011](#)). انتخاب نوع CBAs، بستگی به دمای فرایند تولید فوم (نوع پلیمر)، دمای تخریب CBAs، تأثیر مقدار

یافته اما چگالی سلولی افزایش یافته است. همچنین کارایی هسته‌زایی سلول با حضور گرافن اثر معنی‌دار داشته است و ویژگی مکانیکی نمونه‌ها با افزایش عامل فوم‌زا کاهش یافته است (Sheldon, 2014). Kord (۲۰۱۳) تأثیر عامل فوم‌زا بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و ریخت‌شناسی کامپوزیت فوم پلی‌اتیلن / آرد پوسته برنج را بررسی کرد. نتایج تحقیق وی نشان داد که با افزایش مقدار عامل فوم‌زا، چگالی، مدول کششی، مقاومت کششی و مقاومت خمشی نمونه‌ها کاهش یافته است، درحالی‌که جذب آب، واکنشیدگی ضخامت و اندازه سلول افزایش یافته است (Dechent et al., 2020). Abu Hassan و همکاران (۲۰۲۰) ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی فوم تهیه شده از PLA، الیاف کنف و ACA را بررسی کردند و نشان دادند که مقاومت کششی به دلیل افزایش تعداد سلول‌ها که ناشی از افزایش گاز حاصل از تخریب ACA بوده است، کاهش یافته است. همچنین مقدار جذب آب نیز با افزایش تخلخل، افزایش یافته است (Agbor et al., 2011). از آنجایی‌که پلی‌لاکتیک اسید (PLA) به‌عنوان پلیمری شکننده از مقاومت پایینی برخوردار است، کاربرد محصولات ساخته شده از آن محدود خواهد شد؛ بنابراین برای بهبود ویژگی‌های موردنیاز در طی مصرف محصولات ساخته شده از آن، راهکارهایی با رویکرد کاهش مصرف عوامل پلیمری نفتی یا استفاده از مواد زیستی دیگر موردنیاز است. با توجه به این موضوع، در این پژوهش از میکروکریستالین سلولز (MCC) به‌عنوان افزودنی زیست‌تخریب‌پذیر و ارزان قیمت به‌منظور بهبود ویژگی‌های پلیمر زیستی PLA در ساخت فوم میکروسلولی استفاده شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، مواد اولیه شامل پلی‌لاکتیک اسید، میکروکریستالین سلولز و آزودی‌کربن‌آمید با مشخصات زیر تهیه گردید.

مشخصات پلی‌لاکتیک اسید (PLA)

پلی‌لاکتیک اسید از شرکت NatureWorks®

CBAs باقیمانده پس از تخریب و ویژگی‌های پلیمر دارد. آزودی‌کربن‌آمید (ACA)، یکی از مهم‌ترین عوامل فوم‌زا است که به دلیل کارایی بالا در تولید گاز (CO_2 و N_2)، توزیع مناسب در بستر پلیمری، قیمت کم و سمیت پایین در تولید فوم‌های پلیمری مورد استفاده قرار گرفته است (Wang et al., 2021). این ماده در دمای ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد تخریب می‌شود اما با افزودن مقداری فعال‌ساز مانند اکسید روی (zinc oxide) و استئارات روی (zinc stearate) یا اوره، این دما تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد نیز کاهش می‌یابد (Aretoulaki et al., 2020). با این حال، کاهش چگالی و ساختار متخلخل بیشتر از طریق افزودن عواملی به نام مواد هسته‌زا قابل دستیابی است. هسته‌زایی فرایند تشکیل فاز جدید (حباب/سلول) از طریق یک فرایند ترمودینامیکی برگشت‌پذیر با میزان پلیمر بستر است (Simeone et al., 2025). هسته‌زایی در سه شکل شامل هسته‌زایی همگن (زمانی که یک مقدار گاز در داخل فاز پلیمری حل می‌شود تا حباب‌های پایدار تشکیل دهد)، هسته‌زایی ناهمگن (تداخل پلیمر و مواد افزودنی) و هسته‌زایی ترکیبی (رقابت بین هسته‌زایی همگن و ناهمگن) قابل تشکیل است. هسته‌زایی ناهمگن در حضور عوامل هسته‌زا انجام می‌شود که به‌عنوان مراکز هسته‌زایی عمل می‌کنند. این مواد به‌دلیل نسبت زیاد سطح و حجم و اثر متقابل قوی با پلیمر، تعداد نقاط هسته‌زایی را افزایش می‌دهند (Volchko & Rutledge, 2024).

مواد مختلفی مانند تالک، رس، نانوسیلیس، گرافن، نانولوله کربنی و الیاف سلولزی به‌عنوان هسته‌زا در فرایند تولید فوم PLA استفاده می‌شوند. این مواد، در صورت استفاده همراه با PLA، ویژگی‌های PLA ازجمله میزان کریستالیزاسیون را بهبود می‌بخشند (Aretoulaki et al., 2020). Dahmardeh Ghalehno و Kord (۲۰۲۱) تأثیر گرافن را بر ویژگی‌های کامپوزیت فوم پلی‌اتیلن و آرد چوب (با عامل فوم‌زا ACA) بررسی کردند و دریافتند که با افزایش مقدار گرافن، اندازه سلول فوم کاهش

جدول ۱ تهیه گردید. شرایط تغذیه PLA در اکستروژن در (PLA Polymer 2100 D) با مشخصات نشان داده شده در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۱- مشخصات پلی لاکتیک اسید (PLA) مورد استفاده در تحقیق

Table 1- Specifications of polylactic acid (PLA) used in the research

Physical characteristic	PLA Polymer 2100 D	ASTM Method
Specific Gravity	1.30	D792
Melting Index, 10/g min (190°C)	5-15	D1238
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Strength/Breakage (MPa)	56	D638
Tensile Modulus (GPa)	3.5	D638
Elongation at Break (%)	3	D638

آمید با نام تجاری AC-K در شرکت Chano Gong کشور چین، به مقدار ۲ درصد وزنی پلیمر است. از اکسید روی به میزان ۵۰ درصد وزنی برای کاهش دمای تخریب و انتشار گاز آزودی کربن آمید استفاده شد. از پارافین مایع به میزان ۰/۰۱ وزن پلیمر PLA برای توزیع بهتر عامل فومزا در ماتریس استفاده شد. ترکیب تیمارهای مختلف فوم کامپوزیت ساخته شده در جدول ۳ ارائه شده است. در تیمارهای نشان داده شده، عامل جفت‌کننده مالئیک انیدرید اصلاح شده پلی پروپیلنی (MAPP) به مقدار ۴ درصد وزنی کامپوزیت در تمام کدها مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲- شرایط تغذیه PLA در اکستروژن

Table 2- PLA feeding conditions in extrusion

Part	Standard Temperature Profile (°C)
Input Part	45
Part 1	180
Part 2	190
Part 3	200
Template	190

جدول ۳- ترکیب تیمارهای مختلف فوم کامپوزیت ساخته شده

Table 3- Composition of different treatments of manufactured composite foam

Treatment code	% wood flour	% PLA	% foaming agent	% MCC
1	50	50	0	0
2	50	50	1	0
3	50	50	1	2
4	50	50	1	4
5	50	50	3	0
6	50	50	3	2
7	50	50	3	4

میکرو کریستالین سلولز (MCC)

میکرو کریستالین سلولز (MCC) که با نام تجاری Avicel شناخته می‌شود با متوسط طول حدود ۵۰ میکرومتر از شرکت سیگما تهیه گردید.

آرد چوب صنوبر

آرد چوب صنوبر با استفاده از دستگاه آسیاب آزمایشگاهی و الک مش ۴۰ و ۶۰ برای غربال آن تهیه گردید. علاوه بر این، مالئیک انیدرید اصلاح شده با پلی پروپیلن به عنوان عامل جفت‌کننده از شرکت کیمیا جاوید سپاهان تهیه شد. عامل فومزای مورد استفاده در این تحقیق آزودی کربن

$$D = \frac{Wb - Wa}{Wb} \times 100 \quad (۱) \text{ رابطه}$$

روش ساخت نمونه‌ها

تیمارهای اشاره شده با استفاده از یک دستگاه اکسترودر دو ماردونه ناهمسوگرد با پروفیل دمایی مربوط به دمای ذوب PLA مخلوط شدند. فشار قالب ۶ مگاپاسکال و سرعت تغذیه ۸ دور بر دقیقه و سرعت موتور ۱۷۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. پس از اختلاط، مواد بی‌شکل توسط یک آسیاب به گرانول تبدیل شدند. سپس در درون یک آون با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. پس از این مرحله، گرانول‌ها به درون یک قالب با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر ریخته شد و تحت پرس گرم با دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا عامل فوم‌زا فعال شود. پس از اتمام عملیات پرس گرم، تخته‌ها (با ضخامت ۱ سانتی‌متر) به مدت ۱۰ دقیقه تحت پرس سرد با فشار ملایم قرار گرفت تا تنش‌های ایجاد شده به‌طور کامل برطرف گردند. سپس از هر تخته، نمونه‌های آزمون‌ی برش داده شد و در کیسه‌های پلاستیکی به دلیل جلوگیری از تبادل رطوبتی قرار گرفت. آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها در این تحقیق به شرح زیر است:

خواص فیزیکی شامل جذب آب و واکنش‌پذیری ضخامت است. علاوه بر آن، میزان واکنش‌پذیری ضخامت نیز بررسی شد. جذب آب و واکنش‌پذیری ضخامت طولانی مدت مطابق با استاندارد ASTM D 7031-04 انجام شد. نمونه‌های آزمون‌ی به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای 60 ± 2 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و بعد وزن و ضخامت نمونه‌ها توسط ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم و میکرومتر با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در داخل آب با دمای آزمایشگاه قرار گرفت و در ساعات موردنظر از داخل آب خارج، وزن و ضخامت آنها دوباره اندازه‌گیری شد. این کار تا جایی ادامه پیدا کرد تا نمونه‌ها کاملاً از آب اشباع شده و تغییری در وزن آنها مشاهده نشود. در نهایت میزان جذب آب و واکنش‌پذیری ضخامت با استفاده از روابط مربوطه برای هر ساعت محاسبه شد. از هر تیمار ۵ نمونه به ابعاد $4 \times 10 \times 80$ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

خواص حرارتی

برای بررسی خصوصیات حرارتی فوم‌های ساخته شده از آزمون‌های وزن‌سنجی گرمایی (TGA) و گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) استفاده شد. در آنالیز TGA تغییرات مشخصات مواد در اثر حرارت اندازه‌گیری می‌گردد. برای این آنالیز از دستگاه TGA 601-LT متعلق به شرکت دما پژوه آروین که محدوده دمای آن تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، محدوده گرمایش ۰/۱ تا ۲۵ کیلوژول در دقیقه و دارای وضوح ۰/۱ میکروگرم است، استفاده شد. برای آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) نیز از دستگاه DSC-500 ساخت شرکت INNULO (تایوان) استفاده شد. محدوده تغییرات دما در این دستگاه بین ۳۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و میزان دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد است.

تجزیه و تحلیل آماری

نتایج با توجه به دو متغیر (میزان ماده فوم‌زا و میزان ماده

خواص مکانیکی

خواص مکانیکی شامل خواص خمشی (مقاومت و مدول خمشی) مطابق با استاندارد ASTM D790، خواص کششی (مقاومت و مدول کششی) مطابق با استاندارد ASTM D638 و مقاومت به ضربه مطابق با استاندارد ASTM D256 اندازه‌گیری شد. خواص خمشی و کششی در آزمایشگاه مکانیک دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل و توسط دستگاه Hounsfield انجام شد و آزمون ضربه در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران با استفاده از دستگاه Zwick انجام گردید. رایانه متصل به این دستگاه‌ها مقادیر مقاومت و مدول را برای هر آزمون محاسبه کرد.

خواص فیزیکی

میزان رطوبت نمونه‌ها با قرارگیری نمونه‌ها در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و میزان کاهش وزن آنها بر اساس رابطه (۱) محاسبه گردید:

اثر مستقل عامل فوم‌زا و عامل هسته‌زا بر روی مدول گسیختگی معنی‌دار بود ($P < 0.05$)، اما اثر متقابل این دو فاکتور دارای تفاوت معنی‌داری نبود ($P > 0.05$).

اثر مستقل عامل فوم‌زا بر مدول گسیختگی (MOR) تحلیل آماری نشان می‌دهد که اثر عامل فوم‌زا بر مدول گسیختگی فوم‌ها معنی‌دار گردید ($P < 0.05$). افزایش عامل فوم‌زا از مقدار صفر به ۳ درصد باعث کاهش مقاومت خمشی (از ۲/۲۰ به ۱/۳۹ مگاپاسکال) در پانل‌ها شد (شکل ۱). دلیل این موضوع می‌تواند افزایش ترک و حفره‌های ناشی از تخریب ماتریس پلیمری پانل‌ها در اثر تخریب حرارتی عامل فوم‌زا باشد.

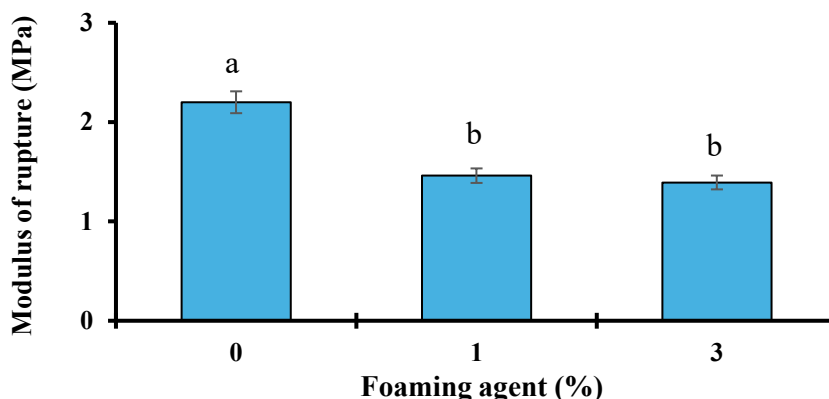
هسته‌زا)، هریک در سه سطح (به ترتیب صفر، یک، سه درصد و صفر، دو و چهار درصد) بر مبنای وزن کل مواد و درمجموع تیمار، از نرم‌افزار SPSS 17 و طرح آماری فاکتوریل استفاده شد. پس از مشاهده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها و سطوح، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در فاصله اطمینان ۹۵ درصد و سطح معنی‌داری ۵ درصد برای گروه‌بندی میانگین‌ها استفاده شد.

نتایج

خواص مکانیکی پانل‌ها

مدول گسیختگی (MOR)

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عامل فوم‌زا و عامل هسته‌زا را بر روی مدول گسیختگی نشان داد که



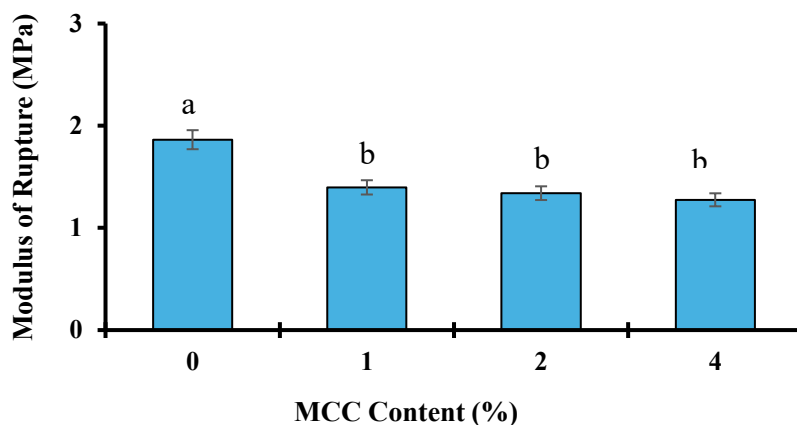
شکل ۱- اثر مستقل عامل فوم‌زا بر مدول گسیختگی

Figure 1. Independent effect of foaming agent on modulus of rupture

($P < 0.05$). یاآوری می‌شود که بیشترین و کمترین مدول گسیختگی به ترتیب در فوم‌های ساخته شده با صفر درصد میکروکریستالین سلولز (۱/۸۶ مگاپاسکال) و ۴ درصد میکروکریستالین سلولز (۱/۲۷ مگاپاسکال) بودند (شکل ۲).

اثر مستقل عامل هسته‌زا بر مدول گسیختگی (MOR)

نتایج حاصل از آنالیز تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل عامل هسته‌زا بر مدول گسیختگی تخته‌ها معنی‌دار است



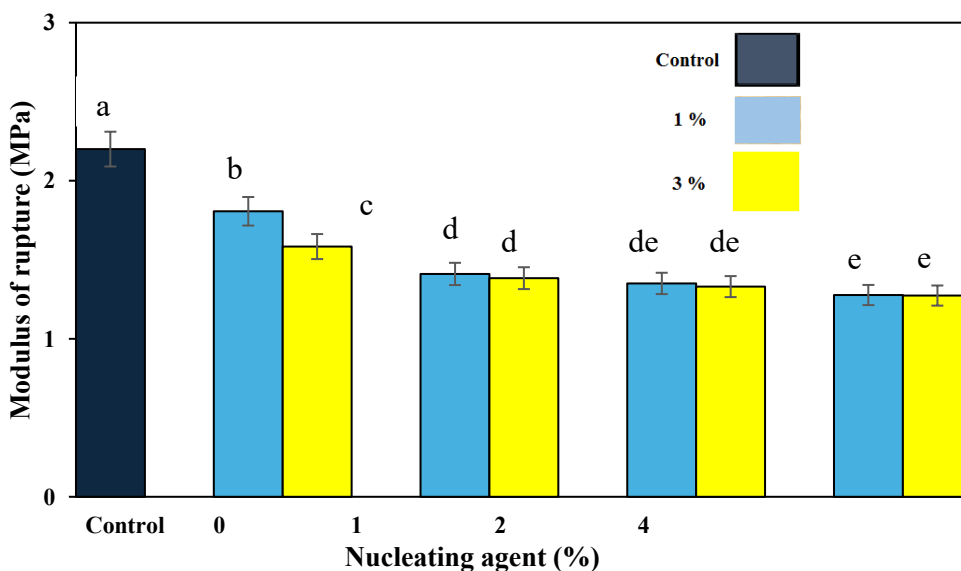
شکل ۲- اثر مستقل عامل هسته‌زا بر مدول گسیختگی (MOR)

Figure 2 - Independent effect of nucleating agent on modulus of rupture (MOR)

($P < 0.05$)، به طوری که افزایش عامل هسته‌زا با بیشتر شدن عامل فوم‌زا، مقاومت خمشی کمتری را به همراه داشته است (شکل ۳).

اثر متقابل عامل هسته‌زا و فوم‌زا بر مدول گسیختگی (MOR)

تجزیه و تحلیل‌های آماری نشان داد که اثر متقابل عامل هسته‌زا و فوم‌زا بر روی مدول گسیختگی معنی‌دار بوده است



شکل ۳- اثر متقابل عامل هسته‌زا و فوم‌زا بر مدول گسیختگی (MOR)

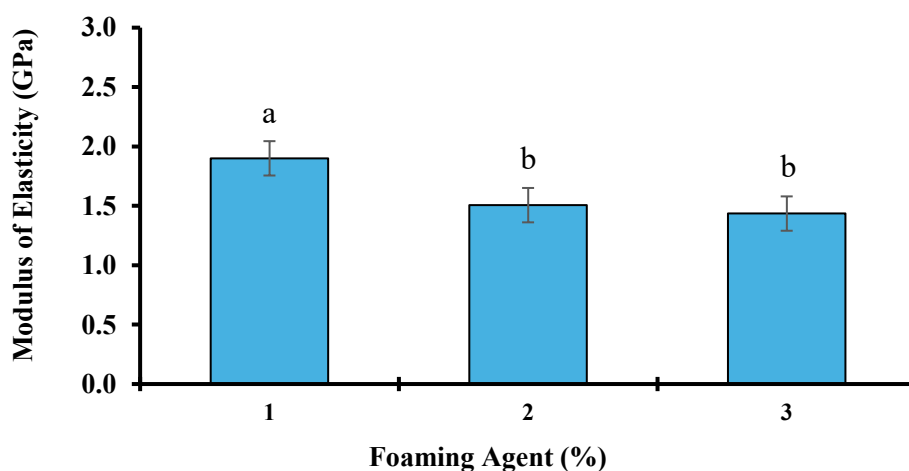
Figure 3. The mutual interaction effect of nucleating agent and foaming agent on the modulus of rupture (MOR)

مدول الاستیسیته (MOE)

مدول الاستیسیته یکی از پارامترهای مکانیکی مهم مواد است که رابطه بین توزیع تنش و تغییر طول ایجاد شده را نشان می‌دهد که به‌طور کلی به‌عنوان شاخصی از صلبیت و سختی مواد مرکب است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل و متقابل (عامل فوم‌زا و هسته‌زا) بر روی مدول الاستیسیته معنی‌دار شده است ($P < 0.05$).

اثر مستقل عامل فوم‌زا بر مدول الاستیسیته (MOE)

نتایج حاصل از آنالیز تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل عامل فوم‌زا بر مدول الاستیسیته پانل‌ها معنی‌دار بوده است ($P < 0.05$)، به‌طوری‌که با افزایش آن مدول الاستیسیته از ۱/۹۰ گیگاپاسکال به ۱/۴۳ گیگاپاسکال کاهش یافته است (شکل ۴).



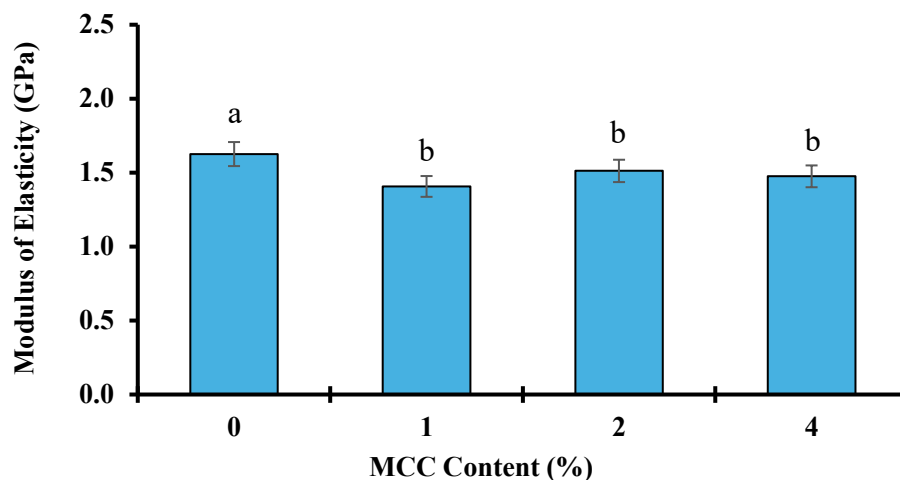
شکل ۴- اثر مستقل عامل فوم‌زا بر مدول الاستیسیته (MOE)

Figure 4. Independent effect of foaming agent on elastic modulus (MOE)

اثر مستقل عامل هسته‌زا بر مدول الاستیسیته

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که درصد عامل هسته‌زا تأثیر معنی‌داری بر مدول الاستیسیته پانل‌ها داشته است

($P < 0.05$)، به‌طوری‌که با افزایش آن مدول الاستیسیته از ۱/۶۲ گیگاپاسکال به ۱/۴۷ گیگاپاسکال کاهش یافته است (شکل ۵).

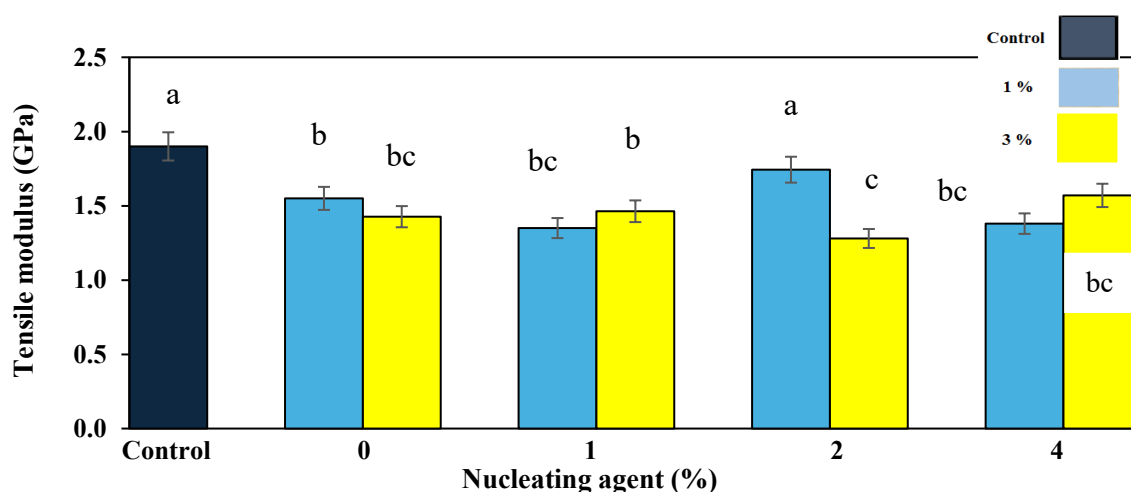


شکل ۵- اثر مستقل عامل هسته‌زا بر مدول الاستیسیته (MOE)

Figure 5. Independent effect of nucleating agent on elastic modulus (MOE)

است ($P < 0.05$)، به طوری که با افزایش عامل هسته‌زا تا سطح ۲ درصد و بیشتر شدن عامل فوم‌زا، میزان مدول الاستیسیته با کاهش همراه بوده است (شکل ۶).

اثر متقابل عامل هسته‌زا و فوم‌زا بر مدول الاستیسیته
نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش متغیرها تأثیر معنی‌داری بر مدول الاستیسیته پانل‌ها داشته



شکل ۶- اثر عامل هسته‌زا و فوم‌زا بر مدول الاستیسیته (MOE)

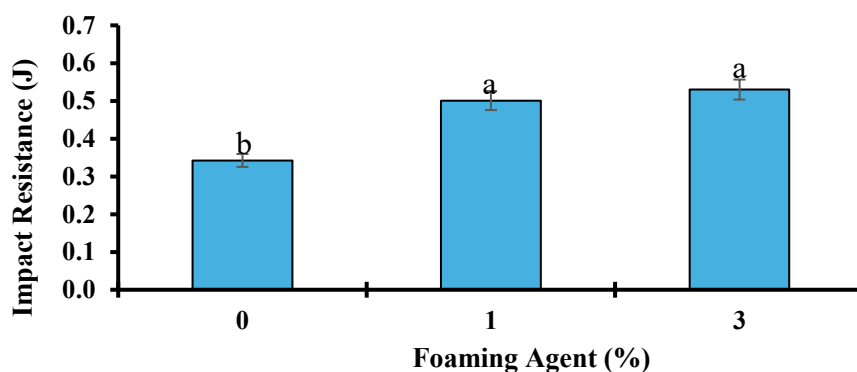
Figure 6. Effect of nucleating and foaming agents on the modulus of elasticity (MOE)

داخلی ماده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل و متقابل عامل فوم‌زا و هسته‌زا بر روی مقاومت ضربه معنی‌دار بودند ($P < 0.05$).

مقاومت به ضربه
از مهم‌ترین ویژگی‌های مقاومتی مواد، مقاومت ضربه (ضربه عمود بر سطح) است که نشان‌دهنده کیفیت اتصالات

نتایج نشان داد که مقاومت به ضربه نمونه‌های با ۳ درصد ژول (۰/۵۳) بیشتر از نمونه‌های با میزان صفر درصد (۰/۳۴) است (شکل ۷).

اثر مستقل عامل فوم‌زا بر مقاومت به ضربه بر اساس تجزیه و تحلیل آماری، عامل فوم‌زا تأثیر معنی‌داری بر مقاومت به ضربه پانل‌ها داشته است ($P < 0.05$).

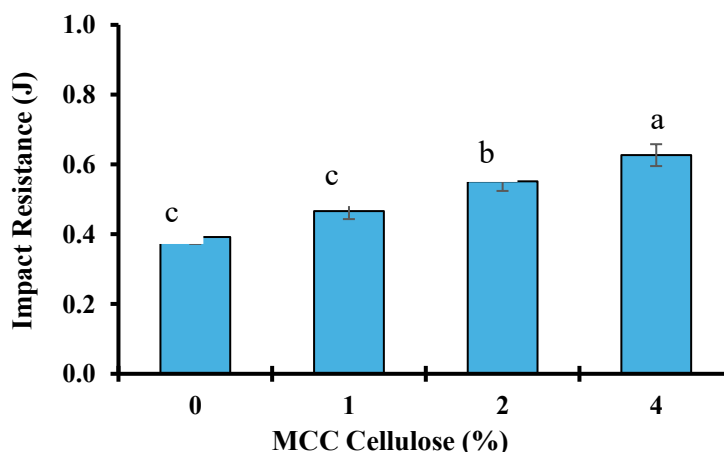


شکل ۷- اثر مستقل عامل فوم‌زا بر مقاومت به ضربه

Figure 7. Independent effect of foaming agent on impact resistance

است ($P < 0.05$). بیشترین مقاومت (۰/۶۲۶ ژول) مربوط به پانل ساخته شده با ۴ درصد عامل هسته‌زا و کم‌ترین آن‌که ۰/۳۹۱ ژول ثبت گردید، مربوط به صفر درصد بود (شکل ۸).

اثر مستقل عامل هسته‌زا بر مقاومت به ضربه نتایج آنالیز تجزیه واریانس نشان داد که درصد عامل هسته‌زا تأثیر معنی‌داری بر مقاومت به ضربه پانل‌ها داشته



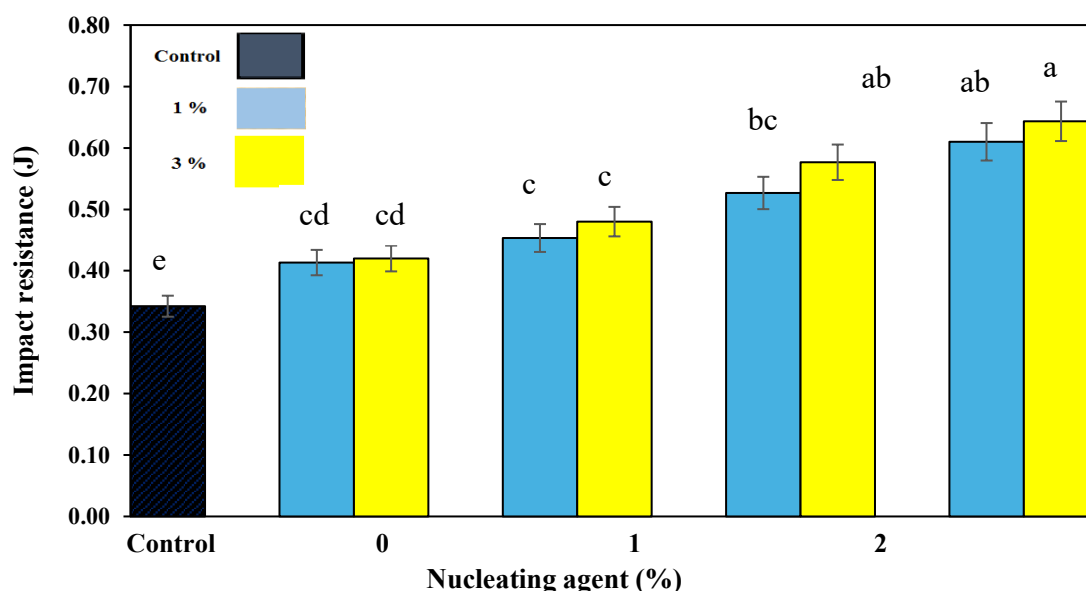
شکل ۸- اثر مستقل عامل هسته‌زا بر مقاومت به ضربه

Figure 8. Independent effect of nucleating agent on impact resistance

نتایج نشان دادند که مقاومت به ضربه پانل‌های ساخته شده با ۴ درصد عامل هسته‌زا و ۳ درصد عامل فوم‌زا بهترین نتایج (۰/۶۴ ژول) را داشتند (شکل ۹).

اثر متقابل عامل هسته‌زا و فوم‌زا بر مقاومت به ضربه

بر اساس تجزیه و تحلیل آماری، برهم‌کنش متغیرها تأثیر معنی‌داری بر مقاومت به ضربه پانل‌ها داشته است ($P < 0.05$).



شکل ۹- اثر متقابل عامل هسته‌زا و فوم‌زا بر مقاومت به ضربه

Figure 9 - The interaction effect of nucleating agent and foaming agent on impact resistance

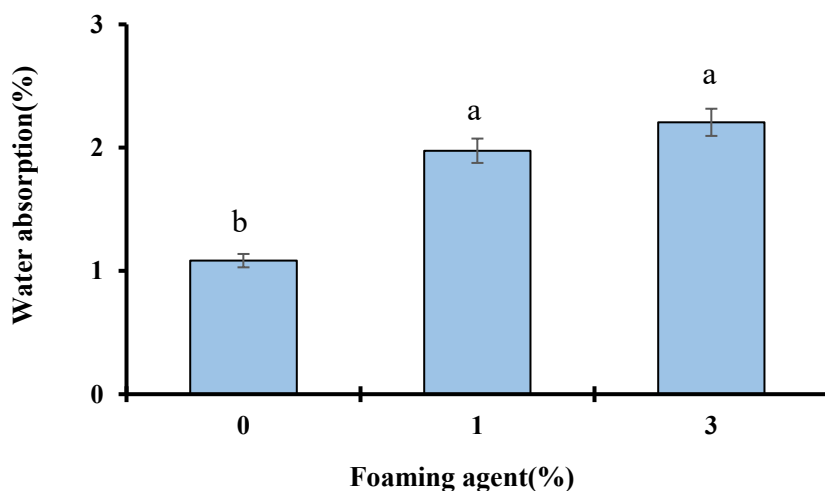
معنی‌داری در اثر متقابل این دو عامل بر جذب آب در مدت زمان ۲ ساعت وجود نداشت ($P > 0.05$).

اثر مستقل عامل فوم‌زا بر جذب آب

نتایج نشان داد که بین میزان جذب آب پانل‌ها در مقدار ۱ و ۳ درصد تفاوت معنی‌داری وجود داشت ($P < 0.05$). شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه بین میانگین مقادیر جذب آب پانل‌های تهیه شده بعد از ۲ و ۷۲۰ ساعت غوطه‌وری در آب در درصدهای مختلف عامل فوم‌زا را نشان می‌دهند. این شکل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقدار عامل فوم‌زا درصد جذب آب پانل‌ها افزایش یافته است.

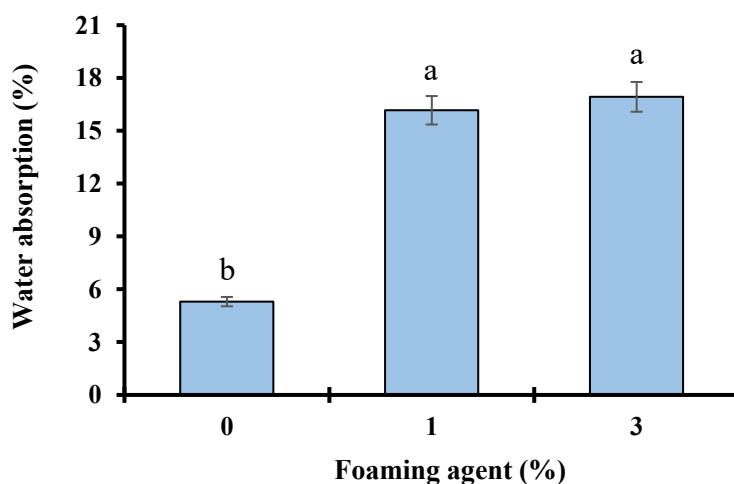
خواص فیزیکی پانل‌ها جذب آب

جذب آب یکی از خواص مهم فیزیکی مواد لیگنوسلولزی است که این موضوع ناشی از گروه‌های قطبی و هیدروکسیلی موجود در همی سلولز و سلولز است. میزان مواد استخراجی، سلولز و همی سلولز در ترکیب مواد چوبی از عوامل تأثیرگذار بر جذب رطوبت و واکنشیدگی ضخامت پانل به شمار می‌آید. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل متغیرها بر روی جذب آب معنی‌دار شده است ($P < 0.05$). باین وجود، تفاوت



شکل ۱۰- اثر عامل فومزا بر جذب آب بعد از ۲ ساعت غوطه‌وری

Figure 10. Effect of foaming agent on water absorption after 2 h of immersion

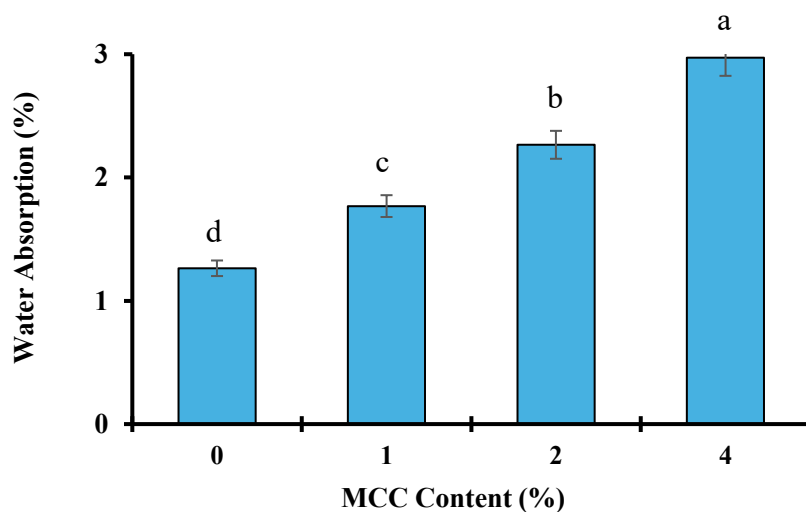


شکل ۱۱- اثر متقابل عامل فومزا بر جذب آب بعد از ۷۲۰ ساعت غوطه‌وری

Figure 11. Effect of foaming agent on water absorption after 720 h of immersion

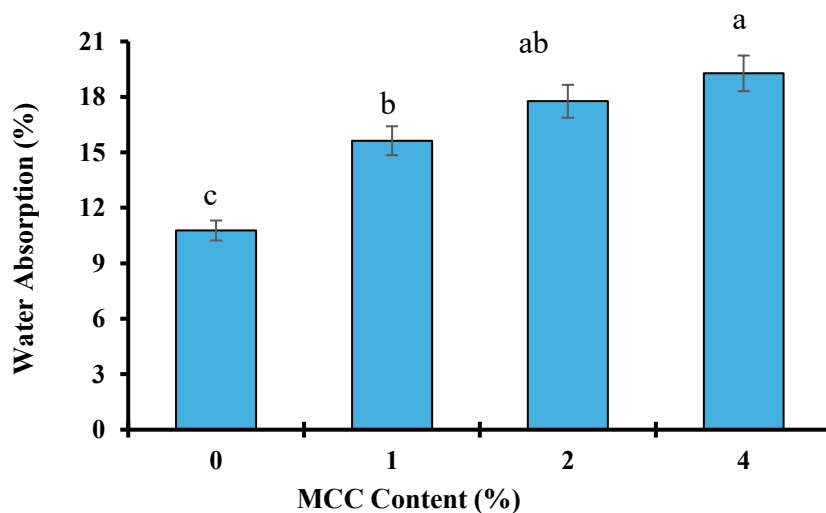
روی جذب آب را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین جذب آب (۱/۲۶ درصد) مربوط به ۲ ساعت و بدون عامل هسته‌زا و بیشترین آن (۱۹/۲۷ درصد) در ۷۲۰ ساعت با ۴ درصد میکروکریستالین سلولز بوده است.

اثر مستقل عامل هسته‌زا بر جذب آب نتایج نشان داد که درصد میکروکریستالین سلولز بر جذب آب بعد از ۲ و ۷۲۰ ساعت غوطه‌وری در آب معنی‌دار بوده است ($P < 0.05$). شکل‌های ۱۲ و ۱۳ اثر عامل هسته‌زا بر



شکل ۱۲- اثر عامل هسته‌زا بر جذب آب بعد از ۲ ساعت غوطه‌وری

Figure 12. Effect of nucleating agent on water absorption after 2 h of immersion



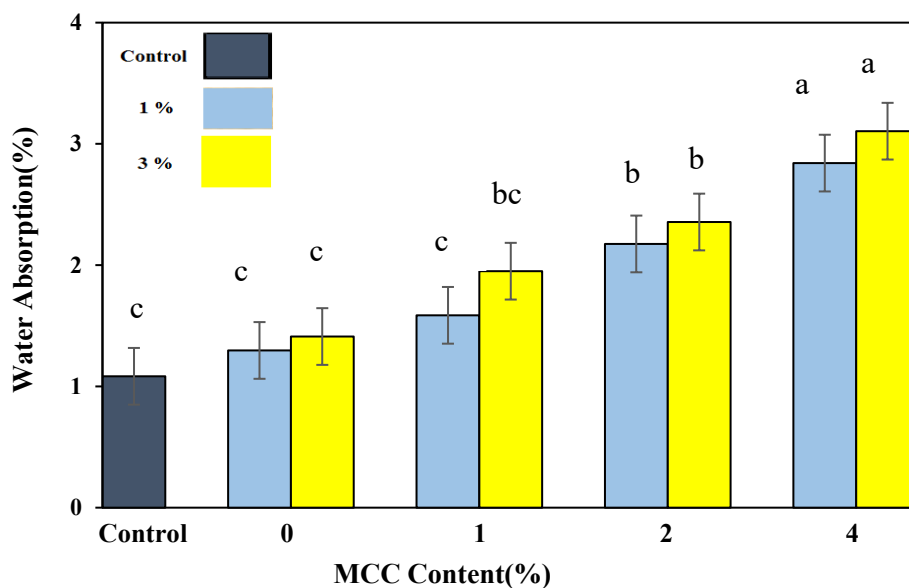
شکل ۱۳- اثر عامل هسته‌زا بر جذب آب بعد از ۷۲۰ ساعت غوطه‌وری

Figure 13. Effect of nucleating agent on water absorption after 720 h of immersion

که مشاهده می‌شود، کم‌ترین جذب آب مربوط به ۲ ساعت و بدون تیمار (۱/۰۸ درصد) و بیشترین آن (۱۹/۳۴ درصد) در ۷۲۰ ساعت با ۳ درصد عامل فوم‌زا و ۴ درصد عامل هسته‌زا بوده است. شکل ۱۶ اثر مدت زمان‌های مختلف را بر روی جذب آب تیمارها نشان می‌دهد.

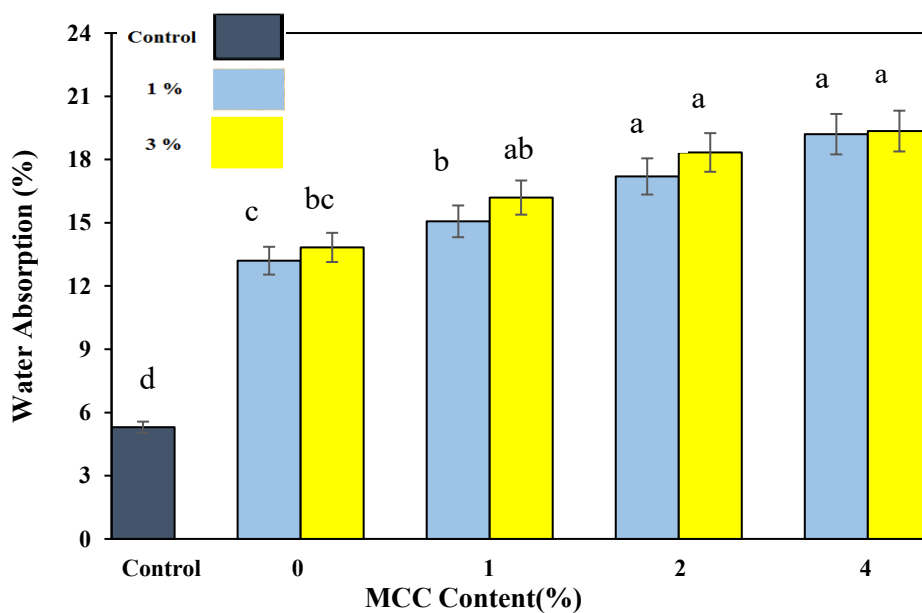
اثر متقابل متغیرها بر جذب آب

نتایج نشان داد که برهم‌کنش عامل فوم‌زا و عامل هسته‌زا بر جذب آب بعد از ۲ ساعت معنی‌دار بوده است و درعین حال، بعد از ۷۲۰ ساعت غوطه‌وری در آب نیز معنی‌دار گردید ($P < 0.05$). شکل‌های ۱۴ و ۱۵ اثر متغیرها را به ترتیب در ۲ و ۷۲۰ ساعت بر روی جذب آب نشان می‌دهند. همان‌طور



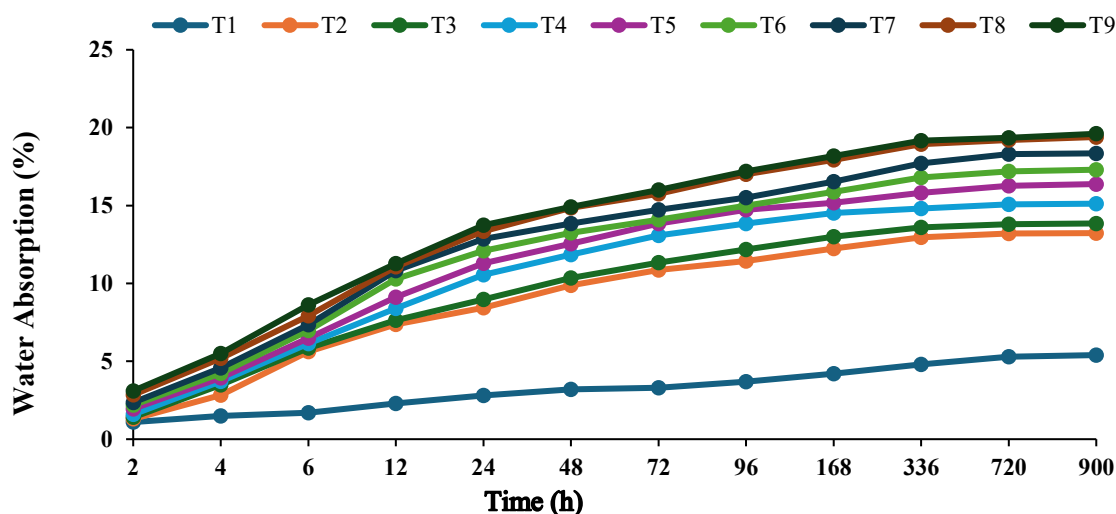
شکل ۱۴- تأثیر متقابل درصد میکروکریستالین سلولز (MCC) بر جذب آب بعد از ۲ ساعت غوطه‌وری

Figure 14. Effect of microcrystalline cellulose (MCC) percentage on water absorption after 2 hours of immersion



شکل ۱۵- تأثیر درصد میکروکریستالین سلولز (MCC) بر جذب آب بعد از ۷۲۰ ساعت غوطه‌وری

Figure 15. Effect of microcrystalline cellulose (MCC) percentage on water absorption after 720 hours of immersion



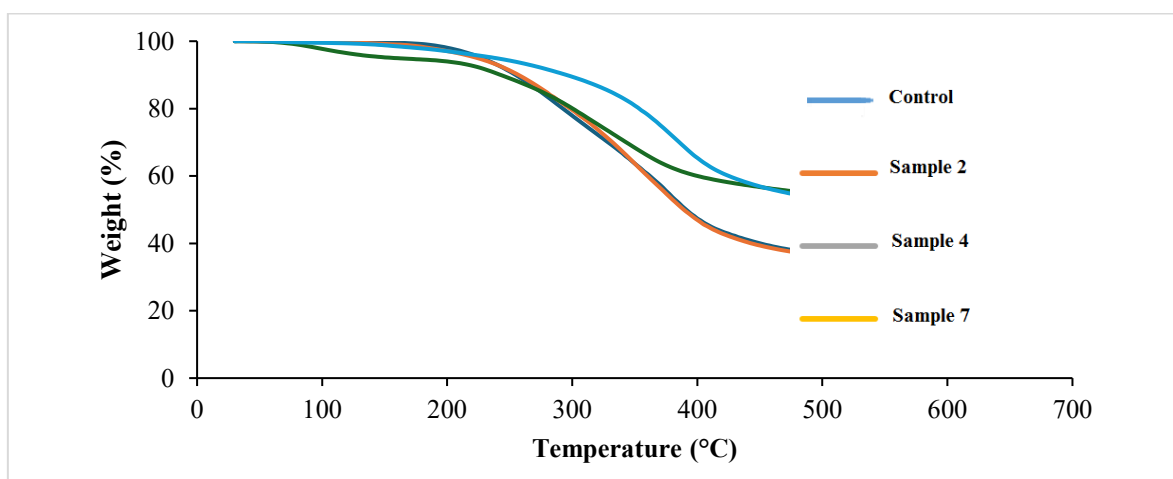
شکل ۱۶- جذب آب تیمارهای مورد مطالعه در زمان‌های متفاوت غوطه‌وری

Figure 16 - Water absorption of the studied treatments at different times of immersion

پلی لاکتیک اسید است، اما با افزودن عامل هسته‌زا (نمونه ۴ و ۷)، دمای تخریب حرارتی افزایش و اُفت وزن حاصل از تخریب حرارتی نمونه‌ها کاهش یافته است. دلیل این موضوع را می‌توان به پایداری حرارتی بیشتر MCC اضافه شده به فوم مرتبط دانست، به‌طوری‌که مواد سلولزی پایداری حرارتی بالاتری در مقایسه با پلی لاکتیک اسید از خود نشان می‌دهند.

نتایج آزمون وزن سنجی حرارتی (TGA)

برای تعیین ویژگی‌های حرارتی فوم‌های تهیه شده، آزمون TGA از نمونه‌هایی که به‌صورت تصادفی انتخاب شده بودند، انجام شد. نتایج این آزمون در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه شاهد و نمونه ۲ تفاوتی از نظر تخریب حرارتی ایجاد نشده است که به معنی اثر نداشتن خواص حرارتی فوم‌های فوم‌شده پانل‌های تهیه شده



شکل ۱۷- نتایج آزمون وزن سنجی گرمایی (TGA) نمونه‌های تهیه شده

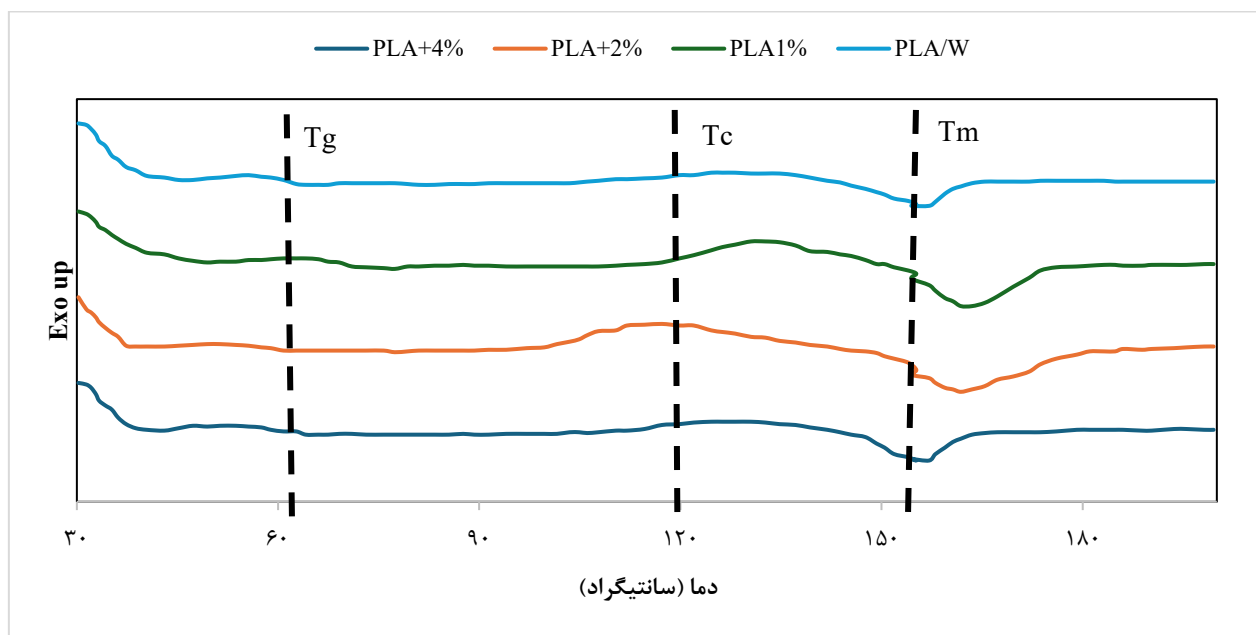
Figure 17 - Results of thermogravimetric analysis (TGA) of prepared samples

نتایج گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)

در این مطالعه خواص حرارتی و رفتارهای کریستالینیه شدن پانل فوم‌های تهیه شده با استفاده از آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی مورد مطالعه قرار گرفتند و نتایج حاصل در شکل ۱۸ نشان داده شده است. دمای شیشه‌ای، دمای ذوب (T_m) و پلی لاکتیک اسید قبل و بعد از اعمال عامل فوم‌زا و بعد از تشکیل کامپوزیت فومی از طریق آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی قابل بررسی است. T_g و T_m پلی لاکتیک اسید و کامپوزیت آن را می‌توان در ترموگرام‌های نمونه‌ها در اولین دوره گرمایش مشاهده کرد.

نتایج نشان داد که در مقایسه با نمونه شاهد، T_g نمونه‌های فوم‌شده، کمی بالاتر بودند. علت این موضوع می‌تواند به تبلور نمونه‌ها در طول تخریب عامل فوم‌زا و گازهای حاصل نسبت داده شود. علاوه بر این، نمونه‌های کامپوزیت فوم‌شده در مقایسه با نمونه‌های عامل فوم‌زا، T_g بالاتری داشتند. در نتیجه،

تحرك و انعطاف زنجیره تحت تأثیر قرار گرفت و انرژی بیشتری برای شکستن حفره‌های تشکیل شده مورد نیاز بود. علاوه بر این، T_g نمونه‌های کامپوزیت فوم شده بالاتر از PLA فوم بود که احتمالاً از محصور شدن مولکول‌های PLA توسط MCC پراکنده ناشی می‌شود. به طوری که تشکیل یک شبکه محکم و سخت از MCC که به دلیل تمایل بالای MCC با پیوند هیدروژنی و درهم تنیدگی‌های متقابل متصل شده بودند. این عوامل به تقویت تشکیل حفره‌ها توسط MCC کمک کردند. در این مورد، درهم تنیدگی‌های متقابل MCC باید در درجه اول مسئول تشکیل شبکه باشد، زیرا پیوندهای هیدروژنی به دلیل پرس داغ محدود شده‌اند. شایان ذکر است که MCC هم سبب افزایش استحکام خمشی و هم مدول PLA شدند. این تفاوت‌ها به ناخالصی بسیار کم و نقص کمتر در MCC مرتبط است.



شکل ۱۸- آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی نمونه‌های تهیه شده

Figure 18 - Differential scanning calorimetry (DSC) of the prepared samples



بحث

ویژگی‌های مکانیکی

در این تحقیق، هر دو عامل مورد مطالعه (مقدار ACA و مقدار MCC) دارای اثر معنی‌دار بر متغیرهای مکانیکی مورد بررسی بودند. با افزایش مقدار ACA نیز مقدار گاز حاصل از تخریب آن نیز افزایش می‌یابد. [Ge](#) و همکاران (۲۰۱۸) گزارشی داده‌اند که مقدار ۱ درصد ACA به عنوان مقدار بحرانی برای استفاده در تولید فوم است و مقدار بیش از آن به دلیل تولید گاز بیشتر منجر به فرار گاز و ایجاد فشار در ماتریس پلیمری و تخریب دیواره سلول‌ها شده و ساختار فوم را تخریب می‌کند، اما در این تحقیق با میزان ۳ درصد ACA نیز مشکلی در تشکیل سلول‌ها و تخریب دیواره آنها مشاهده نشد. دلیل این موضوع را می‌توان به کیفیت ACA و یا دمای تخریب ACA و فرایند تهیه فوم در این تحقیق (انجام چرخه پرس تا فشار گاز ایجاد شده منجر به تخریب سلول‌ها نشود) نسبت داد ([Lendvai et al., 2024](#)). همچنین کاهش مقاومت خمشی را می‌توان به دلیل نقاط ضعیف اتصال در دیواره سلول‌های تشکیل شده دانست که ناشی از خاصیت آب‌دوستی میکروکریتالین سلولز و آب‌گریزی PLA است. افزودن میکروکریتالین سلولز مقاومت خمشی را کاهش داده است. هرچند با افزایش میزان میکروکریتالین سلولز، نقاط هسته-زایی و به تبع آن حجم تخلخل افزایش یافته است اما اختلاط PLA و میکروکریتالین سلولز نیز از کاهش بیشتر مقاومت‌ها جلوگیری کرده است. PLA ذاتاً پلیمری شکننده است و افزودن موادی مانند الیاف سلولزی باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی آن می‌شود اما با ایجاد فوم و شکل‌گیری حفره‌ها در آن مقاومت خمشی کاهش می‌یابد که در این تحقیق نیز این فرضیه تأیید شد ([Plamadiala et al., 2025](#); [Sokhandan et al., 2025](#)). حفره‌ها، به عنوان نقاط تمرکز تنش شناخته می‌شوند. با اعمال نیرو بر نمونه، ترک‌های ریز در نمونه شکل می‌گیرد در نهایت شکست در نمونه اتفاق می‌افتد. مقاومت کششی نمونه شاهد که در آن از عامل فوم‌زا و عامل هسته‌زا استفاده نشده بود، به

میزان ۲۳/۲۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. اُفت مقاومت کششی با افزودن تنها ۱ درصد وزنی آزودی‌کربن آمید مشهود بوده و به مقدار ۱۵/۲۱ مگاپاسکال رسیده است. در تحقیق [Kord](#) (۲۰۱۳) مقاومت کششی متأثر از هسته‌زایی همگن حباب‌های گاز بیان شده است. درواقع در زمانی که حباب‌های گازی شروع به ایجاد حفره در ماتریس پلیمری می‌کنند، پیوند بین ماتریس پلیمری و افزودنی‌ها ضعیف شده و در نهایت مقاومت‌های مکانیکی کاهش پیدا کرده‌اند ([Kord et al., 2011](#))؛ بنابراین مقاومت کششی پانل‌های فوم ساخته شده به مقدار استفاده از عامل فوم‌زا و عامل هسته‌زا بستگی دارد. با افزایش مقدار این دو عامل، تخلخل در پانل افزایش یافته و منجر به ایجاد نقاط تنش بیشتر در پانل ساخته شده می‌شود. با افزایش تخلخل، مقاومت به ضربه با افزایش مقدار ACA و میکروکریتالین سلولز افزایش یافته است. دلیل این موضوع را می‌توان به دو عامل نسبت داد. اول، بیشتر شدن تعداد حفره‌ها در نمونه‌ها (از نمونه ۱ تا نمونه ۹) که منجر به کاهش انتشار ترک و افزایش انرژی مورد نیاز برای انتشار ترک در نمونه شده است. دوم، وجود دیواره‌های سلولی انعطاف‌پذیر در طی ساخت نمونه که انرژی وارد شده را در خود جذب می‌کنند. مقدار تغییر مقاومت به ضربه به ترکیبات فوم و ساختار سلول تشکیل شده بستگی دارد. با کوچک‌تر شدن اندازه سلول‌ها که ناشی از افزایش مقدار ACA و میکروکریتالین سلولز است، مقاومت به ضربه بهبود یافته است ([Shahreki et al., 2021](#)).

[Kiziltas](#) و همکاران (۲۰۱۴) دست یافتند که MCC می‌تواند به عنوان یک ماده تقویت‌کننده کافی برای کامپوزیت‌های کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد. این نتیجه با یافته‌های ارائه شده در این مطالعه هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که علاوه بر کاربرد صنعتی MCC باید آثار محیط‌زیستی این ماده نیز مورد توجه مسئولان قرار گیرد.

ویژگی‌های فیزیکی

در این تحقیق، ایجاد تخلخل از طریق انتشار گاز حاصل از تخریب عامل فوم‌زا تأثیر معنی‌داری بر چگالی پانل‌های ساخته شده داشته است، به‌طوری‌که با افزایش میزان ACA و MCC، علاوه بر میزان گاز حاصل از تخریب عامل فوم‌زا، عامل هسته‌زا منجر به افزایش تعداد حفره‌ها از طریق فرایند هسته‌زایی (افزایش تخلخل) شده است. این موضوع در نهایت منتج به کاهش چگالی پانل شده است و علاوه بر این، میزان جذب آب و به تبع آن واكشیدگی ضخامت نیز به دلیل افزایش تعداد حفره‌ها و افزایش تخلخل در نمونه‌ها افزایش یافته است. ACA و MCC بر تمام ویژگی‌های بررسی شده در این تحقیق اثر معنی‌دار داشته است.

[Asadi_Shahabi](#) و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که افزایش جذب آب رابطه مستقیمی با تعداد سلول‌های ایجاد شده در فوم دارد. میزان جذب آب در نمونه شاهد، بعد از ۷۲۰ ساعت، ۵/۵ درصد مشاهده شد، درحالی‌که در نمونه تهیه شده با ۱ درصد ACA، میزان جذب آب پس از ۷۲۰ ساعت به ۱۳/۲ درصد رسید. افزایش مقدار میکروکریستالین سلولز جذب آب را در پانل افزایش داده است. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود گروه‌های آب‌دوست در ساختار میکروکریستالین سلولز باشد که در مطالعات پیشین ازجمله [Cho](#) و همکاران (۲۰۲۱) نیز مطرح شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده تأثیر مقدار ACA و MCC بر مقدار جذب آب در فوم است. این یافته‌ها در مجموع از این ایده حمایت می‌کنند که سلولز میکروکریستالی، با خواص آب‌دوست خود می‌تواند جذب آب را افزایش دهد. [Yin](#) و همکاران (۲۰۱۷) به نتایج مشابهی با این مطالعه دست یافتند و نشان دادند که MCC آب را در داخل ساختار داخلی خود جذب می‌کند و منجر به تغییراتی در خواص فیزیکی و مکانیکی می‌شود.

این پژوهش نشان داد که تخریب مقدار بیشتر ACA موجب افزایش انتشار میزان گاز می‌شود، به تبع آن جریان این گازها در داخل ماتریس پلیمری منجر به رشد سلول‌های نامنظم پانل می‌شود. برطبق یافته‌های به‌دست آمده، با افزایش

میزان ACA و MCC، میزان گاز و عامل هسته‌زا افزایش می‌یابد که در نهایت موجب افزایش تعداد حفره‌ها و افزایش تخلخل می‌شود. میزان جذب آب و به تبع آن واكشیدگی ضخامت نیز به دلیل افزایش تعداد حفره‌ها و افزایش تخلخل در نمونه‌ها افزایش یافته است. افزایش مقدار میکروکریستالین سلولز جذب آب را در پانل افزایش داده است این موضوع می‌تواند به دلیل وجود گروه‌های آب‌دوست در ساختار میکروکریستالین سلولز باشد. با افزودن ۱ درصد ACA، مقاومت خمشی به مقدار ۲۰ درصد کاهش یافته است و به ۲۵/۰۶ مگاپاسکال رسیده است. به‌نحوی‌که افزودن میکروکریستالین سلولز مقاومت خمشی را کاهش داده است. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روشی نمونه‌های ساخته شده نیز نشان داد با افزایش مقدار ACA، تخلخل داخل بافت فوم افزایش یافته است. به‌طورکلی نتایج این تحقیق نشان داد که خاصیت هسته‌زایی آن در کنترل رشد سلولی و کاهش قطر حفره‌ها مؤثر بوده و می‌توان از آن برای تولید فوم میکروسلولی با کیفیت قابل قبول استفاده نمود.

آزمون‌های حرارتی

نتایج حاصل از آزمون TGA نشان داد که با افزودن عامل هسته‌زا به نمونه‌های مورد مطالعه، دمای تخریب حرارتی افزایش و اُفت وزن حاصل از تخریب حرارتی نمونه‌ها با کاهش قابل توجه همراه بوده است. با توجه به این موضوع، با اضافه شدن میکروکریستالین سلولز (MCC)، پایداری حرارتی نمونه‌های آزمایش به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. آزمون DSC نیز نتایج مشابهی با آزمون TGA به‌دست آمده داشت. برطبق نتایج حاصل از آزمون DSC، با اضافه شدن عامل MCC یک شبکه محکم و مقاوم تشکیل می‌شود که به علت تمایل بالای MCC با پیوند هیدروژنی است. به‌طورکلی، آزمون‌های حرارتی انجام شده در این مطالعه نشان داد که افزودن MCC نقش قابل توجهی در انسجام شبکه و افزایش استحکام آن داشته است. با توجه به این موضوع، خاصیت MCC در هسته‌زایی و تولید فوم

فوم تهیه شده از پلی‌لاکتیک اسید (PLA) و میکروکریستالین سلولز (MCC) انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش مقدار عامل فوم‌زا تا سطح ۳ درصد و عامل هسته‌زا تا سطح ۴ درصد، چگالی پانل فوم ساخته شده تا ۵۲/۴۵ درصد کاهش یافته است. کاهش چگالی همراه با افزایش تخلخل، افزایش جذب آب، افزایش واکنشیدگی ضخامت در تمام سطح تیمارها (۱ تا ۳ درصد عامل فوم‌زا و ۱ تا ۴ درصد عامل هسته‌زا) معنی‌دار بوده است. همچنین، این کاهش چگالی منجر به کاهش مقاومت کششی و خمشی و افزایش مقاومت به ضربه شده است. نتایج به دست آمده حکایت از این دارد که استفاده از عامل فوم‌زا تغییری در دمای شیشه‌ای شدن فوم‌های ساخته شده ندارد، اما اضافه کردن میکروکریستالین سلولز منجر به افزایش دمای شیشه‌ای فوم‌ها شده است. همچنین، نتایج DSC تغییر رفتار کریستالینه شدن فوم‌های ساخته شده را پس از اضافه نمودن میکروکریستالین سلولز نشان داد. به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که خاصیت هسته‌زایی آن در کنترل رشد سلولی و کاهش قطر حفره‌ها مؤثر بوده و می‌توان از آن برای تولید فوم میکروسلولی با کیفیت قابل قبول استفاده نمود. این پژوهش استفاده از میکروکریستالین سلولز (MCC) به عنوان افزودنی دوستدار محیط زیست، زیست تخریب پذیر و ارزان قیمت به منظور بهبود ویژگی‌های پلیمر زیستی PLA در ساخت فوم میکروسلولی را مورد تأکید قرار می‌دهد.

میکروسلولی با کیفیت قابل قبول مورد تأیید قرار می‌گیرد. این نتیجه با مطالعات پیشین از جمله [Ren](#) و همکاران (۲۰۲۳)، [Krapež Tomec](#) و همکاران (۲۰۲۴) و [Khairunnisa](#) و همکاران (۲۰۲۵) نیز همخوانی داشت، به طوری که این مطالعات بر نقش و کاربرد MCC در افزایش شاخص‌های کششی و مقاومت شبکه سلولی تأکید داشتند. [Ren](#) و همکاران (۲۰۲۳) بیان کردند که افزودن ۱ درصد MCC به طور مطلوبی خواص فیلامنت‌های چوب-PLA را تغییر می‌دهد، در حالی که محتوای بالاتر MCC این اثر را ندارد.

در بخش صنعت، میکروکریستالین سلولز (MCC) در تولید کامپوزیت‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده نسبت به پلاستیک‌های خالص زیست تخریب پذیر است و رد پای کربنی کمتری دارد. با وجود این، مطالعات سم‌شناسی نشان می‌دهند که MCC باقی مانده‌ای از لیگنین، فلزات سنگین، یا سایر آلاینده‌ها در محیط زیست برجای نمی‌گذارد ([Lupidi et al., 2023](#); [Sodeifi & Sharifi, 2025](#)). از این رو، در کنار مزایایی که MCC در بخش ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و آزمون‌های حرارتی (TGA و DSC) دارد، باید به آثار محیط‌زیستی این ماده نیز اشاره کرد زیرا این مورد میزان کاربرد MCC را در بخش صنعت افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

References

- Abu Hassan, N.A., Ahmad, S., Chen, R.S. and Shahdan, D., 2020. Cells analyses, mechanical and thermal stability of extruded polylactic acid/kenaf bio-composite foams. *Construction and Building Materials*, 240: 117884. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117884>
- Agbor, V.B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A. and Levin, D.B., 2011. Biomass pretreatment: fundamentals toward application. *Biotechnology advances*, 29: 675-685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.005>
- Aretoulaki, E., Ponis, S., Plakas, G. and Agalianos, K., 2020. A systematic meta-review analysis of review papers in the marine plastic pollution literature, *Marine Pollution Bulletin*, 161: 111690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111690>
- Asadi Shahabi, M., Farrokhpayam, S.R., Nosrati Sheshkal, B., Mohebbi Gargari, R., 2020. The morphological and physico-mechanical properties of wood plastic composite made of polylactic acid polymer. *Forest and Wood Products*, 72: 339-349. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13196-021-00274-4>
- Balasubramanian, M., 2014. *Composite materials and processing*, CRC press Boca Raton, 2014.
- Balla, E., Daniilidis, V., Karlioti, G., Kalamas, T., Stefanidou, M., Bikiaris, N.D., Vlachopoulos, A., Koumentakou, I. and Bikiaris, D.N., 2021. Poly (lactic Acid): A Versatile Biobased Polymer for the Future with Multifunctional Properties From Monomer Synthesis, Polymerization Techniques and Molecular Weight Increase to PLA Applications. *Polymers*, 13(11):1822. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13111822>
- Cho, B.G., Mun, S.B., Lim, C.R., Kang, S.B., Cho, C.W. and Yun, Y.S., 2021. Adsorption modeling of microcrystalline cellulose for pharmaceutical-based micropollutants. *Journal of Hazardous Materials*, 426:128087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128087>
- Dahmardeh Ghalehno, M. and Kord, B., 2021. Preparation, characterization and performance evaluation of wood flour/HDPE foamed composites reinforced with graphene nanoplatelets, *Journal of Composite Materials*, 55: 531-540. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998320954527>
- Dechent, S.E., Kleij, A.W. and Luinstra, G.A., 2020. Fully bio-derived CO₂ polymers for non-isocyanate based polyurethane synthesis, *Green Chemistry*, 22: 969-978. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9gc03488a>
- Ehrenstein, G.W., 2012. *Polymeric materials: structure, properties, applications*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, New York, USA. 2012.
- Ge, Z., Qi, Z., Si, D. and Yu, M., 2018. The effects of processing parameters and ac foaming agent on the mechanical properties and morphology of foamed wood-poly(lactic acid) (PLA) composites, *BioResources*, 13: 1605-1618. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1605-1618>
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M. and Elharfi, A., 2021. Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite structures*, 262: 113640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- Khairunnisa, A., Wistara, N.J. and Fatriasari, W., 2025. The role of microcrystalline cellulose (MCC) in improving paper strength from rice straw pulp. *Int J Biol Macromol.*, 318(Pt 2): 144868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144868>
- Kiziltas, A., Gardner, D.J. and Han, Y., 2014. Mechanical Properties of Microcrystalline Cellulose (MCC) Filled Engineering Thermoplastic Composites. *J Polym Environ.*, 22: 365-372. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-014-0676-5>
- Kord, B., Varshoei, A. and Chamany, V., 2011. Influence of chemical foaming agent on the physical, mechanical, and morphological properties of HDPE/wood flour/nanoclay composites, *Journal of reinforced plastics and composites*, 30: 1115-1124. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684411417200>
- Kord, B., 2013. Effect of nanoclay on thickness swelling behavior in the extrusion foaming of wood flour/polyethylene composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 26: 1303-1316. DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705712439562>
- Krapež Tomec, D., Schöflinger, M., Leßlumer, J., Gradišar Centa, U., Žigon, J. and Kariž, M., 2024. The Effects of Microcrystalline Cellulose Addition on the Properties of Wood-PLA Filaments for 3D Printing. *Polymers*, 16(6):836. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16060836>
- Lendvai, L., Dogossy, G., Jakab, S.K. and Fekete, I., 2024. Foam Injection Molding of Poly(Lactic Acid) with Azodicarbonamide-Based Chemical

- Blowing Agent. Engineering Proceedings, 79(1):1-44. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2024079044>
- Lupidi, G., Pastore, G., Marcantoni, E. and Gabrielli, S., 2023. Recent Developments in Chemical Derivatization of Microcrystalline Cellulose (MCC): Pre-Treatments, Functionalization, and Applications. *Molecules*, 28(5):2009. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28052009>
- Mittal, V., 2011. High performance polymers and engineering plastics, John Wiley & Sons, Berlin, Germany.
- Nofar M. and Park, C.B., 2014. Poly (lactic acid) foaming, *Progress in Polymer Science*, 39: 1721-1741. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.04.001>
- Osswald T.A. and Menges, G., 2012. Materials science of polymers for engineers, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, Sydney, New South Wales, Australia.
- Plamadiala, I., Croitoru, C., Pop, M.A. and Roata, I.C., 2025. Enhancing Polylactic Acid (PLA) Performance: A Review of Additives in Fused Deposition Modelling (FDM) Filaments. *Polymers*, 17(2):191. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17020191>
- Ren, H., Li, S., Gao, M., Xing, X., Tian, Y., Ling, Z., Yang, W., Pan, L., Fan, W. and Zheng, Y., 2023. Preparation and Characterization of Microcrystalline Cellulose/Polylactic Acid Biocomposite Films and Its Application in Lanzhou Lily (*Lilium davidii* var. unicolor) Bulbs Preservation. *Sustainability*, 15(18): 13770. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151813770>
- Sodeifi, B. and Sharifi, S.H., 2025. Investigating the resistance and barrier properties of bio nano composite films of Carboxymethyl chitosan/ Guar gum/ Nanocrystalline cellulose. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 40(2): 149-165. DOI: <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2025.368144.1791>
- Shahreki, A., Nosrati Sheshkal, B., Jonoobi, M., Abdouss, M., Dahmardeh Ghalehno, M., 2021. Poly-capro-lactone/poly-lactic acid/cellulose nano crystal three-component nanocomposites: Manufacturing, mechanical, dynamic-mechanical and morphological investigation. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 12: 217-234.
- Sheldon, R.A., 2014. Green and sustainable manufacture of chemicals from biomass: state of the art, *Green Chemistry*, 16: 950-963. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3gc41935e>
- Simeone, D., Tissot, O. and Luneville, L., 2025. Diffusive first-order phase transition: nucleation, growth and coarsening in solids. *Reports on Progress in Physics*, 88(5): 056501 DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6633/adcbbf>
- Sokhandan, V., Mansouri, H., Dahmardeh Ghalehno, M. and Shamsian, M., 2025. Improving the performance of polyvinyl acetate adhesive in order to increase the strength and stability of tongue and groove joints in traditional beech wood structures. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 40(1): 35-53. DOI: <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2025.366640.1778>
- Spronsen, P.C., Bakhuizen, R., van Brussel, A.A. and Kijne, J.W., 1994. Cell wall degradation during infection thread formation by the root nodule bacterium *Rhizobium leguminosarum* is a two-step process. *European Journal of Cell Biology*, 64(1):88-94.
- Volchko, N.W. and Rutledge, G.C., 2024. Heterogeneous nucleation of polyethylene crystals on binary hexagonal nanoplatelets. *Journal of Materials Science*, 59: 8852-8873. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09683-5>
- Wang, C., Liu, Y., Chen, W.Q., Zhu, B., Qu, S. and Xu, M., 2021. Critical review of global plastics stock and flow data, *Journal of Industrial Ecology*, 25: 1300-1317. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.13125>
- Westman, M.P., Fifield, L.S., Simmons, K.L., Laddha, S., Kafentzis, T.A., 2010. Natural fiber composites: a review. *Pacific Northwest National Laboratory*, 1: 1-10. DOI: <https://doi.org/10.2172/989448>
- Williams, A.T. and Rangel-Buitrago, N., 2022. The past, present, and future of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 176:113429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113429>
- Yin, F., Tang, C., Li, X. and Wang, X., 2017. Effect of Moisture on Mechanical Properties and Thermal Stability of Meta-Aramid Fiber Used in Insulating Paper. *Polymers*, 9(10):537. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym9100537>
- Young R.J. and Lovell, P.A., 2011. Introduction to polymers. 3th Edition, CRC press, New York, USA. 201