

Effect of preservative materials on physical and mechanical properties of wood flour-polyethylene composite

Ahmadreza Rezanazhad^{*1}, Davood Rasouli², Mahdi Mashkour³,
Mehrab Madhoushi⁴, Mohsen Bahmani⁵

1. Corresponding Author, Ph.D. Student in Wood Composite Products, Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: adrand@yahoo.com
2. Assistant Prof., Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: rasouli@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mahdimashkour@gmail.com
4. Professor, Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: madhoushi@gau.ac.ir
5. Associate Prof., Dept. of Wood and Furniture Industry Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: mohsen.bahmani@sku.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 09.22.2024

Revised: 12.25.2024

Accepted: 01.07.2025

Keywords:

High-density polyethylene,
Mechanical properties,
Physical properties,
Preservative materials,
Wood flour-polyethylene
composite

ABSTRACT

Background and Objectives: In recent years, the demand for wood-plastic composites has increased significantly due to their numerous advantages. However, maintaining the mechanical properties, surface quality, and extending the service life of these composites during their useful life has become a major concern within this industry. Weathering and biological factors, especially those arising from the lignocellulosic content in their structure, pose challenges for the exterior application of wood-plastic composites. These factors can lead to color changes, increased hydrophilicity, and deterioration of the physical and mechanical properties of the products. Research indicates that the use of water-soluble preservatives containing copper and chromium can enhance the weather resistance of wood. This study explored the effects of treating wood particles with arsenic-free preservatives (ACC, CCB and ACQ) at various concentration levels on the physical and mechanical properties of wood-polyethylene composites.

Materials and Methods: For this study, high-density polyethylene (50%), maleic anhydride polyethylene (2%), Paulownia wood flour (48%) were utilized to produce the composites. The wood flour was treated with three types of preservatives (ACC, CCB and ACQ) at concentrations of 0%, 0.1%, 0.5% and 1%. Initially, the wood flour was immersed in the preservative solution, followed by storage at 50±5 °C and 90±5% relative humidity to facilitate the fixation of the preservatives. The treated flour was then dried in an oven. The raw materials were mixed using a twin-screw extruder, maintained at a temperature range of 160-170 °C, and the resulting mixture was ground into flour using a hammer mill. The composites were subsequently produced using a hydraulic press at 170 °C under 100 bar pressure for 10 minutes.

Results: The results showed that the preservative ACQ at a concentration of 0.1% negatively affected tensile strength, while positively influencing physical properties. Increasing the concentration resulted in a significant reduction in both flexural and tensile strength, along with increased water

absorption. The CCB preservative demonstrated superior performance, with samples containing CCB exhibiting enhanced mechanical properties; further increases in concentration improved physical properties as well. The ACC preservative displayed similar mechanical behavior to CCB, although lower concentrations yielded better physical properties.

Conclusion: This study demonstrates that selecting the optimal type and concentration of preservative can enhance the mechanical properties and dimensional stability of wood-plastic composites. This advancement offers the potential for producing more durable wood-plastic products with a broader range of applications.

Cite this article: Rezanazhad, Ahmadreza, Rasouli, Davood, Mashkour, Mehdi, Madhoushi, Mehrab, Bahmani, Mohsen. 2024. Effect of preservative materials on physical and mechanical properties of wood flour-polyethylene composite. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (3), 137-158.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2025.22811.2076

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تأثیر مواد حفاظتی بر خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه آرد چوب - پلی اتیلن

احمدرضا رضائزاد^{۱*}، داود رسولی^۲، مهدی مشکور^۳، محراب مدهوشی^۴، محسن بهمنی^۵

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری فرآورده‌های چندسازه چوب، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: adrarnd@yahoo.com
۲. استادیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: rasouli@gau.ac.ir
۳. دانشیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mahdimashkour@gmail.com
۴. استاد گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: madhoushi@gau.ac.ir
۵. دانشیار گروه مهندسی صنایع میلمان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mohsen.bahmani@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: طی سالیان اخیر تقاضا برای استفاده از چندسازه آرد چوب-پلی اتیلن به دلیل مزایای فراوان افزایش یافته است، اما حفظ خصوصیات مکانیکی و کیفیت ظاهری و در مجموع افزایش عمر مفید چندسازه‌های آرد چوب-پلاستیک در طول دوره سرویس از دغدغه‌های امروزه این صنعت می‌باشد. هوازدگی و عوامل بیولوژیکی از مواردی هستند که استفاده از چندسازه آرد چوب-پلاستیک در بیرون از ساختمان را به واسطه مواد لیگنوسولوزی ساختار آن، دچار مشکل می‌کنند. این عوامل سبب ایجاد تغییرات رنگی، افزایش خاصیت آب‌دوستی و کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی فرآورده می‌شوند. مطالعات انجام شده نشان داده که با استفاده از مواد حفاظتی محلول در آب دارای عناصر مس و کروم می‌توان مقاومت به هوازدگی چوب را افزایش داد. در این مطالعه، اثر تیمار ذرات چوب با مواد حفاظتی عاری از آرسنیک (ACC، CCB و ACQ) و میزان غلظت آنها بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه آردچوب-پلاستیک پلی اتیلن سنگین مورد بررسی قرار گرفت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸	
واژه‌های کلیدی: پلی اتیلن دانسیته بالا، چندسازه آرد چوب-پلی اتیلن، خواص فیزیکی، خواص مکانیکی، مواد حفاظتی	مواد و روش‌ها: جهت این پژوهش، از پلیمر پلی اتیلن با دانسیته بالا به میزان ۵۰ درصد، مالنیک انیدرید پلی اتیلن به میزان ۲ درصد و آرد چوب پالونیا به مقدار ۴۸ درصد جهت ساخت چندسازه‌ها استفاده شد. از سه نوع ماده حفاظتی (ACC، CCB و ACQ) با غلظت‌های صفر، ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد جهت تیمار آردهای چوب استفاده شد. بدین منظور، ابتدا آرد چوب در محلول موردنظر غوطه‌ور و در ادامه پس از قرارگیری در دمای 50 ± 5 درجه سانتی‌گراد و

رطوبت نسبی 90 ± 5 درصد جهت تثبیت مواد حفاظتی در آون خشک گردیدند. جهت ساخت نمونه‌ها، ابتدا اختلاط مواد اولیه به کمک دستگاه اکسترودر دو ماردون ناهمسوگرد (با دامنه حرارتی ۱۶۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد) انجام و سپس خروجی حاصل با استفاده از آسیاب چکشی به آرد تبدیل شد و در نهایت با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک (دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۱۰۰ بار در مدت زمان ۱۰ دقیقه پرس گرم) چندسازه‌ها آماده شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تیمار ماده حفاظتی ACQ در ۰/۱ درصد تأثیر منفی در مقاومت کششی و تأثیر مثبت در بهبود ویژگی‌های فیزیکی داشت. با افزایش غلظت این ماده حفاظتی، مدول گسیختگی و کششی به‌طور معنی‌داری کاهش و جذب آب افزایش یافت. ماده حفاظتی CCB رفتار بهتری از خود نشان داد. به‌طوری‌که نمونه‌های حاوی این ماده در اکثر ویژگی‌های مکانیکی دارای وضعیت مطلوب‌تری بوده و حتی با افزایش غلظت آن خصوصیات فیزیکی بهبود یافت. در ویژگی‌های مکانیکی، ماده حفاظتی ACC نیز تقریباً رفتار مشابه با ماده CCB از خود نشان داد، اما این ماده با کاهش غلظت ویژگی‌های فیزیکی بهتری از خود نشان داد.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد که می‌توان با انتخاب بهینه نوع و غلظت مواد حفاظتی، خواص مکانیکی و پایداری ابعادی چندسازه‌های آرد چوب-پلاستیک‌ها را بهبود بخشید و در نتیجه امکان تولید محصولات چندسازه چوب-پلاستیکی بادوام بیش‌تر و کاربردهای گسترده‌تر در صنایع مختلف را فراهم نمود.

استناد: رضائزاد، احمدرضا، رسولی، داود، مشکور، مهدی، مدهوشی، محراب، بهمنی، محسن (۱۴۰۳). تأثیر مواد حفاظتی بر خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه آرد چوب - پلی‌اتیلن. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۱ (۳)، ۱۵۸-۱۳۷.

DOI: 10.22069/JWFST.2025.22811.2076



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

چندسازه‌های چوب-پلاستیک (WPC)^۱ به موادی اطلاق می‌شود که از ترکیب مواد لیگنوسلولزی (به شکل الیاف یا ذرات مانند آرد و الیاف چوب، کتان، کنف، بامبو، کاه و کلش) با محدوده وسیعی از پلیمرها (مانند پلی پروپیلن، پلی اتیلن، پلی ونیل استیل و ...) و افزودنی‌ها (مانند روان‌کننده، جفت‌کننده، رنگدانه، ضد خوردگی، ضد اشعه فرابنفش و ضد میکروبی) به کمک فرآیندهایی مانند اکستروژن، تزریق و ... تولید می‌شوند (۱ و ۲). امروزه استفاده از چندسازه‌های چوب-پلاستیک، به علت مزایای فراوان آن‌ها، به شدت افزایش یافته است. این محصول در فضای باز، محیط‌های داخلی و همچنین صنعت خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳).

استفاده از مواد لیگنوسلولزی به عنوان پرکننده و تقویت‌کننده در ماتریس پلیمری به واسطه مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، از سوی مراکز تحقیقاتی و صنایع (ساختمانی و اتومبیل‌سازی) مورد استقبال زیادی قرار گرفته است (۴). الیاف لیگنوسلولزی به دلیل ویژگی‌هایی مانند دانسیته کم، قابلیت تجدیدپذیری، زیست‌تخریب‌پذیری، سهولت دسترسی و هزینه کم در بسیاری از موارد جایگزین الیاف مصنوعی در ساخت چندسازه‌های بر پایه پلاستیک شده‌اند، اما در مقابل استفاده از این مواد به دلیل ماهیت آبدوستی خود، باعث سازگاری ضعیف با مواد پلیمری آبریز شده و این امر موجب کاهش برخی خواص فیزیکی، مکانیکی و همچنین تخریب‌پذیری بیش‌تر در برابر عوامل بیولوژیک و هوازگی می‌گردد (۵ و ۶).

مطالعات نشان داده با اصلاح ساختار ذرات چوب جهت افزایش مقاومت در برابر عوامل بیولوژیک و هوازگی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

چندسازه‌های چوب پلاستیک نیز دستخوش تغییرات می‌گردد (۷). دهمرده و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی اعلام کردند استفاده از آرد چوب تیمار حرارتی شده به دلیل کاهش تعداد گروه‌های هیدروکسیل دیواره سلولی موجب بهبود ثبات ابعادی و همچنین باعث کاهش خواص مکانیکی به دلیل تشکیل اسید فرمیک و اسید استیک ناشی از تخریب همی‌سلولز در چندسازه چوب-پلاستیک می‌گردد (۸). Segerholm و همکاران (۲۰۱۲) عنوان نمودند که چندسازه‌های چوب-پلاستیک ساخته‌شده با آرد چوب استیل شده بعد از قرار گرفتن در شرایط رطوبتی، از ترک‌های سطحی کم‌تری برخوردار شدند. این ترک‌ها به دلیل جابجایی ترکیبات چوب تحت تأثیر رطوبت ایجاد می‌شوند (۹). بر همین اساس، اسماعیلی مقدم (۲۰۱۶) در مطالعه تأثیر اصلاح شیمیایی آرد چوب توسط اسید استیک، بنزیل کلرید و هیدروکسید سدیم بر جذب آب طولانی‌مدت و واکنش‌دهی ضخامت طولانی‌مدت و ریخت‌شناسی چندسازه چوب-پلاستیک گزارش کردند که در اثر اصلاح شیمیایی آرد چوب، جذب آب طولانی‌مدت و واکنش‌دهی ضخامت طولانی‌مدت، ضریب انتشار رطوبت و نرخ واکنش‌دهی ضخامت در چندسازه چوب-پلاستیک کاهش یافت (۱۰). Kord و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی تأثیر اصلاح شیمیایی آرد چوب توسط روش‌های استیل‌اسیون، بنزیلاسیون و مرسیزاسیون بر نانو کامپوزیت‌های چوب پلاستیک حاوی نانورس پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که اصلاح شیمیایی آرد چوب باعث افزایش مقاومت‌های مکانیکی شامل مقاومت کششی، مدول کششی و مقاومت به ضربه و کاهش جذب آب طولانی‌مدت و واکنش‌دهی ضخامت می‌گردد (۱۱). در مطالعه‌ای دیگر، Dominkovics و همکاران (۲۰۰۷) اعلام نمودند که اصلاح آرد چوب با بنزیلاسیون، سبب

1- Wood Plastic Composite (WPC)

چوب-پلاستیک مستلزم مطالعه تأثیر آن بر سایر ویژگی‌های کاربردی مانند خصوصیات مکانیکی و فیزیکی می‌باشد. بنابراین در این پژوهش تأثیر تیمار ذرات چوب با استفاده از مواد حفاظتی ACC، ACQ و CCB بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه آرد چوب- پلی‌اتیلن با هدف مشخص کردن امکان انجام فاز دوم مطالعه (مقاومت به هوازدهی و عوامل بیولوژیک) انجام گردید.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه و آماده‌سازی آن: برای انجام این پژوهش، پلیمر پلی‌اتیلن با دانسیته بالا (HDPE)، با شاخص جریان مذاب ۱۸ گرم در ۱۰ دقیقه و دانسیته ۰/۹۵۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب محصول شرکت پتروشیمی جم، مالئیک انیدرید جفت شده با پلی‌اتیلن با شاخص جریان مذاب ۱/۶ گرم در ۱۰ دقیقه و میزان مالئیک انیدرید یک درصد از شرکت کیمیا جاوید سپاهان تهیه شد. آرد چوب مورد استفاده در این پژوهش، از چوب پالونیا فورتنونی (*Paulownia fortunei*) تهیه شد که از طرح جنگلداری شصت‌کلاته گرگان تأمین شد. پس از قطع درخت، نمونه‌ها در هوای آزاد خشک و سپس به آرد چوب ۴۰ مش (از ۴۰ مش عبور کرده و روی مش ۶۰ باقی مانده است) تبدیل شد. عوامل متغیر این پژوهش شامل مواد حفاظتی عاری از آرسنیک (ACC، CCB و ACQ-B) و میزان غلظت آن‌ها در چهار سطح (صفر، ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد) بودند. سایر عوامل مانند میزان پلیمر HDPE (۵۰ درصد)، نوع و مقدار ماده جفت‌کننده (مالئیک انیدرید پلی‌اتیلن به میزان ۲ درصد) ماده پرکننده چوبی (۴۸ درصد) و شرایط ساخت جز عوامل ثابت این مطالعه بودند.

افزایش خواص فیزیکی چندسازه چوب-پلاستیک حاصل گردیده است درحالی‌که مقاومت‌های مکانیکی با افزایش درجه اصلاح، اندکی کاهش را نشان داد. استفاده از مواد حفاظتی چوب نیز روش دیگری است که جهت افزایش عمر مفید چندسازه‌های چوب-پلاستیک مورد استفاده قرار گرفته است (۱۲). در پژوهشی Kamdem و همکاران (۲۰۰۴)، امکان استفاده از پلاستیک بازیافتی پلی‌اتیلن و ذرات چوب بازیافتی حاصل از چوب‌آلات تیمار شده با ماده حفاظتی CCA را جهت ساخت چندسازه چوب-پلاستیک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی ذرات چوب بازیافتی تیمار شده با CCA، خواص خمشی و دوام بیولوژیکی بیش‌تری نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده با ذرات چوب بکر را دارند. هرچند استفاده از CCA باعث افزایش خواص چندسازه چوب-پلاستیک گردید (۶).

امروزه استفاده از مواد حفاظتی که حاوی آرسنیک هستند به دلیل مشکلات زیست‌محیطی ممنوع گردیده است، مواد حفاظتی عاری از آرسنیک مانند کوتاه‌تر مس قلیایی (ACQ)^۱ اسید کرومات مس (ACC)^۲ و مس کروم بور (CCB)^۳ به دلیل مشکلات کم‌تر زیست‌محیطی گزینه مناسبی جهت حفاظت چندسازه‌های چوب-پلاستیک در برابر عوامل بیولوژیک و هوازدهی باشند. به طوری‌که در مطالعات صورت گرفته این نوع مواد حفاظتی کارایی بسیار مناسبی را در حفاظت چوب و فرآورده‌های چوبی از خود نشان داده‌اند. با وجود این، تاکنون مطالعه‌ای در خصوص تأثیر این نوع مواد حفاظتی بر ویژگی‌های چندسازه‌های چوب-پلاستیک صورت نگرفته است. از آنجایی‌که توصیه کاربردی برای استفاده از مواد حفاظتی جهت بهبود مقاومت‌های بیولوژیکی و هوازدهی چندسازه‌های

- 1- Alkaline copper quaternary (ACQ)
- 2- Acid copper chromate (ACC)
- 3- Chromium copper boron (CCB)

آغشته‌سازی و تثبیت محلول روی آرد چوب: ابتدا ذرات آرد چوب به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و خشک شدند. در مرحله بعد آرد چوب خشک‌شده در محلول‌های با غلظت ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شدند (شکل ۱). سپس، آرد چوب آغشته شده بر روی صافی قرار داده شدند و محلول حفاظتی جذب نشده خارج گردید (شکل ۲). جهت تثبیت مواد حفاظتی روی آرد چوب، آن‌ها را به مدت دو هفته در ژرمیناتور، تحت شرایط رطوبت نسبی 90 ± 5 درصد و دمای 50 ± 5 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و در نهایت جهت خشک شدن به مدت ۴۸ ساعت در دمای ثابت ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

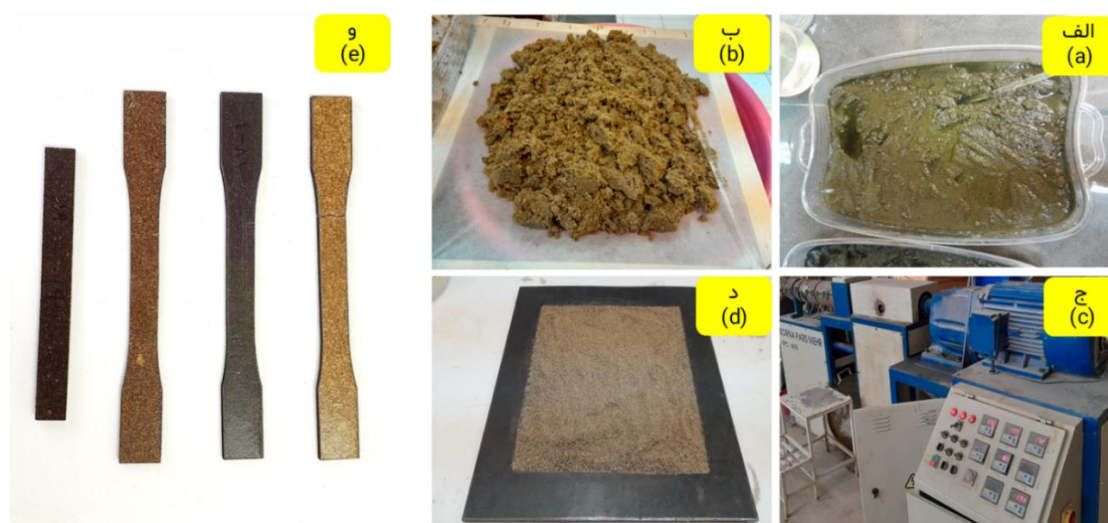
میزان جذب ماده حفاظتی توسط آرد چوب: با توجه به وزن خشک قبل و بعد از اشباع آرد چوب، میزان جذب ماده حفاظتی برای هر یک از تیمارها با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$\text{غلظت محلول ماده حفاظتی (درصد)} \times \frac{\text{اختلاف وزن خشک و بعد از اشباع آرد چوب (کیلوگرم)}}{\text{وزن اولیه آرد چوب (کیلوگرم)}} = \text{میزان جذب ماده حفاظتی توسط آرد چوب (درصد)}$$

به کمک آسیاب آزمایشگاهی به ذرات کوچک‌تر تبدیل گردید. در نهایت، با استفاده از قالب فلزی به ابعاد $3 \times 250 \times 250$ میلی‌متر (شکل ۳) نمونه‌های آرد چوب-پلی‌اتیلن به کمک دستگاه پرس هیدرولیک (دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۱۰۰ بار و مدت زمان ۱۰ دقیقه) ساخته شدند. شایان ذکر است عملیات خنک‌سازی پرس توسط جریان آب داخل مجاری صفحات پرس انجام گردید.

تهیه محلول‌های حفاظتی: در این پژوهش، از سه ماده حفاظتی (ACC، ACQ، CCB) در سه سطح غلظت ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد بر پایه اکسیدهای فلزی مطابق با استاندارد AWPA 1988 آمریکا تهیه شدند. جهت تهیه محلول ماده حفاظتی ACC (۳۱/۸ درصد اکسید مس و ۶۸/۲ درصد اسید کرومیک)، از سه ماده اسید کرومیک، دی‌کرومات پتاسیم و سولفات مس پنج آبه استفاده شد. محلول CCB با استفاده از ۲۸/۷ درصد اسیدبوریک، ۳۷/۳ درصد دی‌کرومات پتاسیم و ۳۴ درصد سولفات مس پنج آبه تهیه گردید. جهت تهیه محلول ACQ-B، از نسبت مولی مس به اتانول آمین ۱:۵ استفاده و میزان آلکیل‌دی‌متیل‌بنزیل‌آمونیم کلراید (ADBAC) با نسبت مولی ۱:۴ اکسید مس بود. برای تهیه محلول، ابتدا مونواتانول‌آمین در آب مقطر حل شد. سپس، کربنات مس به محلول فوق اضافه و پس از انحلال کامل کربنات مس، محلول ADBAC به محلول اضافه گردید.

تهیه چندسازه آرد چوب-پلاستیک: جهت ساخت چندسازه آرد چوب-پلی‌اتیلن از دستگاه اکسترودر دو ماردون ناهمسوگرد با دامنه حرارتی ۱۶۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، به نحوی که برای المنت‌های ابتدایی و انتهایی (۱ و ۶) دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد، المنت‌های شماره ۲ و ۵ دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد و دو المنت وسطی (۳ و ۴) دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد (شکل ۱). مواد خروجی پس از خنک شدن توسط آسیاب چکشی خرد و در ادامه



شکل ۱- مراحل ساخت نمونه‌های چندسازه آرد چوب-پلی اتیلن. (الف) تیمار ذرات چوب با مواد حفاظتی، (ب) ذرات چوب تیمار شده، (ج) دستگاه اکسترودر، (د) آماده‌سازی قالب پرس و (و) نمونه‌های آزمونی.

Figure 1. Steps of producing wood flour-polyethylene composite samples. (a) Treatment of wood particles with protective materials, (b) treated wood particles, (c) extruder machine, (d) preparation of the press mold and (f) Test samples.

جدول ۱- تیمارهای پژوهش و جزئیات آن‌ها.

Table 1. Research treatments and their details.

غلظت ماده حفاظتی (درصد) Preservative concentration (%)	نوع محلول حفاظتی Preservative solution	کد تیمار Treatment No.
-	شاهد (فاقد ماده حفاظتی) (Control)	C
0.1	ACC	AC 1
0.5	ACC	AC 2
1	ACC	AC 3
0.1	ACQ	AQ 1
0.5	ACQ	AQ 2
1	ACQ	AQ 3
0.1	CCB	CC 1
0.5	CCB	CC 2
1	CCB	CC 3

و به‌طور ثابت بر نمونه‌ها اعمال شد. این آزمون با استفاده از دستگاه آزمون مکانیکی SANTAM انجام شد. آزمون مقاومت کششی طبق استاندارد ASTM D638-03 انجام شد (۱۵). نمونه‌های کششی با استفاده از دستگاه آزمون مکانیکی COMTECH مدل B1 ساخت تایوان سرعت

آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی: آزمون جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت طولانی مدت نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D 570-98 انجام شد (۱۳). آزمون خمش برای تعیین مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) مطابق با استاندارد ASTM D 790-10 انجام شد (۱۴). سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه

AQ 1، شاهد جذب ۰/۴۲ درصد، تیمار AQ 2 ۱/۹۹ درصد و تیمار AQ 3 ۳/۹ درصد ماده حفاظتی در آرد چوب بود. این میزان جذب مواد حفاظتی در تیمار AC 1 ۰/۳۹ درصد، تیمار AC 2 ۱/۹۴ درصد، تیمار AC 3 ۳/۷۵ و در تیمار CC 1 ۰/۴ درصد، تیمار CC 2 ۱/۹۷ درصد و تیمار CC 3 ۳/۷۵ درصد مشاهده گردید. افزایش میزان جذب ماده حفاظتی ACQ نسبت به مواد حفاظتی ACC و CCB به دلیل خاصیت قلیایی این ماده است که موجب نفوذپذیری بهتر آن به داخل دیواره سلولی و متعاقباً جذب بیش تر می گردد، در حالی که ACC و CCB دارای خاصیت اسیدی دارند. آنالیز داده ها با استفاده از طرح کاملاً تصادفی انجام و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

بارگذاری ثابت ۵ میلی متر بر دقیقه تحت آزمون قرار گرفتند.

روش تجزیه و تحلیل آماری: به منظور مقایسه بین تیمارها از آزمون یک طرفه ANOVA و در قالب طرح کاملاً تصادفی (نرم افزار SPSS 23) استفاده و در صورت معنی دار شدن از آزمون دانکن برای مقایسات میانگین استفاده شد.

نتایج و بحث

میزان جذب ماده حفاظتی توسط آرد چوب: نتایج به دست آمده از میزان درصد جذب سه ماده حفاظتی CCB، ACQ و ACC توسط آرد چوب، تفاوت اندکی را نشان می دهد، بیش ترین میزان جذب در تیمارهای ACQ مشاهده شد. به طوری که در تیمار

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) اثر تیمارهای مختلف بر آزمون های مکانیکی.

Table 2. Analysis of variance (ANOVA) results of the effect of different treatments on mechanical tests.

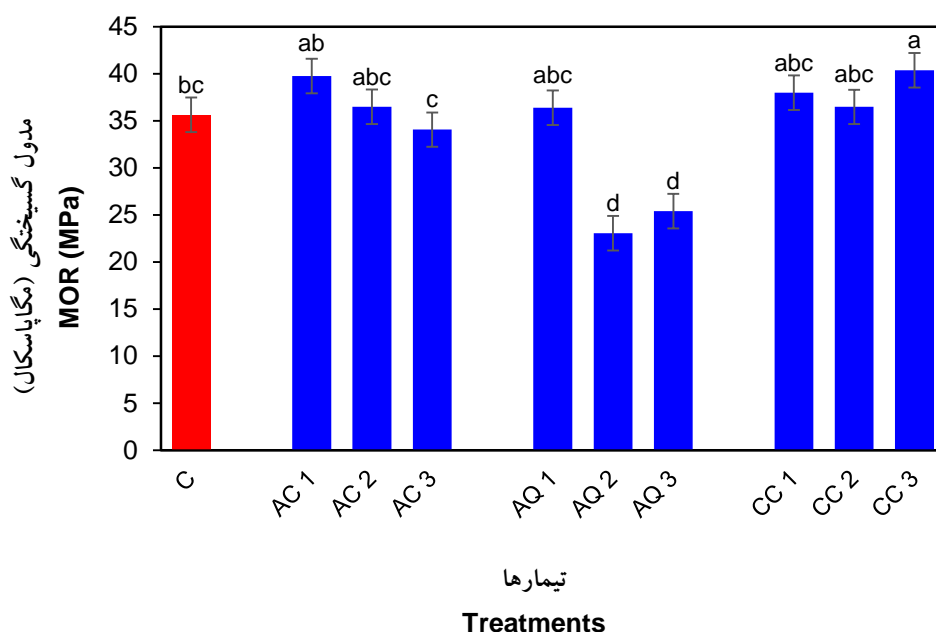
تفاوت Differences	Sig.	مقدار F F value	میانگین مربعات M.S	درجه آزادی D.F	آزمون (Test)
**	0.000	16.344	206.214	9	مدول گسیختگی MOR
			12.617	54	
				63	
**	0.006	3.105	406372.242	9	مدول الاستیسیته خمشی Modulus of bending elasticity
			625285.160	43	
				52	
**	0.000	23.400	78.207	9	مقاومت کششی Tensile strength
			3.342	54	
				63	
**	0.001	3.878	1085759.054	9	مدول الاستیسیته کششی Modulus of tensile elasticity
			1462294.933	47	
				56	

** معنی دار در سطح احتمال ۱٪

** Significant differences in level 1%

مدول گسیختگی: با توجه به شکل ۲ و نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) می‌توان بیان کرد که استفاده از تیمار CC 3 تأثیر معنی‌داری بر مدول گسیختگی نسبت به نمونه‌های شاهد داشته به طوری که با مقدار ۴۰/۳۷ مگاپاسکال، بیش‌ترین مدول گسیختگی را بین تمام تیمارها دارد، این امر می‌تواند بیانگر تأثیر مثبت CCB در بهبود خواص مکانیکی چندسازه آرد چوب-پلاستیک باشد. اسید بوریک موجود در ساختار CCB به‌عنوان پلی بین زنجیره‌های پلیمری در فرآورده عمل می‌کند و فضای خالی بین اجزاء ساختار را کاهش می‌دهد و بدین‌ترتیب باعث افزایش مدول گسیختگی می‌گردد. بررسی نتایج نشان داد سایر غلظت‌های این تیمار بر مدول گسیختگی تأثیر معنی‌داری نسبت به نمونه‌های شاهد ندارد. بررسی تأثیر ماده حفاظتی ACC بر مدول گسیختگی حاکی از آن است که استفاده از این ماده از نظر آماری تأثیر معنی‌داری نسبت به نمونه‌های شاهد ایجاد نمی‌کند، هرچند با افزایش غلظت ACC، مدول گسیختگی چوب-پلاستیک اندکی کاهش می‌یابد، اما از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد ندارد. علت کاهش در غلظت بیش‌تر می‌تواند به این دلیل باشد که محلول اسیدی به‌واسطه واکنش با همی‌سلولزها تحت واکنش هیدرولیتیک قرار می‌گیرد و دیواره سلولی را اکسید و در نتیجه خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد (۱۶). بر همین اساس، Winandy و همکاران (۲۰۰۱)، بیان نمودند که ماهیت اسیدی مواد

حفاظتی چوب باعث کاهش خواص مکانیکی چوب به دلیل هیدرولیز اجزای چوب می‌شود، اما استفاده از درصد کم‌تر این مواد محافظتی به دلیل افزایش ضریب حرارتی رسوبات جامد غنی از مس-کروم موجود در دیواره سلولی چوب می‌تواند تا حدودی تأثیر مثبت بر مدول گسیختگی نسبت به نمونه‌های شاهد ایجاد کند (۱۳). تأثیر غلظت تیمار ACQ بر مدول گسیختگی متفاوت است، به نحوی که استفاده از AQ 1 تأثیر معنی‌داری نسبت به نمونه‌های شاهد ایجاد نمی‌کند، در صورتی که استفاده از غلظت‌های بیش‌تر سبب کاهش معنی‌دار مدول گسیختگی گردید. مطالعات نشان داده‌اند که یون‌های مس با گروه‌های عاملی مانند کربوکسیل، کربونیل و هیدروکسیل فنلی واکنش داده (۱۷) و از طریق برهمکنش‌های یون-یون یا دوقطبی-دوقطبی به چوب متصل و تثبیت می‌شوند (۱۸). اعمال حرارت (اکسترودر)، باعث تغییرات مختلف در ساختار چوب شده و بر یون مس موجود در چوب تیمار شده نیز تأثیر می‌گذارد و باعث تضعیف پیوندهای بین اجزای چندسازه می‌شود (۱۹). اتانول‌آمین موجود در ACQ و عملیات حرارتی (در مرحله اکسترودر شدن) با تأثیرگذاری روی ساختار دیواره سلولی چوب سبب تضعیف و شکنندگی آن می‌شوند و مدول گسیختگی را در تیمار ACQ به‌خصوص در غلظت بیش‌تر کاهش می‌دهند (۲۰).



شکل ۲- اثر تیمارهای مختلف حفاظتی بر مدول گسیختگی چندسازه آرد چوب- پلی اتیلن.

Figure 2. The effect of different preservative treatments on the MOR of wood flour-polyethylene composite.

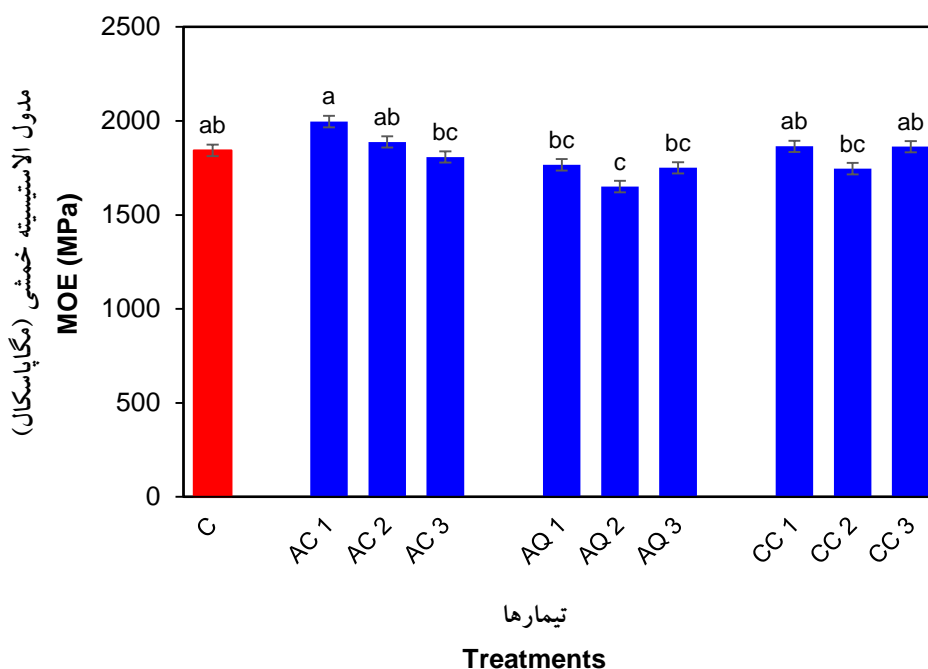
دادند که استفاده از غلظت زیاد ماده حفاظتی ACC سبب کاهش MOE چوب می شود (۲۲). بررسی نتایج تیمار ACQ نشان داد که استفاده از این تیمار باعث کاهش معنی دار مدول الاستیسیته نسبت به نمونه های شاهد گردید. در این تیمار میزان غلظت تأثیری بر MOE ندارد به نحوی که AQ 1 و AQ 3 نسبت به نمونه های شاهد در یک سطح قرار دارند. می توان گفت که پیوندهای هیدروژنی موجود در ACQ می توانند بین گروه های هیدروکسیل در سلولز و نیتروژن موجود در آمین تشکیل شوند و در نتیجه کمپلکس های مس-آمین-سلولز ایجاد شود (۲۳) و بدین ترتیب تأثیر منفی یون های فلزی را بر اتصالات MAPE را جبران نماید. استفاده از تیمار CCB نیز تأثیر معنی دار بر مدول الاستیسیته ندارد به نحوی که همه تیمارها نسبت به نمونه های شاهد در یک سطح قرار دارند، هرچند CC 2 کمترین مقدار مدول الاستیسیته را در این تیمار دارد.

مدول الاستیسیته خمشی: بررسی نتایج اثر تیمارهای مختلف حفاظتی بر مدول الاستیسیته خمشی چوب- پلی استیک در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که استفاده از مواد حفاظتی تأثیر معنی داری بر مدول الاستیسیته خمشی چندسازه آرد چوب- پلی استیک ندارد ($P < 0.05$) و غیر از AQ2 که با مقدار ۱۶۵۰/۷ مگاپاسکال از کمترین MOE برخوردار است، سایر تیمارها با نمونه های شاهد در یک سطح قرار دارند که با نتایج پژوهش Yang و همکاران (۲۰۰۷) مطابقت دارد (۲۱).

بررسی نتایج تیمار ACC نشان داد، غلظت تیمار با مدول الاستیسیته رابطه عکس دارد و با افزایش غلظت ACC، مقدار MOE دچار کاهش می شود، به طوری که AC 3 با مقدار ۱۸۰۸/۱ مگاپاسکال، دارای کمترین مدول الاستیسیته در این تیمار می باشد. این امر می تواند بیانگر تأثیر منفی افزایش غلظت مواد حفاظتی بر مدول الاستیسیته چوب باشد، همان طور که Aguayo و همکاران نیز در پژوهشی گزارش

حفاظتی محلول در آب در غلظت‌های بیش‌تر، خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد، زیرا این مواد به‌طور فیزیکی با اجزای سلولی چوب واکنش می‌دهند که اثر آن‌ها به شیمی سیستم و شدت واکنش تثبیت مربوط می‌شود (۲۵).

Lebow (۲۰۱۰)، گزارش کرد که اکثر مواد حفاظت چوب تأثیر قابل‌توجهی بر MOE چوب تیمار شده ندارند. این اثرات به ماهیت مواد شیمیایی، درجه برهمکنش بارز ساختار، pH مواد شیمیایی و ... بستگی دارد (۲۴). به‌طورکلی تیمار چوب با مواد



شکل ۳- اثر تیمارهای مختلف حفاظتی بر مدول الاستیسیته خمشی چندسازه آرد چوب- پلی اتیلن.

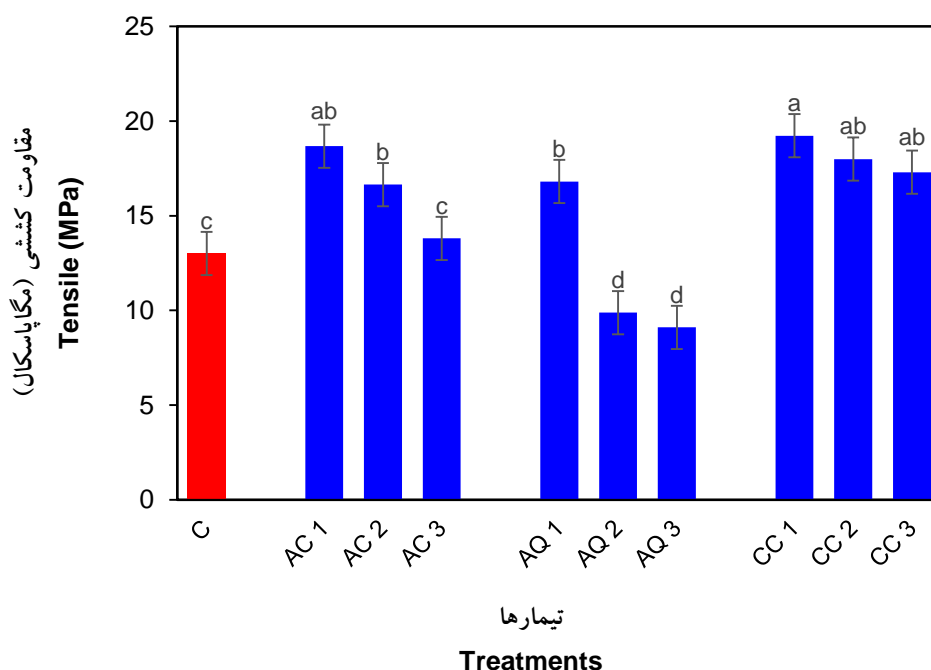
Figure 3. The effect of different preservative treatments on the MOE of woo wood flour-polyethylene composite.

مقاومت‌ها، زاویه تماس آب را نیز افزایش دهد. بدین ترتیب خاصیت غیرقطبی بودن چوب افزایش یافته و این امر سبب سازگاری بیش‌تر با پلی اتیلن و ایجاد پیوندهای قوی‌تر می‌شود و این موضوع احتمالاً می‌تواند دلیلی بر افزایش مقاومت و بهبود خواص مکانیکی در این تیمار باشد (۲۶ و ۲۷). در تیمار CCB افزایش غلظت با مقاومت کششی رابطه معکوس دارد و با افزایش آن مقاومت کششی کاهش می‌یابد، به‌نحوی که CC 3 کم‌ترین میزان مقاومت کششی را به مقدار ۱۷/۳۱ مگاپاسکال دارد. نتایج حاصل از اثر تیمار ACC بر مقاومت کششی نمونه‌ها

مقاومت کششی: نتایج بررسی اثر تیمارهای مختلف حفاظتی بر مقاومت کششی نمونه‌های چوب- پلاستیک در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که مواد حفاظتی مختلف تأثیر معنی‌داری بر مقاومت کششی چوب- پلاستیک دارند ($P < 0.05$). به‌طوری‌که CC 1 بیش‌ترین مقاومت کششی را بین همه تیمارها به مقدار ۱۹/۲۲ مگاپاسکال دارد. اسید بوریک موجود در این تیمار با ایجاد واکنش با سلولز می‌تواند با تشکیل پیوندهای عرضی، در دسترس بودن گروه‌های هیدروکسیل آزاد را کاهش دهد که ضمن افزایش

پیوندهای قوی مواد اتصال‌دهنده بین اجزای ذرات چوب خواهد شد (۲۸). از طرف دیگر می‌توان گفت با افزایش غلظت ماده حفاظتی، یون‌های فلزی مانند یون مس به‌صورت کاتیون فلزی، به‌طور فراوان در دسترس قرار می‌گیرند که این امر موجب اختلال در برهمکنش‌های گروه‌های عاملی و MAPE می‌شود و احتمالاً بدین ترتیب موجب کاهش مقاومت‌ها می‌شوند (۲۹). استفاده از مواد حفاظتی ACC، CCB و ACQ با غلظت کم، باعث بهبود مقاومت کششی چوب-پلاستیک نسبت به نمونه‌های شاهد شد زیرا این مواد با افزایش پیوندهای داخلی، مقاومت کلی مواد را تقویت می‌کنند. در این خصوص، ماده CCB بهتری نسبت به ACQ و ACC است. باین‌حال، استفاده از مقادیر زیاد این مواد منجر به کاهش مقاومت کششی شد.

نشان داد با افزایش غلظت، مقاومت کششی اندکی کاهش می‌یابد، به‌نحوی که AC 1 با مقدار ۱۸/۶۸ مگاپاسکال مقاومت کششی و AC 3 با مقدار ۱۳/۸۱ مگاپاسکال بیش‌ترین و کم‌ترین مقاومت کششی را در این تیمار دارند. بررسی نتایج حاصل از اثر تیمار ACQ بر مقاومت کششی چندسازه آردچوب-پلاستیک بیانگر آن است که استفاده از تیمار AQ 1 موجب افزایش معنی‌داری نسبت به نمونه‌های شاهد گردیده است، اما با افزایش میزان غلظت تیمار، مقاومت کششی به شکل معنی‌داری نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش می‌یابد، به‌نحوی که AQ 3 با مقدار ۹/۱ مگاپاسکال، کم‌ترین مقاومت کششی را در این تیمار دارد ($P < 0.05$). افزایش غلظت مواد حفاظتی سبب رسوب مواد معدنی آن‌ها بر ساختار چوب می‌شود که این امر مانع برقراری ایجاد

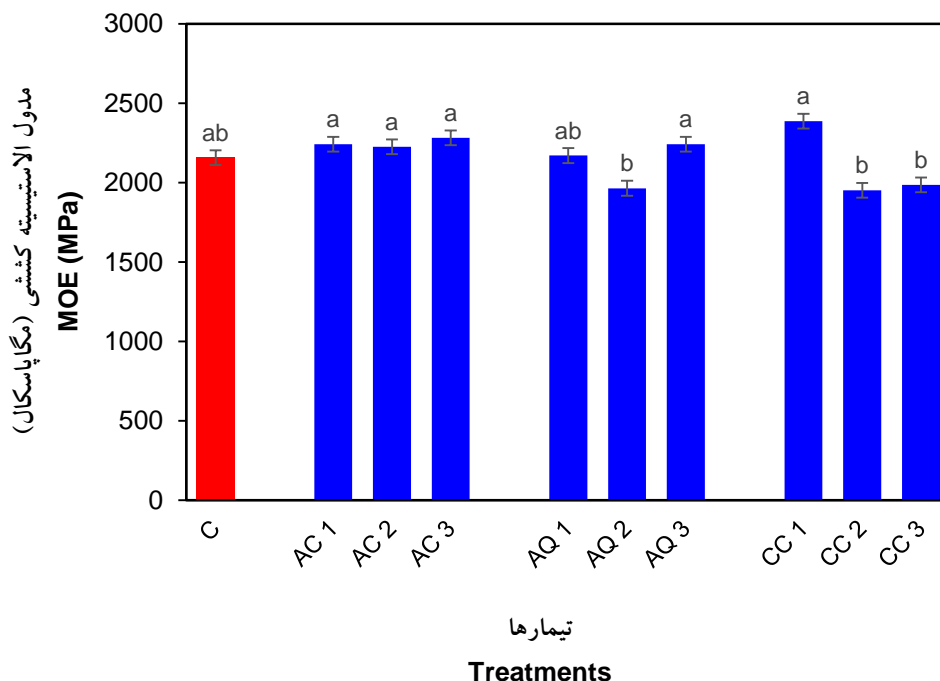


شکل ۴- اثر تیمارهای مختلف حفاظتی بر مقاومت کششی چندسازه آرد چوب- پلی اتیلن.

Figure 4. The effect of different preservative treatments on the tensile strength of wood flour-polyethylene composite.

در زنجیره‌های پلی‌ساکاریدی چوب را تسریع نمایند (۳۰). از طرف دیگر بسیاری از مواد اسیدی مورد استفاده در مواد حفاظتی محلول در آب، اجزای قندهای چوب را هیدرولیز می‌کنند که این عمل می‌تواند مقاومت ساختار چوب را کاهش داده و برخی خواص مکانیکی مواد چوبی را کاهش دهد (۳۱ و ۳۲). بررسی نتایج تیمار ACC نشان داد میزان غلظت تأثیری بر مدول الاستیسیته ندارد. همه تیمارهای ACC در یک سطح قرار داشته و تأثیر معنی‌داری نسبت به نمونه‌های شاهد دارند، در این تیمار AC 3، بیش‌ترین مدول الاستیسیته را با مقدار ۲۲۸۱/۳ مگاپاسکال دارد. بررسی نتایج تیمارهای ACQ نشان داد استفاده از این تیمار تأثیر معنی‌داری بر مدول الاستیسیته کششی ندارد، در این تیمار AQ 3 بیش‌ترین مقدار مدول الاستیسیته کششی را بین تمام تیمارهای ACQ دارد.

مدول الاستیسیته کششی: نتایج بررسی اثر تیمارهای مختلف حفاظتی بر مدول الاستیسیته کششی نمونه‌های چوب-پلاستیک در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که تیمار AQ3، CC1 و تیمار ACC تأثیر معنی‌داری بر مدول الاستیسیته کششی دارند ($P < 0/05$). به‌نحوی که تیمار CC1 بیش‌ترین مقدار مدول الاستیسیته کششی را با مقدار ۲۳۸۶/۱ مگاپاسکال دارد. بررسی سایر نتایج تیمار CCB نشان داد با افزایش غلظت ماده حفاظتی، مدول الاستیسیته کششی کاهش می‌یابد، هرچند از نظر آماری با نمونه‌های شاهد در یک گروه آماری قرار دارند. Levan و Winandy (۱۹۹۰) بیان کردند، وقتی چوب در معرض محلول‌های اسیدی قرار می‌گیرد یون‌های کاتیونی ممکن است از محلول به داخل ساختار چوب نفوذ نموده و به‌عنوان کاتالیزور، واکنش‌های شیمیایی مانند برش پیوندهای گلیکوزیدی



شکل ۵- اثر تیمارهای مختلف حفاظتی بر مقاومت کششی چندسازه آرد چوب- پلی اتیلن.

Figure 5. The effect of different preservative treatments on the tensile strength of wood flour-polyethylene composite.

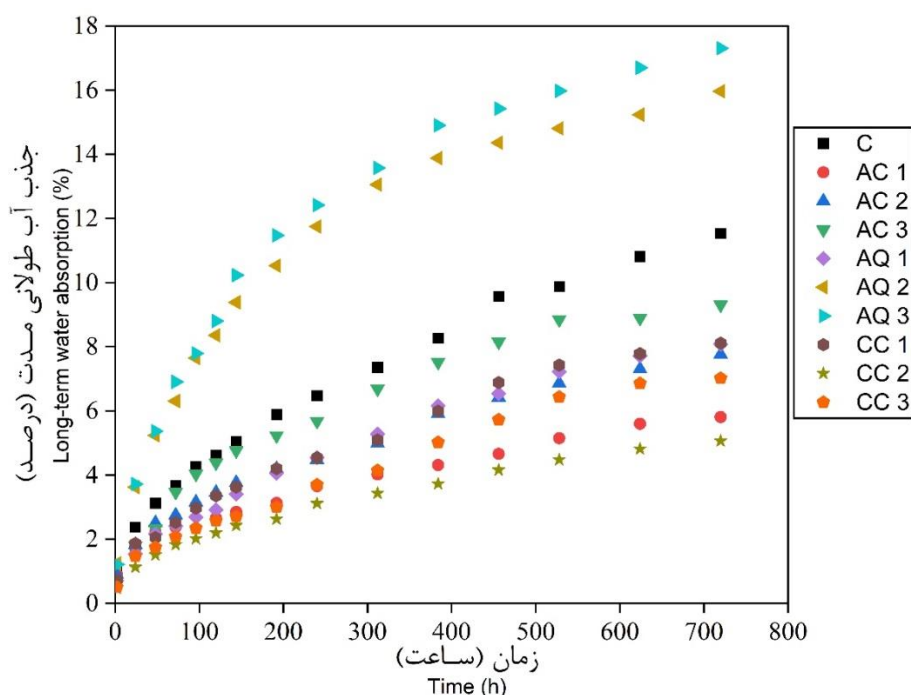
شدن آن برای تشکیل یون‌های تتراهیدرو بورات می‌شود. یون‌های تتراهیدرو بورات با دیول‌های نوکلئوفیل سلولز واکنش داده و در نتیجه پیوندهای عرضی ایجاد می‌شود و مقاومت در برابر واکنشیدگی را افزایش می‌دهد (۳۶ و ۳۷).

بررسی نتایج نشان داد با افزایش غلظت ACC و ACQ میزان جذب آب طولانی‌مدت افزایش می‌یابد. میزان جذب آب طولانی‌مدت در چندسازه آرد چوب- پلاستیک حاوی ACC در همه غلظت‌ها کم‌تر از نمونه شاهد است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت این ماده حفاظتی در کاهش جذب آب طولانی‌مدت است. به طوری که AC 1 با ۵/۸۱ درصد در ۷۲۰ ساعت کم‌ترین میزان جذب آب طولانی‌مدت را دارد. نمک‌های کروم علاوه بر بهبود مقاومت در برابر قارچ‌ها، سبب کاهش جذب آب طولانی‌مدت و تورم در چوب می‌شوند (۳۸). نمونه‌های تیمار شده با ACQ دارای بیش‌ترین جذب آب طولانی‌مدت می‌باشند. تیمار AQ 2 و AQ 3 بالاترین میزان جذب آب طولانی‌مدت را دارند که حتی بیش‌تر از نمونه شاهد است و به ترتیب از ۱/۲۴ و ۱/۲۱ درصد در ۲ ساعت به ۱۵/۹۶ و ۱۷/۳ درصد در ۷۲۰ ساعت رسیده است. در توجیه افزایش جذب آب طولانی‌مدت در تیمارهای حاوی غلظت زیاد می‌توان گفت که ترکیبات ACQ برای تثبیت قوی در چوب با یکدیگر در رقابت هستند. از آنجایی که تعداد مکان‌های واکنش محدود است، انتظار می‌رود درجه تثبیت با افزایش غلظت محلول تیمار کاهش یابد و در نتیجه یون‌های فلزی مس و سایر ترکیبات تشکیل‌دهنده به صورت رسوب در منافذ چوب قرار گیرند (۳۹) و با توجه به تأثیر منفی یون‌های فلزی بر عملکرد MAPE، این امر موجب برقراری اتصالات ضعیف در ناحیه اینترفاز بین چوب و پلاستیک می‌شود و بدین‌ترتیب جذب آب طولانی‌مدت افزایش می‌یابد.

جذب آب: شکل ۶، میزان جذب آب چندسازه آرد چوب-پلاستیک‌های تیمار شده با مواد حفاظتی مختلف در دوره زمانی ۲ تا ۷۲۰ ساعت را نشان می‌دهد. به صورت کلی نتایج نشان داد که میزان جذب آب در تمامی تیمارها در ۲۴ ساعت اول غوطه‌وری با شدت بیش‌تری رخ داده است. علت این امر می‌تواند ناشی از جذب آب در منافذ خالی در ابتدای غوطه‌وری و کاهش آن فضاها در طول زمان باشد (۳۳). بررسی نتایج جذب آب طولانی‌مدت بیانگر آن است که نمونه‌های تیمار شده با CCB جذب آب طولانی‌مدت کم‌تری نسبت به نمونه شاهد دارند. تأثیر میزان غلظت CCB بر جذب آب طولانی‌مدت متفاوت است، به نحوی که CC 2 کم‌ترین میزان جذب آب طولانی‌مدت را نشان می‌دهد که از ۰/۴۶ درصد در ۲ ساعت به ۵/۰۶ درصد در ۷۲۰ ساعت رسیده است که بیانگر کارایی زیاد این ماده حفاظتی در کاهش جذب آب طولانی‌مدت است. در این تیمارها، CC 1 با ۸/۱۱ درصد جذب آب بیش‌ترین جذب طولانی‌مدت را دارا بود. تری اکسید کروم موجود در CCB به هنگام پیوند با چوب، از حالت شش‌ظرفیتی به سه‌ظرفیتی تغییر می‌یابد و با افزایش غلظت سطح گروه‌های هیدروکسیل و کاهش سطح هیدروکربن، در یک برهم‌کنش کرومات-سلولز، سبب می‌شود خاصیت آبگریزی چوب افزایش یابد (۳۴). هم‌چنین می‌توان بیان نمود کرد که استفاده از CCB موجب اشغال برخی از مکان‌های جذب مانند گروه‌های هیدروکسیل (OH) در داخل دیواره سلولی توسط مس شده و بدین‌ترتیب ظرفیت جذب آب طولانی‌مدت کاهش می‌یابد (۳۵). تأثیر بور را می‌توان به قابل‌دسترس بودن اوربیتال p خالی اتم بور سه‌ظرفیتی در اسید بوریک که آن را به الکتروفیل تبدیل می‌کند و باعث جذب نوکلئوفیل‌ها و تشکیل کمپلکس می‌شود، مربوط دانست. انحلال اسید بوریک در آب باعث جدا

جذب رطوبت دارند، زیرا این گروه‌ها تمایل زیادی به تشکیل پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آب دارند. تیمار حفاظتی می‌تواند میزان گروه‌های هیدروکسیل آزاد را کاهش داده یا تغییر دهد که این امر موجب کاهش ظرفیت جذب آب در این ناحیه می‌شود. برای مثال، مواد حفاظتی مانند CCB به دلیل داشتن فلزات سنگین، ممکن است با گروه‌های عاملی واکنش داده و ساختارهای شیمیایی جدیدی ایجاد کنند که آب‌گریزتر هستند. در حفرات سلولی، جذب آب بیش‌تر به فضای خالی موجود برای ذخیره آب بستگی دارد. این نواحی به‌عنوان فضاهای نگهدارنده آب عمل کرده و تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت جذب آب کلی دارند. مواد حفاظتی مانند ACQ با رسوب در این حفره‌ها یا تشکیل رسوبات نامحلول، می‌توانند این فضاها را مسدود کنند و مانع از ورود آب شوند. علاوه بر این، این مواد ممکن است فشار اسمزی را در داخل حفره‌ها تغییر دهند که باعث کاهش انتقال آب به این ناحیه می‌شود. درنهایت، حفرات بین مواد لیگنوسولوزی و ماتریکس پلاستیکی نیز به‌عنوان مسیرهای مهمی برای نفوذ آب عمل می‌کنند. این نواحی عمدتاً شامل ترک‌های ریز و نواقص ساختاری در فصل مشترک چوب و پلاستیک هستند. مواد حفاظتی مانند ACC که حاوی ترکیبات مسی هستند، ممکن است با پر کردن این حفرات یا واکنش با ترکیبات چوبی، نفوذپذیری این نواحی را کاهش دهند. به‌طورکلی، هر یک از این مکانیسم‌ها به نحوی بر کاهش یا افزایش ظرفیت جذب آب تأثیرگذار است و ترکیب شیمیایی خاص هر ماده حفاظتی نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه تعامل آن با این نواحی دارد.

به‌طورکلی مواد سلولزی دارای خاصیت هیگروسکوپیک می‌باشند و رطوبت همه ویژگی‌های این مواد را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. کنترل رطوبت یکی از اساسی‌ترین مباحث فناوری چوب و سازه‌های چوبی است، زیرا می‌تواند بر خواص مکانیکی و هم‌چنین پایداری ابعادی تأثیر بگذارد. در اثر جذب آب طولانی‌مدت الیاف آبدوست چوب واکشیده می‌شود. این امر سبب آسیب‌پذیری موضعی پلاستیک‌ها به علت تنش‌های واکشیدگی، شکست ذرات چوب و تخریب بین آن‌ها شده (۴۰)، در نتیجه واکنش‌های اکسیداسیون را تسریع بخشیده و افزایش شکنندگی ماتریس پلیمر را به همراه خواهند داشت، ترک‌های ریز تشکیل شده به دلیل واکشیدگی ترکیبات چوب، نفوذ عمیق‌تر اشعه UV و رطوبت را به داخل سازه آسان‌تر نموده و مکان‌های بیشتری را برای تخریب در اختیار می‌گذارند. به‌طورکلی، جذب آب طولانی‌مدت در چوب-پلاستیک به تخلخل، مقدار الیاف سلولزی و دسترس‌پذیری آن‌ها برای جذب آب طولانی‌مدت بستگی دارد (۴۱). به اعتقاد Das و همکاران (۲۰۰۰)، سه ناحیه اصلی جذب آب طولانی‌مدت در چندسازه شامل دیواره سلولی، حفرات سلولی و حفرات بین مواد لیگنوسولوزی و ماتریکس هستند (۴۲). به عبارتی جذب آب طولانی‌مدت در چوب پلاستیک تیمار شده با مواد حفاظتی مختلف مانند ACC، CCB و ACQ تحت‌تأثیر سه ناحیه اصلی شامل دیواره سلولی، حفره سلولی و حفرات بین مواد لیگنوسولوزی و ماتریکس قرار می‌گیرد. در دیواره سلولی، گروه‌های هیدروکسیل موجود در سلولز و همی‌سلولزها نقش مهمی در



شکل ۶- اثر تیمارهای مختلف حفاظتی بر جذب آب طولانی مدت بلندمدت چندسازه آرد چوب- پلی اتیلن.

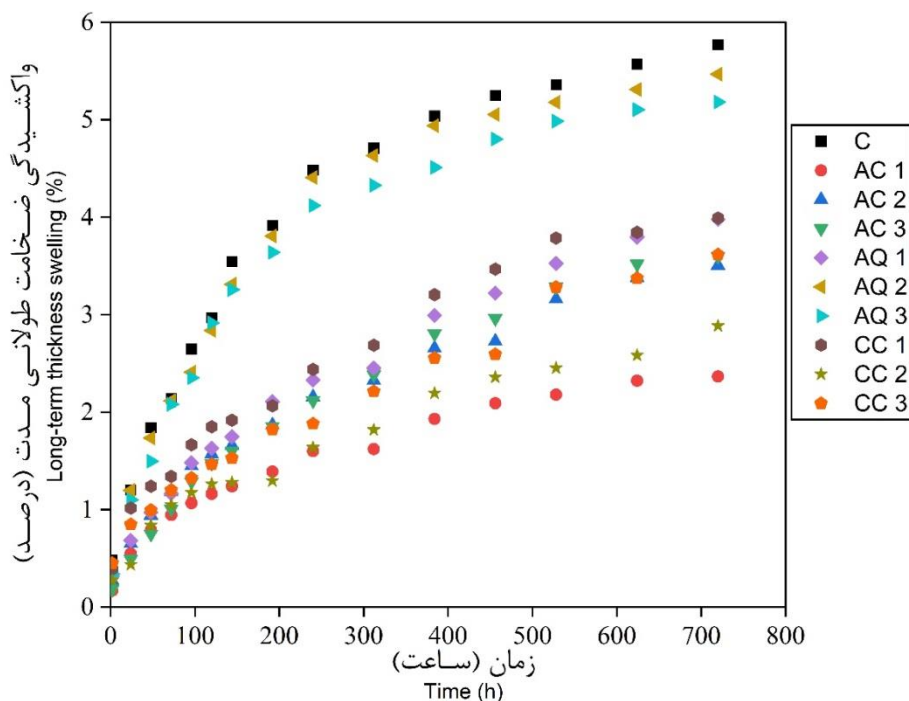
Figure 6. Effect of different preservative treatments on long-term water absorption (WA) of wood flour-polyethylene composite.

گروه‌های هیدروکسیل، افزایش سطح هیدروکربن و اکسیداسیون شده و در یک برهمکنش کرومات-سلولز، خاصیت آبگریز چوب افزایش می‌یابد (۴۴) که این امر بیانگر کم‌رنگ شدن خاصیت قطبی چوب و نزدیک شدن به خاصیت غیرقطبی پلیمر و ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین آن‌ها که موجب افزایش مقاومت در برابر آب و واکنشیدگی ضخامت می‌گردد. با افزایش غلظت ACC، واکنشیدگی ضخامت افزایش یافت، اما هم‌چنان کم‌تر از نمونه شاهد بود. این نتیجه بیانگر تأثیر مثبت این ماده حفاظتی در بهبود پایداری ابعادی چوب-پلاستیک‌ها است. تیمارهای ACQ نیز تأثیرات متفاوتی بر واکنشیدگی ضخامت دارند، به‌طوری‌که تیمارهای ACQ 2 و ACQ 3، واکنشیدگی ضخامت بیشتری داشته و به ترتیب به ۵/۴۶ درصد و ۵/۱۸ درصد در ۷۲۰ ساعت می‌رسد که بیانگر تأثیر منفی این ماده حفاظتی در مقایسه با ACC است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، استفاده از غلظت بیش‌تر این تیمار موجب رسوب یون‌های فلزی مس و سایر

واکنشیدگی ضخامت: واکنشیدگی ضخامت به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم در بررسی پایداری ابعادی و دوام چوب-پلاستیک‌ها محسوب می‌شود داده‌های ارائه شده (شکل ۷) بیانگر واکنشیدگی ضخامت چوب-پلاستیک‌های تیمار شده با مواد حفاظتی مختلف در طول دوره زمانی ۲ تا ۷۲۰ ساعت است. نتایج بیانگر تأثیر مواد مختلف حفاظتی بر واکنشیدگی ضخامت و بهبود پایداری ابعادی چوب-پلاستیک‌ها می‌باشد. تیمارهای ACC موجب کاهش قابل توجه در واکنشیدگی ضخامت شدند. به‌ویژه تیمار AC1 کم‌ترین میزان واکنشیدگی را نشان داد که از ۰/۱۷ درصد در ۲ ساعت به ۲/۳۶ درصد در زمان ۷۲۰ ساعت افزایش یافت. Williams و Feist (۱۹۸۵)، بیان کردند استفاده از اسید کرومیک، ثبات ابعادی را بهبود می‌بخشد، هوازدگی چوب را به تأخیر انداخته و عمر چندسازه چوبی را طولانی می‌کند (۴۳). هم‌چنین Ross و Feist (۱۹۹۱) عنوان کردند، تعامل کروم و تثبیت آن روی کربوهیدرات‌های چوب سبب کاهش

از میزان کارایی آن کاسته می‌شود (۴۵). مطالعات انجام شده توسط Rabbi و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد استفاده از CCB، خواص فیزیکی چوب را بهبود می‌بخشد (۴۶) که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد. بورت‌ها مانند بوراکس و اسید بوریک، با داشتن دمای ذوب کم، هنگامی که در معرض حرارت قرار می‌گیرند (داخل اکسترودر)، لایه‌ای شیشه‌ای تشکیل می‌دهند و بدین ترتیب می‌توانند به‌عنوان عایق، مانع از دریافت رطوبت به سازه چوبی شوند (۴۷). هم‌چنین، اسید بوریک می‌تواند با گروه‌های آبدوست، به‌عنوان مثال، هیدروکسیل‌های موجود در لیگنین‌ها، از طریق استری شدن برهمکنش داشته باشد و مقدار گروه‌های آبدوست را کاهش می‌دهد (۴۸). به‌طور کلی، نتایج نشان داد که استفاده از مواد حفاظتی ACC و CCB به‌طور مؤثری واکنش‌دهی ضخامت چوب-پلاستیک‌ها را کاهش می‌دهد و پایداری ابعادی آن‌ها را بهبود می‌بخشد.

ترکیبات تشکیل‌دهنده بر دیواره سلولی چوب می‌شود که این امر باعث اختلال در برقراری پیوند مناسب بین MAPE و آرد چوب شده و موجب افزایش واکنش‌دهی ضخامت می‌شود. تیمارهای CCB تأثیر مثبتی بر واکنش‌دهی ضخامت دارند، اما تأثیر غلظت بر آن متفاوت است، به‌نحوی که تیمار CC 2 کم‌ترین واکنش‌دهی ضخامت را نشان می‌دهد که از ۰/۲۷ درصد در ۲ ساعت به ۲/۸۸ درصد در ۷۲۰ ساعت رسیده است، این امر بیانگر کارایی بیش‌تر این ماده حفاظتی در بهبود پایداری ابعادی چوب-پلاستیک است. در این تیمارها، CC 3 دارای بیش‌ترین میزان واکنش‌دهی ضخامت بودند. نفوذ اسید بوریک به دیواره سلولی و ایجاد پیوند هیدروژنی با گروه‌های OH چوب موجب کاهش خاصیت آبدوستی می‌شود؛ اما اگر میزان غلظت ماده حفاظتی فراتر از یک مقدار مشخص باشد، اسید بوریک داخل حفره سلولی و بین شکاف‌ها به‌صورت میکروکریستال رسوب می‌کند و بعد از خشک شدن به‌راحتی جدا می‌شود و بدین ترتیب



شکل ۷- اثر تیمارهای مختلف حفاظتی بر واکنش‌دهی ضخامت چندسازه آرد چوب-پلی اتیلن.

Figure 7. Effect of different preservative treatments on long-term thickness swelling (TS) of wood flour-polyethylene composite.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مواد حفاظتی اسید کرومات مس (ACC)، کوآرنر مس قلیایی (ACQ) و مس کروم بور (CCB) بر بهبود خواص مکانیکی و کاهش واکنشیدگی ضخامت چندسازه‌های ساخته شده تأثیر دارد. تیمارهای ACC و CCB به طور مؤثرتری نسبت به ACQ موجب افزایش مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته خمشی شده و همچنین جذب آب طولانی مدت و واکنشیدگی ضخامت را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده‌اند. به طور کلی، تیمارهای AC 1 و CC 1 بهترین نتایج را در بهبود ویژگی‌های مکانیکی نشان دادند. همچنین، تیمارهای AC 1 و

CC 2 بهترین نتایج را در کاهش واکنشیدگی ضخامت و بهبود پایداری ابعادی نشان دادند. این یافته‌ها اهمیت انتخاب ماده حفاظتی و تعیین غلظت بهینه آن را برای بهبود ویژگی‌های چندسازه‌ها برجسته می‌کند. این پژوهش می‌تواند به توسعه و تولید چوب-پلاستیک‌های مقاوم‌تر و با دوام بیشتر کمک کند که در ساخت مبلمان فضای باز، صنایع ساختمانی و خودروسازی مورد استفاده قرار گیرند. بهبود پایداری ابعادی و ویژگی‌های مکانیکی چندسازه‌های آرد چوب-پلی‌اتیلن می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش عمر مفید این مواد شود.

منابع

1. Yadav, S. M., Lubis, M. A. R., & Sihag, K. (2021). A comprehensive review on process and technological aspects of wood-plastic composites. *J. Sylva Lestari*. 9 (2), 329-356.
2. Shi, W., Ma, Y., Yang, C., Jiang, B., & Li, Z. (2017). Evaluation of a regression prediction model for surface roughness of wood-polyethylene composite (WPC). *Surface Review and Letters*. 24(Supp02), 1850033.
3. Ashori, A. (2013). Effects of nanoparticles on the mechanical properties of rice straw/polypropylene composites. *J. of Composite Materials*. 47 (2), 149-154.
4. Luo, S., Cao, J., & Peng, Y. (2014). Properties of glycerin-thermally modified wood flour/ polypropylene composites. *Polymer composites*. 35 (2), 201-207.
5. Kordkheili, H. Y., Farsi, M., & Rezazadeh, Z. (2013). Physical, mechanical and morphological properties of polymer composites manufactured from carbon nanotubes and wood flour. *Composites Part B: Engineering*. 44 (1), 750-755.
6. Kamdem, D. P., Jiang, H., Cui, W., Freed, J., & Matuana, L. M. (2004). Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 35 (3), 347-355.29.
7. Bledzki, A., Faruk, O., & Huque, M. (2002). Physico-mechanical studies of wood fiber reinforced composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 41 (3), 435-51.
8. Dahmardeh Ghalehno, M., Kord, B., & Adlnasab, L. (2023). Evaluation of thermal degradation behavior and fire resistance performance of wood-plastic composites containing different modified clay nanoparticles. *Wood Material Science & Engineering*. 18 (2), 559-569.
9. Segerholm, B. K., Ibach, R. E., & Westin, M. (2012). Moisture sorption, biological durability and mechanical performance of WPC containing modified wood and polylactates. *BioResources*. 7 (4), 4575-4585.
10. Esmaeli Moghadam, S. (2016). Effect of chemical modification of wood flour on long-term water absorption and thickness swelling and morphological study of wood plastic composite. *J. of Wood & Forest Science and Technology*. 23 (4), 175-198. [In Persian]

11. Kord, B., & Taghizadeh Haratbar, D. (2014). Influence of fiber surface treatment on the physical and mechanical properties of wood flour-reinforced polypropylene bionanocomposites. *J. of Thermoplastic Composite Materials*. pp. 1-14.
12. Dominkovics, Z., Dányádi, L., & Pukanszky, B. (2007). Surface modification of wood flour and its effect on the properties of PP/wood composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 38 (8), 1893-1901.
13. ASTM Standards, Vol. 08.01. (1998). D570-98: Standard test method for water absorption of plastics. New York, NY: ASTM.
14. ASTM Standards. (2010). ASTM D790-10: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. New York, NY: ASTM.
15. ASTM Standards. (2003). ASTM D 638-03: Standard test method for tensile properties of plastics. New York, NY: ASTM.
16. Yildiz, S., Yildiz, Ü., Dizman, E., Temiz, A., & Gezer, E. (2010). The effects of preacid treatment on preservative retention and compression strength of refractory spruce wood impregnated with CCA and ACQ. *Wood Research*. 56, 93-104.
17. Liu, R., Ruddick, J. N. R., & Jin, L. (1994). The influence of copper (II) chemicals on the weathering of treated wood, 1: ACQ treatment of wood on weathering. Document-the International Research Group on Wood Preservation (Sweden).
18. Craciun, M. F., Russo, S., Yamamoto, M., Oostinga, J. B., Morpurgo, A. F., & Tarucha, S. (2009). Trilayer graphene is a semimetal with a gate-tunable band overlap. *Nature Nanotechnology*. 4 (6), 383-388.
19. Yang, F., Zeng, J., Long, H., Xiao, J., Luo, Y., Gu, J., & Dong, X. (2020). Micrometer copper-zinc alloy particles-reinforced wood plastic composites with high gloss and antibacterial properties for 3D printing. *Polymers*. 12 (3), 621.
20. Humar, M., Zlindra, D., & Pohleven, F. (2007). Influence of wood species, treatment method and biocides concentration on leaching of copper-ethanolamine preservatives. *Build. Environ*. 42 (2), 578-583.
21. Yang, T. H., Wang, S. Y., Lin, C. J., Tsai, M. J., & Lin, F. C. (2007). Effect of laminate configuration on the modulus of elasticity of glulam evaluated using a strain gauge method. *Journal of Wood Science*. 53, 31-39.
22. Aguayo, M. G., Erazo, O., Montero, C., Reyes, L., Gacitúa, W., Gómez, L., & Torres, H. (2022). Analyses of impregnation quality and mechanical properties of radiata pine wood treated with copper nanoparticle-and micronized-copper-based wood preservatives. *Forests*. 13 (10), 1636.
23. Mitsuhashi Gonzalez, J. M. (2007). Limiting copper loss from treated wood in or near aquatic environments. Doctoral dissertation, Oregon State University.
24. Lebow, S. T. (2010). Wood preservation. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 15. Centennial Ed. General Technical Report, GTR-190. Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 15.1-15.28p.
25. Winandy, J. E., Green, F., & Keefe, D. (2001). Treatability problems-Relationships between anatomy, chemical composition and treatability. Int. Res. Gr. Wood Prot. 32nd Annu. Meet.
26. Le, N. D., Trogen, M., Varley, R. J., Hummel, M., & Byrne, N. (2021). Effect of boric acid on the stabilisation of cellulose-lignin filaments as precursors for carbon fibres. *Cellulose*. 28, 729-739.
27. Gadhav, R. V., SK, V., Mahanwar, P. A., & Gadekar, P. T. (2021). Effect of addition of boric acid on thermo-mechanical properties of microcrystalline cellulose/polyvinyl alcohol blend and applicability as wood

- adhesive. *J. of Adhesion Science and Technology*. 35 (10), 1072-1086.
28. Bertolini M. S., Christoforo, A. L., & Ferro, F. S. (2014). Wood treated with CCA and CCB in the production of particle board: comparative performance. Vol. 14. In: Brazilian meeting on timber and timber structures; 28p.
 29. Rude, E. F. (2007). *Evaluation of Coupling Mechanisms in Wood Plastic Composites* (Doctoral dissertation, Washington State University).
 30. Levan, S. L., & Winandy, J. E. (1990). Effect of fire retardant treatments of wood strength: a review. *Wood Fiber Science*. 22, 112-131.
 31. Hamel, M. P. (1988). Wood Protection Techniques and the Use of Treated Wood in Construction. Proceedings. – Forest Products Research Society, Madison, WI, pp. 54-62.
 32. Laks, P. E., & Palardy, R. D. (1990). The development of borate-containing flakeboard – Proceedings of the first international conference on wood protection with diffusible preservatives. Forest Products Research Society, Madison, WI, pp. 76-79.
 33. Yalinkilic, M. K., Baysal, E., & Demirci, Z. (1995). Leachability of boron from treated Douglas fir wood and alleviation of leachability by various water-repellents. In: Proc. of Environment Sym., 18–20 September, Erzurum, Turkey. pp. 501-511.
 34. Ross, A. S., & Feist, W. C. (1993). The effects of CCA-treated wood on the performance of surface finishes. *American Paint and Coatings J*. 78 (9), 41-54.
 35. Islam, M. S., Hamdan, S., Rusop, M., Rahman, M. R., Ahmed, A., S., & Idrus, M. (2012). Dimensional stability and water repellent efficiency measurement of chemically modified tropical light hard wood. *BioResource*. 7 (1), 1221-1231.
 36. Zhu, Y., Cai, J., Hosmane, N. S., & Zhang, Y. (2022). Introduction: basic concept of boron and its physical and chemical properties. In *Fundamentals and Applications of Boron Chemistry* (pp. 1-57). Elsevier.
 37. Graham, B. J. (2021). *Catalytic and biological applications of benzoxaborolones* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
 38. Tshabalala, M. A., & Gangstad, J. E. (2003). Accelerated weathering of wood surfaces coated with multifunctional alkoxysilanes by sol-gel deposition. *J. of Coatings Technology*. 75 (943), 37-43.
 39. Tascioglu, C., Cooper, P., & Ung, T. (2005). Rate and extent of adsorption of ACQ preservative components in wood. *Holzforschung*. 59 (5), 574-580.
 40. Rangaraj, S. V., & Smith, L. V. (2000). Effects of moisture on the durability of a wood/thermoplastic composite. *J. of Thermoplastic Composite Materials*. 13 (2), 140-161.
 41. Taib, R. M., Zauzi, N. A., Ishak, Z. M., & Rozman, H. D. (2010). Effects of photo-stabilizers on the properties of recycled high-density polyethylene (HDPE)/wood flour (WF) composites exposed to natural weathering. *Malaysian Polymer J*. 5 (2), 193-203.
 42. Das, S., Sara, A. K., Choudhury, P. K., Basak, R. K., Mitra, B. C., Todd, T., & et al. (2000). Effect of steam pretreatment of jute fiber on dimensional stability of jute composite. *J. of Applied Polymer Science*. 76 (11), 1652-1661.
 43. Williams, R. S., & Feist, W. C. (1985). Wood modified by inorganic salts: Mechanism and properties. I. weathering rate, water repellency, and dimensional stability of wood modified with chromium (III) nitrate versus chromic acid. *Wood Fiber Science*. 17, 184-198.
 44. Ross, A. S., & Feist, W. C. (1991). The effects of CCA-treated wood on the performance of surface finishes. Proceedings, 87th American Wood Preservers' Association Annual.
 45. Yamauchi, S., & Doi, S. (2003). Raman spectroscopic study on the behavior of boric acid in wood. *J. of Wood Science*. 49, 227-234.
 46. Rabbi, M. F., Islam, M. M., & Rahman, A. M. (2015). Wood preservation: Improvement of mechanical properties by vacuum pressure process. *International J. of Engineering and Applied Sciences*. 2 (4), 257947.

47. Lloyd, J. D., Fogel, J. L., & Vizek, A. (2001). The use of Zirconium as an inert fixative for borates in preservation. *International Research Group on Wood Preservation. IRG Secretariat, Stockholm, Sweden.*
48. Chio, C., Sain, M., & Qin, W. (2019). Lignin utilization: A review of lignin depolymerization from various aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 107, 232-249.