



Effect of acrylate modification of wood flour on the structural characteristics and physical behavior of wood flour/polypropylene composite product

Maryam Ghorbani^{*1}, Nadia Talebi², Seyyed Mojtaba Amininasab³,
Forough Dastoorian⁴

1. Corresponding Author, Professor, Dept. of Wood and Cellulosic Products Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: ghorbani_mary@yahoo.com
2. M.Sc. Student, Dept. of Wood and Cellulosic Products Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: ntalebi992@yahoo.com
3. Associate Prof., Dept. of Chemistry, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: m.amminasab@uok.ac.ir
4. Assistant Prof., Dept. of Wood and Cellulosic Products Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: fdastoorian@gmail.com

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 11.16.2023

Revised: 12.18.2023

Accepted: 12.18.2023

Keywords:

Acrylate modification,
Morphology,
Physical properties,
Thermal stability,
Wood plastic composites

ABSTRACT

Background and Objectives: Wood-plastic composites are produced by combining thermoplastic polymers with organic, inorganic, and natural fillers. The natural fillers, however, exhibit incompatibility with the non-polar polymer matrix, resulting in weak adhesion at the interface between wood fibers and the polymer. This lack of adhesion hinders stress transfer from the polymer to the wood fibers, ultimately leading to a decrease in the mechanical and physical properties of the final product. Previous research has suggested that, aside from utilizing coupling agents to enhance the adhesion between fibers and the polymer matrix, modifying the natural fillers can also improve the properties of wood-plastic composite products. In this study, the impact of chemical modification using glycidyl methacrylate and methyl methacrylate on the lignocellulosic fillers was investigated in terms of their effect on the functional properties of polypropylene-based wood-plastic composites.

Materials and Methods: Poplar wood flour was subjected to modification using glycidyl methacrylate (GMA) and a combination of glycidyl methacrylate/methyl methacrylate (GMA/MMA) under an argon gas atmosphere. The resulting changes in chemical structure, thermal stability, and physical properties were assessed for both the control and modified flours. To create wood-plastic composites, samples were prepared using control flour and polypropylene in weight ratios of 80:20, 70:30, and 60:40%. The composites were manufactured through the injection molding method, both with and without the inclusion of MAPP (Maleic Anhydride-Modified Polypropylene). Additionally, flours modified with glycidyl methacrylate and glycidyl ethacrylate/methyl methacrylate at the same weight ratio were also employed in the composite production. The physical properties of the composites were evaluated according to ASTM standard D 570, and the morphology was examined using field emission scanning electron microscope images.

Results: Based on the findings, the modification of wood flour using acrylate compounds such as glycidyl methacrylate and methyl methacrylate led to significant improvements in the thermal stability and physical

properties of the flour. The FTIR results revealed that the combined modification of glycidyl methacrylate/methyl methacrylate under benzoyl peroxide resulted in more noticeable chemical changes in the wood flour compared to modification with glycidyl methacrylate alone. This can be attributed to the polymerization of methyl methacrylate. As the ratio of natural filler increased, the water absorption of the product also increased. The modification of wood flour with glycidyl methacrylate as a bifunctional agent enhanced the adhesion and compatibility of the methyl methacrylate polymer with the cell wall of the wood flour. The reaction between the cell wall and glycidyl methacrylate reduced the moisture absorption potential of the cell wall by altering the structure of holocellulose and reducing the hydroxyl groups. Consequently, the physical properties of the resulting product improved due to enhanced compatibility between the flour, methyl methacrylate and the matrix.

Conclusion: When comparing the modification of glycidyl methacrylate with glycidyl methacrylate/methyl methacrylate, the combined modification resulted in a more uniform structure and improved compatibility between the components. As a result, there was a more pronounced enhancement in the physical properties of the composite compared to the modification of the cell wall with glycidyl methacrylate alone. This effect became increasingly noticeable as the filler ratio increased.

Cite this article: Ghorbani, Maryam, Talebi, Nadia, Amininasab, Seyyed Mojtaba, Dastoorian, Foroogh. 2024. Effect of acrylate modification of wood flour on the structural characteristics and physical behavior of wood flour/polypropylene composite product. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 30 (4), 1-16.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2024.21906.2044

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

اثر اصلاح آکریلاتی آرد چوب بر ویژگی‌های ساختاری و رفتار فیزیکی فرآورده مرکب آرد چوب/پلی‌پروپیلن

مریم قربانی^{۱*}، نادیا طالبی^۲، سید مجتبی امینی‌نسب^۳، فروغ دستوریان^۴

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. رایانامه: ghorbani_mary@yahoo.com
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. رایانامه: ntalebi992@yahoo.com
۳. دانشیار گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: m.amininasab@uok.ac.ir
۴. استادیار گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. رایانامه: fdastoorian@gmail.com

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|---|
| <p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۵</p> <p>تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷</p> <p>واژه‌های کلیدی: اصلاح آکریلاتی، پایداری حرارتی، خواص فیزیکی، ریخت‌شناسی، فرآورده مرکب چوب‌پلاستیک</p> | <p>سابقه و هدف: فرآورده مرکب چوب‌پلاستیک از اختلاط پلیمرهای گرمانرم با پرکننده‌های آلی، معدنی و طبیعی تشکیل شده است. ناسازگاری پرکننده‌های طبیعی با ماده زمینه‌ای پلیمری غیرقطبی، موجب چسبندگی ضعیف در سطح مشترک بین الیاف چوب و زمینه پلیمر و عدم انتقال تنش از زمینه پلیمر به الیاف چوب می‌شود که به افت خواص مکانیکی و فیزیکی فرآورده مرکب چوب‌پلاستیک حاصل می‌انجامد. براساس پژوهش‌های پیشین، علاوه بر به‌کارگیری جفت‌کننده برای بهبود چسبندگی و اتصال بین الیاف و ماده زمینه پلیمری، اصلاح پرکننده‌های طبیعی نیز می‌تواند به ارتقای خواص فرآورده مرکب چوب‌پلاستیک منتهی گردد. در پژوهش حاضر، اثر اصلاح شیمیایی آرد چوب به‌عنوان یکی از پرکننده‌های طبیعی با ترکیبات آکریلاتی گلیسیدیل‌متاکریلات و مونومر متیل‌متاکریلات بر خواص کاربردی فرآورده مرکب چوب‌پلاستیک پلی‌پروپیلن بررسی شده است.</p> <p>مواد و روش‌ها: آرد چوب گونه صنوبر با گلیسیدیل‌متاکریلات (GMA) و تلیفیک گلیسیدیل‌متاکریلات/مونومر متیل‌متاکریلات (GMA/MMA) تحت گاز آرگون اصلاح شد و تغییرات ساختار شیمیایی، پایداری حرارتی و خواص فیزیکی آرد چوب‌های شاهد و اصلاح‌شده ارزیابی گردید. نمونه‌های فرآورده مرکب چوب‌پلاستیک با استفاده از آرد چوب شاهد و پلی‌پروپیلن به نسبت‌های وزنی ۸۰:۲۰، ۷۰:۳۰ و ۶۰:۴۰ درصد، بدون و با انیدرید مالئیک پیوند شده به پلی‌پروپیلن به‌عنوان جفت‌کننده و در همان نسبت وزنی اختلاط با آرد چوب اصلاح‌شده با</p> |

گلیسیدیل متاکریلات و گلیسیدیل متاکریلات/متیل متاکریلات به روش قالب‌گیری تزریقی ساخته شدند. ارزیابی خواص فیزیکی فرآورده چوب‌پلاستیک حاصل مطابق استاندارد ASTM D 570 و ریخت‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی انجام شد.

یافته‌ها: بر اساس یافته‌های این پژوهش، اصلاح با ترکیبات آکریلاتی گلیسیدیل متاکریلات و متیل متاکریلات با تغییر ساختار شیمیایی، بهبود معنی‌داری در پایداری حرارتی و خواص فیزیکی آرد چوب ایجاد کرد. بر اساس نتایج طیف‌سنجی، تغییرات شیمیایی ناشی از اصلاح تلفیقی گلیسیدیل متاکریلات/متیل متاکریلات در حضور بنزوئیل‌پراکساید، به دلیل تکرار واحدهای مونومری متیل متاکریلات، نسبت به اصلاح دیواره‌ای گلیسیدیل متاکریلات محسوس‌تر بود. با افزایش نسبت پرکننده آرد چوب، جذب آب فرآورده مرکب چوب‌پلاستیک حاصل افزایش یافت. اصلاح آرد چوب با ترکیب دو عاملی گلیسیدیل متاکریلات به بهبود چسبندگی و سازگاری پلیمر متیل متاکریلات با دیواره سلولی آرد چوب انجامید. واکنش دیواره سلولی با گلیسیدیل متاکریلات از طریق تغییر ساختار هلوسولوز و کاهش گروه‌های هیدروکسیل، پتانسیل جذب رطوبت دیواره سلولی را کاهش داد و افزایش سازگاری پرکننده آرد چوب با متیل متاکریلات و زمینه پلیمری، خواص فیزیکی فرآورده چوب‌پلاستیک حاصل را بهبود بخشید.

نتیجه‌گیری: در مقایسه بین دو اصلاح‌کننده گلیسیدیل متاکریلات و تلفیق گلیسیدیل متاکریلات/متیل متاکریلات، اصلاح تلفیقی با ایجاد ساختاری یکنواخت‌تر و سازگاری مطلوب‌تر بین اجزا، بهبود محسوس‌تری در خواص فیزیکی فرآورده حاصل، نسبت به اصلاح دیواره‌ای گلیسیدیل متاکریلات ایجاد کرد که این اثر با افزایش نسبت پرکننده محسوس‌تر شد.

استناد: قربانی، مریم، طالبی، نادیا، امینی‌نسب، سید مجتبی، دستوریان، فروغ (۱۴۰۲). اثر اصلاح آکریلاتی آرد چوب بر ویژگی‌های ساختاری و رفتار فیزیکی فرآورده مرکب آرد چوب/پلی‌پروپیلن. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۰ (۴)، ۱-۱۶.

DOI: 10.22069/JWFST.2024.21906.2044



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

فرآورده مرکب چوب‌پلاستیک متشکل از اختلاط پلیمرهای گرمانرم مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، پلی‌وینیل‌کلراید و غیره و هم‌چنین پرکننده‌های آلی، معدنی و طبیعی می‌باشد که با توجه به روش ساخت، پرکننده می‌تواند ۱۰ تا ۸۰ درصد وزنی فرآورده را تشکیل دهد (۱). مزایای پرکننده‌های طبیعی (آرد یا الیاف حاصل از گیاهان چوبی یا غیرچوبی مانند کتان، بامبو، کاه و کلش و...) نسبت به پرکننده‌های معدنی (رس، تالک، آهک و ...) و الیاف مصنوعی (شیشه، کربن و...)، قابلیت تخریب زیستی در طبیعت، سهولت دسترسی و فراوانی، چگالی کم، تجدیدشوندگی، عدم سایش ماشین‌آلات و عدم تولید مواد سمی بعد از سوختن می‌باشد (۲). پرکننده‌های طبیعی به‌رغم مزایای فوق، دارای معایبی مانند تخریب در دمای پایین، دشواری توزیع یکنواخت و ناسازگاری با ماده زمینه پلیمری غیرقطبی هستند که موجب چسبندگی ضعیف در سطح مشترک بین آرد چوب و پلیمر و عدم انتقال تنش از زمینه پلیمر به الیاف چوب می‌شود. این امر به افت خواص مکانیکی و فیزیکی فرآورده حاصل می‌انجامد (۳). در حال حاضر در بیش‌تر پژوهش‌ها از مالئیک‌انیدرید پیوند شده با پلی‌پروپیلن (MAPP) به‌عنوان سازگارکننده برای بهبود چسبندگی و اتصال بین الیاف و ماده زمینه پلیمری در ساخت چوب‌پلاستیک استفاده می‌شود (۴).

اصلاح پرکننده‌های طبیعی به روش‌های گرمایی (۵) و شیمیایی (۶) نیز موجب بهبود سازگاری پرکننده‌های طبیعی با زمینه پلیمری و ارتقای خواص فرآورده مرکب چوب‌پلاستیک می‌شود. اصلاح شیمیایی الیاف طبیعی یکی از روش‌های بهبود اتصالات بین ترکیبات لیگنوسلولزی و پلیمر گرمانرم است که هدف از آن، جایگزینی ساختارهای آبگریز به‌جای ساختارهای آبدوست فاز تقویت‌کننده

لیگنوسلولزی می‌باشد. از مهم‌ترین روش‌های اصلاح شیمیایی می‌توان به اصلاح قلیایی، اسیدی، بنزیلی، اکریلی و سیلانی اشاره کرد (۷). اصلاح شیمیایی آرد چوب با استفاده از بنزیل‌کلرید و هیدروکسیدسدیم با بهبود چسبندگی بین پرکننده و ماده زمینه، به کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت فرآورده مرکب چوب‌پلاستیک منتهی شد (۸). استیلاسیون الیاف موجب کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت چندسازه چوب‌پلاستیک شد که با افزایش شدت اصلاح این اثر محسوس‌تر بود (۹). هم‌چنین، اصلاح شیمیایی آرد چوب با وینیل‌استات و انیدریدیک‌استیک موجب بهبود خواص کششی و خمشی فرآورده مرکب حاصل از آرد چوب/ پلی‌اتیلن سنگین گردید (۱۰). اصلاح الیاف کاه گندم با تری‌اتوکسی متیل سیلان نیز به کاهش جذب آب چوب‌پلاستیک حاصل انجامید (۱۱). اصلاح سیلانی نیز موجب بهبود پایداری حرارتی چوب‌پلاستیک شد (۱۲).

عوامل جفت‌کننده، در قالب اصلاح‌کننده‌های شیمیایی، دو ماده غیرمشابه را کنار یکدیگر نگه می‌دارند. ترکیب دو عاملی گلیسیدیل‌متاکریلات از مشهورترین جفت‌کننده‌هاست که با اصلاح پرکننده از طریق برقراری پیوند بین گروه‌های فعال اپوکسی و گروه‌های هیدروکسیل چوب و هم‌چنین واکنش بین پیوند دوگانه و مونومر، به‌طور گسترده در اتصال چوب و پلاستیک استفاده می‌شود (۱۳). مونومر به‌کاررفته در اصلاح تلفیقی پرکننده طبیعی، متیل متاکریلات بود که در ترکیب با گلیسیدیل‌متاکریلات برای اصلاح آرد چوب استفاده شد.

بر اساس پژوهش‌های پیشین، اثر مثبت استفاده از اصلاح شیمیایی پرکننده‌های سلولزی بر خواص چوب‌پلاستیک محرز است، اما تاکنون اثر اصلاح پرکننده طبیعی با تلفیق گلیسیدیل‌متاکریلات و مونومر متیل‌متاکریلات بر خواص این فرآورده بررسی نشده

متاکریلات با آرد چوب استفاده شد. کل واکنش تحت گاز آرگون به مدت ۸ ساعت در دمای بین ۷۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در خاتمه، مخلوط نهایی از کاغذ صافی عبور کرد و سه بار با حلال تتراهیدروفوران شسته شد. سپس، در آن تحت دمای ۱۰۳±۲ درجه سانتی‌گراد خشک شد و در کیسه‌های نایلونی نگهداری گردید. افزایش وزن ناشی از اصلاح بر اساس رابطه زیر تعیین گردید:

$$WPG(\%) = (w_2 - w_1/w_1) \times 100 \quad (1)$$

که در آن، WPG افزایش وزن (درصد)، W_2 وزن خشک بعد از غوطه‌وری (گرم)، W_1 وزن خشک قبل از غوطه‌وری (گرم).

جذب آب آرد چوب: برای تعیین اثر اصلاح بر جذب آب آرد چوب، ۲ گرم از آرد چوب خشک نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده درون کاغذ چای کیسه‌ای ریخته و در آب تحت دمای محیط (۲۵±۲ درجه سانتی‌گراد) قرار داده شدند. طی ۲۴ ساعت غوطه‌وری، جذب آب و کارایی آب‌گریزی آرد چوب بر اساس روابط اندازه‌گیری گردید.

$$WA = \frac{w_1 - w_0}{w_0} \times 100 \quad (2)$$

که در آن، WA جذب آب (درصد)، W_1 وزن بعد از غوطه‌وری در آب (گرم)، W_0 وزن قبل از غوطه‌وری در آب (گرم).

$$WRE(\%) = (W_{ac} - W_{at}/W_{ac}) \times 100 \quad (3)$$

که در آن، WRE کارایی آب‌گریزی (درصد)، W_{ac} جذب آب آرد چوب شاهد (گرم)، W_{at} جذب آب آرد چوب اصلاح‌شده (گرم).

طیف زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR): برای ارزیابی ساختار شیمیایی کلیه نمونه‌های آرد چوب شاهد و اصلاح‌شده به وسیله طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه

است. در پژوهش حاضر، اثر اصلاح شیمیایی پرکننده‌های لیگنوسولوزی با گلیسیدیل متاکریلات/مونومر متیل متاکریلات بر خواص کاربردی فرآورده مرکب چوب پلاستیک پلی‌پروپیلن بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

مواد: به منظور ساخت مواد مرکب مورد مطالعه در این تحقیق از پلی‌پروپیلن با نام تجاری Z30S محصول شرکت پتروشیمی مارون، در قالب ماده زمینه و پلی‌پروپیلن پیوندشده به انیدرید مالئیک تهیه‌شده از شرکت خاتم‌پلیمر به عنوان جفت‌کننده استفاده شد. برای اصلاح آرد چوب، گلیسیدیل متاکریلات و متیل متاکریلات تولیدی شرکت دایجونگ و تتراهیدروفوران، بنزوئیل پراکساید و تری اتیل آمین تولیدی شرکت مرک خریداری شدند.

اصلاح آرد چوب: آرد چوب صنوبر با اندازه ذرات نسبتاً یکنواخت (مش ۶۰/۴۰-)، توسط الک آزمایشگاهی جداسازی شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آن تحت دمای ۱۰۳±۲ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. آرد چوب تهیه‌شده به سه دسته شاهد و اصلاح‌شده با گلیسیدیل متاکریلات (GMA) و تلفیق گلیسیدیل متاکریلات/متیل متاکریلات (GMA/MMA) تقسیم‌بندی شد. به منظور اصلاح، ۴۰ گرم آرد چوب با ۶۰ میلی‌لیتر محلول تتراهیدروفوران در بالن ۵۰۰ میلی‌لیتری مخلوط شد و سپس به میزان ۱۰ میلی‌لیتر گلیسیدیل متاکریلات به مخلوط اضافه شد. در اصلاح تلفیقی برای رعایت نسبت ۲۰ به ۸۰ اصلاح‌کننده به چوب، ۶ میلی‌لیتر گلیسیدیل متاکریلات و ۵ میلی‌لیتر متیل متاکریلات اضافه گردید (به دلیل دانسیته بالاتر GMA، برای حفظ نسبت مولی ۱ به ۱ ترکیب مصرفی، مقدار متفاوتی از هر کدام اضافه شد). از بنزوئیل پراکساید به عنوان آغازگر واکنش به نسبت ۲ درصد وزنی مونومر متیل متاکریلات و ۱ میلی‌لیتر تری اتیل آمین به عنوان کاتالیزور واکنش گلیسیدیل

مواد مرکب مطابق استاندارد ASTM D 570، پنج نمونه از هر ترکیب انتخاب و به مدت ۲۴ ساعت در دمای 103 ± 2 درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. وزن و ضخامت نمونه‌های خشک‌شده به ترتیب با ترازوی دیجیتالی با دقت 0.001 گرم و میکرومتر با دقت 0.001 میلی‌متر اندازه‌گیری و در دمای اتاق برای ۲۰۰۰ ساعت در آب قرار داده شدند و در نهایت میزان جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت محاسبه گردید.

میکروسکوپ الکترون پویش (FESEM): برای مطالعه ریخت‌شناسی، تصاویر با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (Field Emission-Scanning electron microscope) مدل TESCAN-MIRA3 ساخت کشور چک با ولتاژ تصویربرداری ۲۵ کیلوولت، از سطوح شکست نمونه‌های کشش (براساس استاندارد ASTM D۶۳۸ و با استفاده از ماشین آزمایش مدل SANTAM-STM-۲۰ انجام شد) دارای پوشش طلا تهیه گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها: برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS با استفاده از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح اعتماد ۹۵ درصد استفاده گردید.

نتایج و بحث

طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوری: بر اساس نتایج طیف‌سنجی، تفاوت محسوسی بین نمونه‌های آرد چوب اصلاح‌شده و شاهد مشاهده گردید (شکل ۱). کاهش شدت پیک گروه هیدروکسیل در عدد موج 3450 cm^{-1} متعاقب اصلاح با گلیسیدیل‌متاکریلات به واکنش‌پذیری بالای گروه‌های اپوکسی گلیسیدیل متاکریلات نسبت داده می‌شود (۱۳). ترکیب گلیسیدیل‌متاکریلات اصلاح‌کننده دیواره می‌باشد، درحالی‌که متیل‌متاکریلات پلیمرحفره‌ای می‌باشد که قابلیت واکنش با گلیسیدیل‌متاکریلات را دارد. اصلاح گلیسیدیل‌متاکریلات/متیل‌متاکریلات با برقراری

(Fourier Transform Infrared)، آرد چوب شاهد و اصلاح‌شده درون آون تحت دمای 103 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. نمونه‌ها توسط دستگاه FTIR مدل Cary 630 2017 ساخت شرکت Agilent آمریکا مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج در طول موج $4000-500 \text{ cm}^{-1}$ ثبت شد.

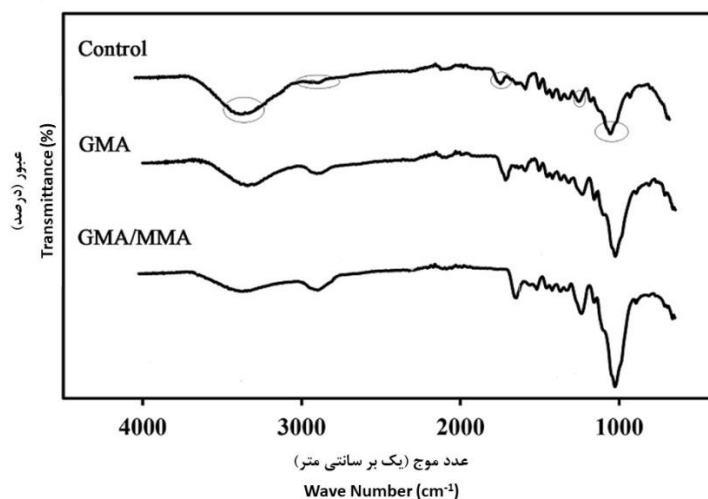
ارزیابی پایداری حرارتی آرد چوب: پایداری حرارتی مواد مرکب با استفاده از تحلیل گر وزن‌سنجی گرمایی (TGA) توسط دستگاه STA ۵۰۳ ساخت کشور آلمان (BAHR) در دامنه دمای ۲۵ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در محیط نیتروژن و با نرخ افزایش دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه اندازه‌گیری شد.

فرآیند اختلاط و ساخت فرآورده مرکب چوب پلاستیک: نمونه‌های چوب پلاستیک با استفاده از آرد چوب و پلی‌پروپیلن به نسبت‌های وزنی ۸۰:۲۰، ۷۰:۳۰ و ۶۰:۴۰ درصد، بدون و با انیدرید مالئیک پیوند شده به پلی‌پروپیلن به‌عنوان عامل جفت‌کننده به مقدار ۳ درصد تولید شدند. فرآورده حاوی آرد چوب اصلاح‌شده با GMA و GMA/MMA نیز در همان نسبت وزنی اختلاط آرد چوب اصلاح‌شده به پلی‌پروپیلن، بدون جفت‌کننده ساخته شدند. اختلاط هر ترکیب در دستگاه اکسترودر دو ماریچچه غیرهمسوگرد، مدل GMBH ساخت شرکت COLLIN، به روش مذاب در دمای اختلاط ۱۵۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت چرخش پیچ ۶۰ rpm انجام شد. سپس با دستگاه آسیاب نیمه‌صنعتی مدل WIESER WGLS، نمونه‌های بی‌شکل حاصل از مخلوط‌ساز به گرانول تبدیل شدند. نمونه‌های آزمون با روش قالب‌گیری تزریقی و با استفاده از دستگاه تزریق ساخت شرکت ایمن‌ماشین ساخته شدند. فشار تزریق ۵۰ بار، دمای لوله و دما نازل ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد و دمای قالب ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود.

ارزیابی خواص فرآورده مرکب چوب پلاستیک: برای اندازه‌گیری جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت

متاکریلات و متیل‌متاکریلات حاوی گروه کربونیل می‌باشند که شدت متفاوت جذب گروه کربونیل را می‌توان به افزایش وزن متفاوت ناشی از این تیمارها نسبت داد (گلیسیدیل‌متاکریلات > گلیسیدیل‌متاکریلات/متیل‌متاکریلات) (۱۳). هم‌چنین، حضور بنزوئیل پراکساید به‌عنوان آغازگر واکنش پلیمریزاسیون، باعث تکرار واحد مونومری در سطح ذرات آرد چوب شده است که این مسأله نیز می‌تواند شدت پیک گروه کربونیل را افزایش دهد (۱۴). پیک 1250 cm^{-1} مربوط به پیوند (C-O) یگانه استری است که شدت آن با اضافه شدن این گروه‌ها در نمونه‌های اصلاح‌شده با متیل‌متاکریلات افزایش یافت (۱۴). پیک 1050 cm^{-1} مربوط به پیوند (C-O) اتری و الکی می‌باشد. شدت پیک ناحیه 1050 cm^{-1} و 1250 cm^{-1} در سطح GMA/MMA نیز نسبت به GMA بیش‌تر است که علت آن نیز به دلیل تکرار واحدهای مونومری متیل‌متاکریلات، نسبت به سطح منفرد اصلاح (اصلاح دیواره‌ای) می‌باشد (۱۵، ۱۶ و ۱۷).

واکنش بین ذرات آرد چوب اصلاح‌شده با گلیسیدیل‌متاکریلات و مونومر متیل‌متاکریلات به کاهش محسوس‌تر پیک گروه هیدروکسیل انجامید. پیک ناحیه 2900 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی آلفاتیکی پیوند (C-H)، در نمونه‌های حاوی گلیسیدیل‌متاکریلات/متیل‌متاکریلات بیش‌تر از سایر نمونه‌ها بود، علت آن را می‌توان به پلیمریزاسیون مونومر متیل‌متاکریلات در حضور آغازگر بنزوئیل پراکساید نسبت داد که به حضور محسوس‌تر گروه‌های آلفاتیکی در ساختار چوب منتهی شده است. این نتیجه در طیف حاصل از اصلاح چوب با مونومر متیل‌متاکریلات نیز مشاهده گردید (۱۴). هم‌چنین، در پژوهش‌های پیشین، افزایش شدت پیک ناحیه 2900 cm^{-1} متعاقب اصلاح چوب با گلیسیدیل‌متاکریلات به گروه‌های متیل ساختار گلیسیدیل‌متاکریلات پیوند داده به دیواره سلولی و هم‌بسپارش گلیسیدیل‌متاکریلات با مونومر وینیلی در ساختار چوب نسبت داده شد (۱۳). پیک 1730 cm^{-1} مربوط به گروه کربونیل است. همه مواد شیمیایی مورد استفاده اعم از گلیسیدیل

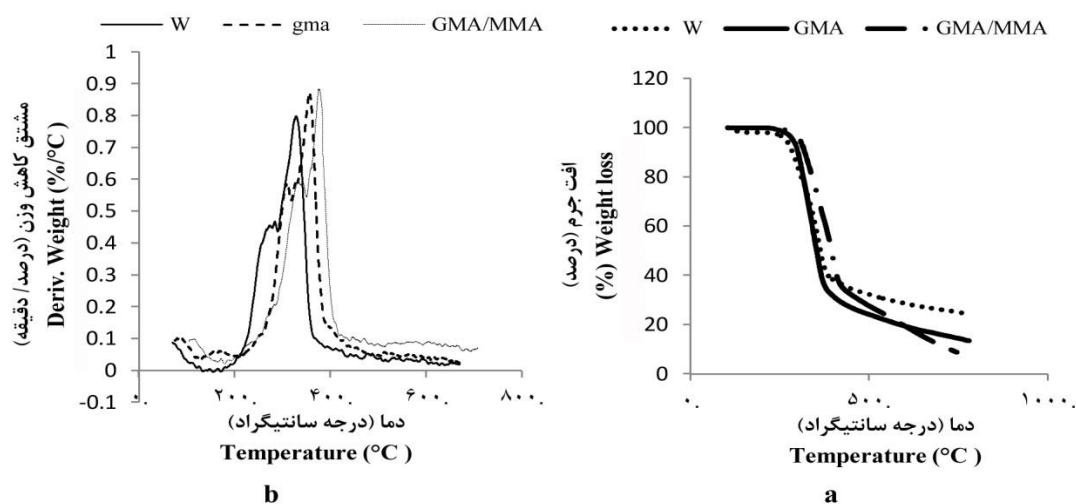


شکل ۱- نمودار طیف‌سنجی زیر قرمز نمونه‌های آرد چوب: شاهد (Control)، اصلاح‌شده با: گلیسیدیل‌متاکریلات (GMA) و گلیسیدیل‌متاکریلات/متیل‌متاکریلات (GMA/MMA).

Figure 1. The FTIR of wood flours: Control, modified with: glycidyl methacrylate (GMA) and glycidyl methacrylate/methyl methacrylate (GMA/MMA).

گردید، زیرا این ترکیبات دارای گروه‌های آلیفاتیک می‌باشند که متعاقب گرمادهی، تخریب می‌شوند. فرآورده حاوی آرد چوب اصلاح تلفیقی شده در مقایسه با سایر نمونه‌ها از مقاومت حرارتی بهتری برخوردار بود زیرا پایداری حرارتی پلیمر بیش‌تر از چوب است (۱۸). حضور پلیمر در آرد چوب اصلاح تلفیقی شده در مقایسه با شاهد به علت تخریب بیش‌تر پلیمر، خاکستر کم‌تری را باقی گذاشت. مطالعات پیشین ثابت کرد که تخریب پلیمرهای وینیلی به علت جداشدگی زنجیره پلیمر اتفاق می‌افتد (۱۹). این تجزیه زنجیره پلیمر به افت جرم پلیمر منتهی می‌شود. پلیمرها در مقایسه با چوب، افت جرم بیش‌تری دارند که علت آن حضور گروه‌های آلیفاتیک (گروه‌های متیل و متیلن) و استر در ساختار پلیمر می‌باشد و بر همین اساس، کم‌ترین میزان خاکستر باقی‌مانده در سطح تلفیقی مشاهده شد (۲۰).

پایداری حرارتی آرد چوب: جدول ۱ پایداری حرارتی نمونه‌های شاهد، GMA/MMA و GMA را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، پایداری حرارتی سطح تلفیقی بالاتر از سطح شاهد بود. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، دمای آغاز تخریب حرارتی آرد چوب شاهد کم‌تر از نمونه‌های اصلاح‌شده است که معرف پایداری حرارتی کم‌تر آرد چوب شاهد می‌باشد. دلیل افزایش پایداری حرارتی متعاقب اصلاح با گلیسیدیل متاکریلات را می‌توان به تغییر ساختار همی‌سلولز که در بین پلیمرهای تشکیل‌دهنده چوب، کم‌ترین پایداری حرارتی و بیش‌ترین واکنش‌پذیری را دارد، متعاقب واکنش گروه‌های هیدروکسیل با گروه‌های اپوکسی نسبت داد (۱۵). تبدیل گروه‌های هیدروکسیل الکیلی به گروه‌های اتری مقاومت حرارتی را افزایش می‌دهد. اتصال ترکیب آلی گلیسیدیل متاکریلات به ساختار چوب باعث کاهش جرم بیش‌تر نسبت به سطح شاهد



شکل ۲- آنالیز پایداری حرارتی نمونه‌های آرد چوب: الف) TGA و ب) DTG. (شاهد (W)، اصلاح‌شده با: گلیسیدیل متاکریلات (GMA)، گلیسیدیل متاکریلات / متیل متاکریلات (GMA/MMA)).

Figure 2. Thermogravimetry analysis of wood flour samples: a) TGA and b) DTG: Control (W), modified with: glycidyl methacrylate (GMA), glycidyl methacrylate/methyl methacrylate (GMA/MMA).

جدول ۱- تخریب حرارتی آرد چوب‌های شاهد و اصلاح‌شده.

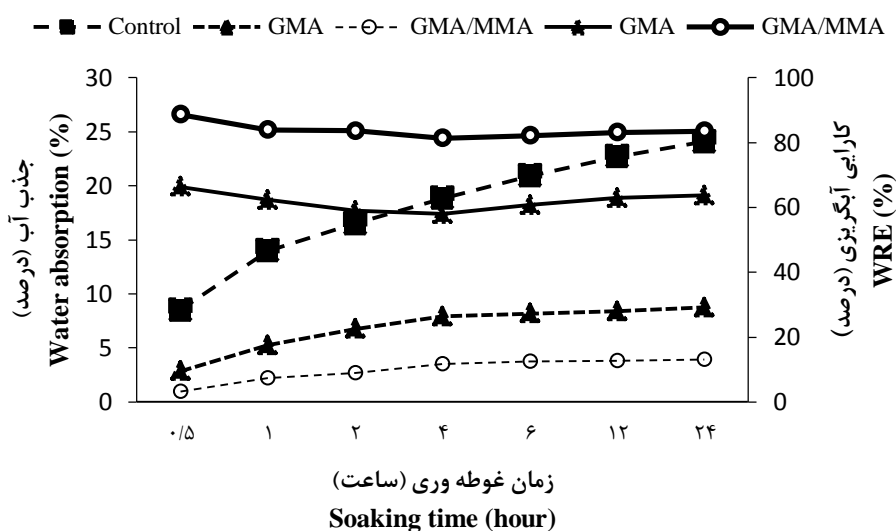
Table 1. Thermal degradation of control and modified wood flours.

| خاکستر Ash | W_{Tf} | T_f | W_{Tmax} | T_{max} | T_i | سطح تیمار Treatment level |
|---------------|----------|-------|------------|-----------|-------|------------------------------|
| 25 | 59 | 363 | 26 | 322 | 209 | Control |
| 14 | 62 | 371 | 38 | 349 | 228 | GMA |
| 9 | 66 | 414 | 44 | 373 | 269 | GMA/MMA |

T_i -دمای شروع تخریب، T_{max} -دمایی که حداکثر تخریب اتفاق می‌افتد، W_{Tmax} -کاهش وزن متناظر با حداکثر دمای تخریب، T_f -دمای تخریب نهایی، W_{Tf} -کاهش وزن متناظر با دمای تخریب نهایی

چوب اصلاح‌شده با GMA/MMA، هر دو پیک در مقایسه با دو سطح دیگر به دمای بالاتر انتقال یافتند. جذب آب و کارایی آب‌گیری آرد چوب: افزایش وزن آرد چوب اصلاح‌شده در دو اصلاح GMA و GMA/MMA به ترتیب ۳۵/۵ و ۶۳/۴۲ درصد گزارش شد. بر اساس نتایج، نمونه شاهد جذب آب بیش‌تر از نمونه‌های اصلاح‌شده نشان داد و در خاتمه زمان غوطه‌وری، جذب آب آرد چوب اصلاح‌شده با GMA و GMA/MMA به ترتیب ۶۳/۷۵ و ۸۳/۵۵ درصد در مقایسه با شاهد کاهش یافت. (شکل ۳). این امر به دلیل حضور گروه‌های هیدروکسیل آب‌دوست متعدد در پلیمرهای تشکیل‌دهنده دیواره سلولی چوب است.

در منحنی DTG مربوط به آرد چوب شاهد، دو پیک مشاهده گردید که پیک نخست، مربوط به تخریب همی‌سلولز (۲۱) و پیک دوم مربوط به تخریب سلولز (۲۲) است. در منحنی DTG مربوط به آرد چوب اصلاح‌شده با گلیسیدیل‌متاکریلات، نیز دو پیک مشاهده شد که پیک اول به دلیل تغییر ساختار همی‌سلولز، در مقایسه با سطح شاهد به دمای بالاتر انتقال یافت. پیک دوم نیز متعاقب اصلاح با گلیسیدیل‌متاکریلات به دمای بالاتر انتقال یافت که می‌تواند بیانگر تغییر بخش آمورف سلولز طی واکنش گروه هیدروکسیل با گروه اپوکسی گلیسیدیل متاکریلات باشد (۱۵). در منحنی DTG مربوط به آرد



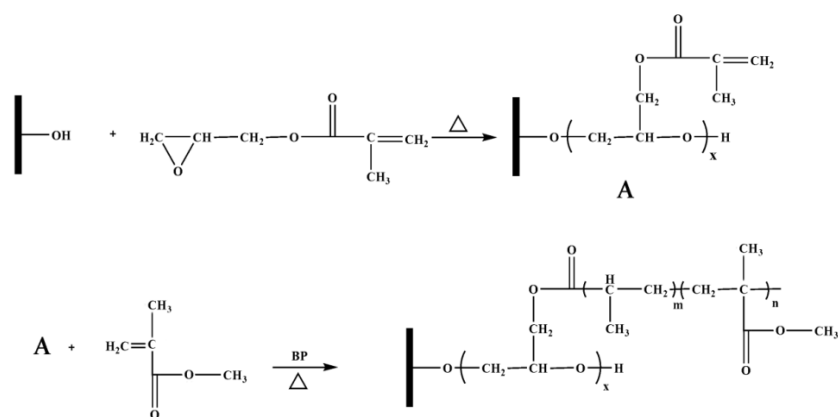
شکل ۳- اثر اصلاح بر جذب آب (خط چین) و کارایی آب‌گیری (خط پیوسته) نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده طی زمان غوطه‌وری.

Figure 3. Effect of modification on the water absorption (dashed line) and WRE (continuous line) of control and modified samples during soaking time.

فراورده‌های مرکب چوب‌پلاستیک حاصل انجامید (۲۴).

افزودن متیل متاکریلات در سطح تلفیقی و واکنش این ترکیب با دیواره سلولی آرد چوب اصلاح شده با گلیسیدیل متاکریلات، به تشدید افزایش وزن و آب‌گریزی آرد چوب انجامید (۲۵). متوسط افزایش وزن در این سطح اصلاح، نشان‌دهنده پلیمرشدن کارآمد مونومر به صورت ماده جامد در چوب است (۲۶). ترکیب گلیسیدیل متاکریلات، اصلاح‌کننده دیواره و متیل متاکریلات، با امکان پلیمره شدن در ساختار چوب می‌باشد. شمای احتمالی واکنش این دو ترکیب اصلاح‌کننده در شکل ۴ نشان داده شده است.

در ترکیب دو عاملی گلیسیدیل متاکریلات با وزن مولکولی کم، پیوند دوگانه و گروه اپوکسی وجود دارد. این ترکیب با قابلیت نفوذ در دیواره، از گروه انتهایی اپوکسی با گروه هیدروکسیل چوب واکنش می‌دهد و با توانایی برقراری پیوند کووالانسی بین گروه اپوکسی و گروه هیدروکسیل چوب، موجب افزایش ثبات ابعاد چوب می‌شود (۱۸، ۲۳). افزایش جانمایی گروه‌های هیدروکسیل در دسترس توسط گروه‌های اپوکسی، موجب افزایش بخش غیرآبدوست چوب می‌گردد. اصلاح کاه گندم به روش‌های قلیایی، حرارتی و پلاسما نیز با تشکیل پیوندهای داخلی قوی‌تر و کاهش جذب رطوبت، به بهبود ثبات ابعاد



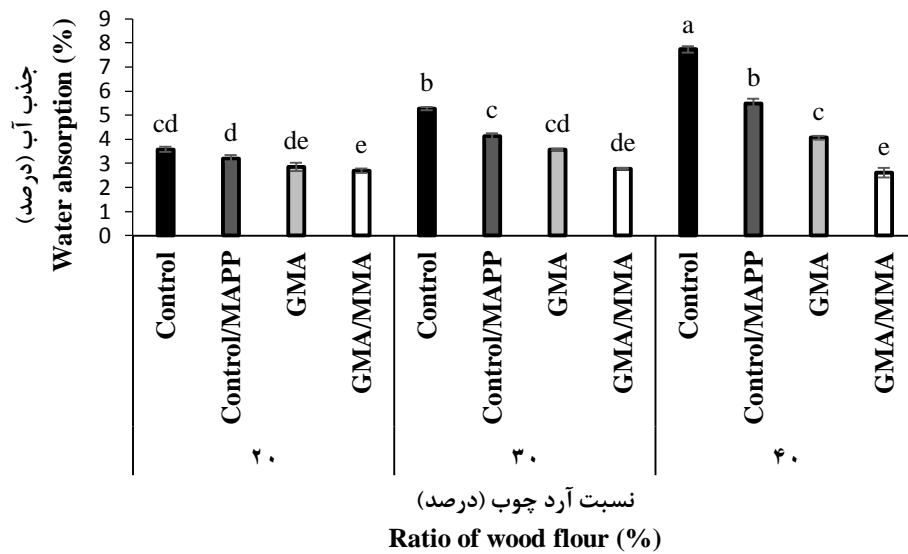
شکل ۴- شمای کلی واکنش گلیسیدیل متاکریلات (A) و گلیسیدیل متاکریلات / متیل متاکریلات (B) با آرد چوب.

Figure 4. The reaction scheme of glycidyl methacrylate (A) and glycidyl methacrylate/methyl methacrylate (B) with wood flour.

آبدوستی بیش‌تر الیاف لیگنوسلولزی شاهد در مقایسه با ماده زمینه پلیمری نسبت داد که با اصلاح کاهش یافت. بر اساس نتایج، جذب آب نمونه‌های اصلاح‌شده کم‌تر از نمونه‌های شاهد بود. در خاتمه زمان غوطه‌وری، اختلاف معنی‌دار بین نمونه‌های اصلاح‌شده با شاهد مشاهده شد. کم‌ترین جذب آب مربوط به نمونه‌های دارای آرد چوب اصلاح‌شده با گلیسیدیل متاکریلات/متیل متاکریلات بود.

آزمون‌های فیزیکی چوب‌پلاستیک

جذب آب و کارایی آب‌گریزی: جذب آب نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با نسبت آرد چوب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج آزمون جذب آب نشان داد که به‌طور کلی، با افزایش نسبت آرد چوب، جذب آب افزایش یافت ولی این افزایش در فرآورده حاوی آرد چوب اصلاح‌شده با گلیسیدیل متاکریلات/متیل متاکریلات معنی‌دار نبود. این نتیجه دور از انتظار نبود که علت را می‌توان به خاصیت

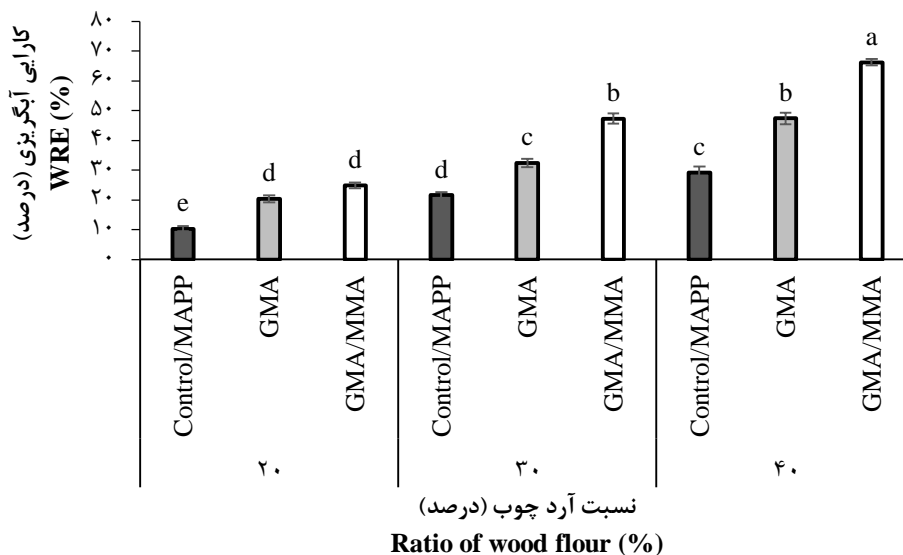


شکل ۵- جذب آب چوب پلاستیک حاوی نسبت‌های مختلف آرد چوب شاهد و اصلاح‌شده.

Figure 5. Water absorption of WPC containing different ratios of control and modified wood flour.

معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد بین نمونه‌های اصلاح‌شده با شاهد مشاهده شد و کارایی آب‌گریزی در نمونه‌های حاوی ۴۰ درصد آرد چوب اصلاح‌شده با GMA/MMA و GMA به ترتیب ۴۷/۴۲ و ۶۶/۲۸ درصد گزارش شد.

کارایی آب‌گریزی نمونه‌های اصلاح‌شده با نسبت آرد چوب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد در شکل ۶ مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج، افزایش کارایی آب‌گریزی نمونه‌های اصلاح‌شده با افزایش نسبت پرکننده محسوس‌تر شد. در خاتمه زمان غوطه‌وری، اختلاف

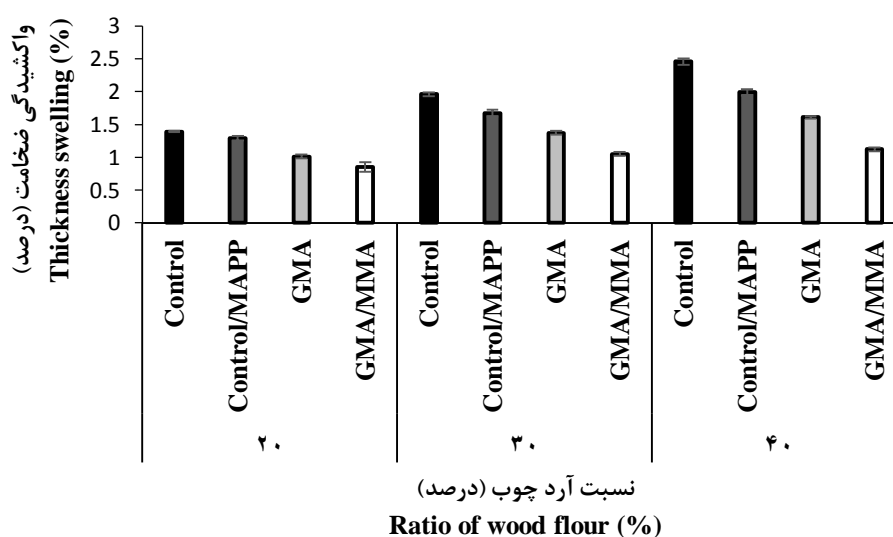


شکل ۶- کارایی آب‌گریزی چوب پلاستیک حاوی نسبت‌های مختلف آرد چوب شاهد و اصلاح‌شده.

Figure 6. WRE of WPC containing different ratios of control and modified wood flour.

اصلاح‌شده را می‌توان به کاهش گروه‌های هیدروکسیل پلی‌ساکاریدها (همی سلولز و سلولز) نسبت داد. این امر سبب کاهش آبدوستی و بهبود ثبات ابعاد فرآورده حاصل می‌شود. بهبود برهمکنش بین فاز پرکننده و ماده زمینه پلیمری نیز موجب کاهش فضا برای نفوذ آب می‌شود.

واکشیدگی ضخامت: بر اساس نتایج، واکشیدگی ضخامت نمونه‌های اصلاح‌شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد کاهش یافت و در خاتمه زمان غوطه‌وری، اختلاف معنی‌داری بین نمونه‌های اصلاح‌شده با شاهد مشاهده شد (شکل ۷). بهبود ثبات ابعاد چوب‌پلاستیک ساخته‌شده از الیاف



شکل ۷- واکشیدگی ضخامت چوب‌پلاستک حاوی نسبت‌های مختلف آرد چوب شاهد و اصلاح‌شده.

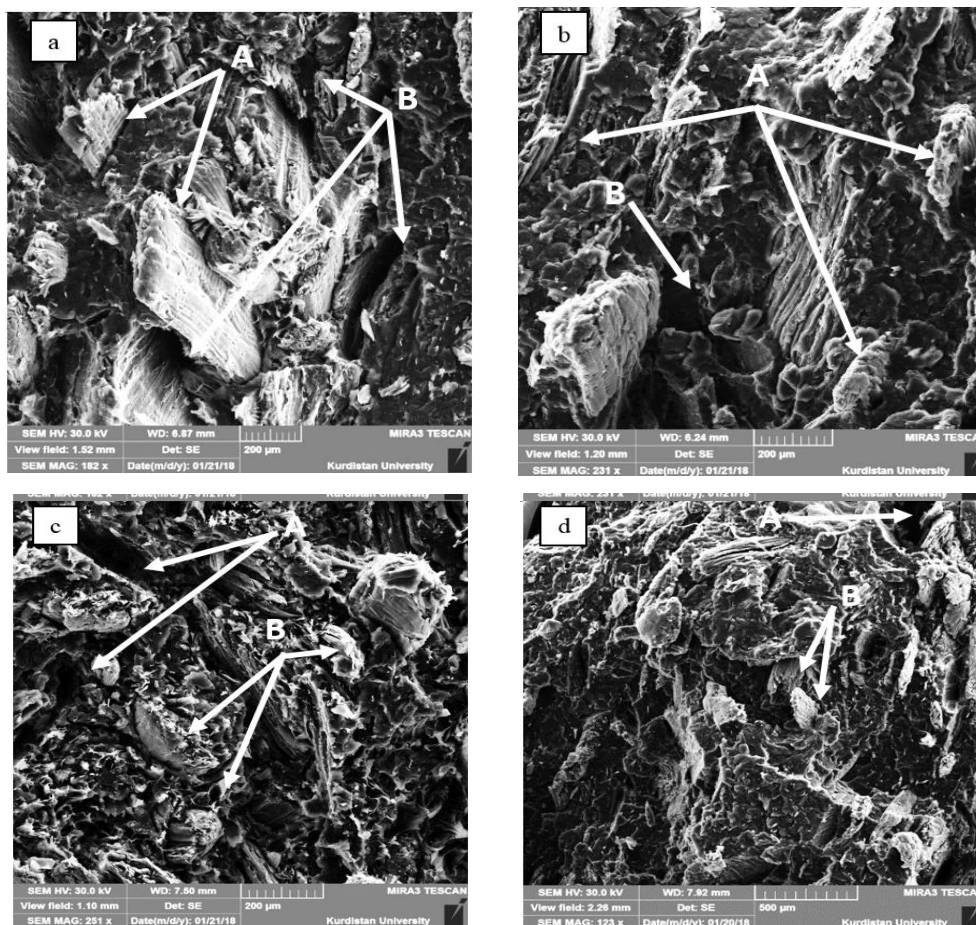
Figure 7. Thickness swelling of WPC containing different ratios of control and modified wood flour.

مشاهده می‌گردد که الیاف بیش‌تری بریده شدند (نقطه A) و علت را می‌توان به برقراری پیوند کووالانسی بین گروه‌های مالئیک‌انیدرید جفت‌کننده با گروه‌های هیدروکسیل پلیمرهای چوب نسبت داد. نقطه B نشان‌دهنده حفره در سطح ماده زمینه‌ای است؛ که البته در مقایسه با نمونه فاقد جفت‌کننده، تعداد حفرات کم‌تر بوده است (شکل ۸b). آرد چوب اصلاح‌شده با گلیسیدیل‌متاکریلات در ماده زمینه‌ای پلیمری اتصال خوبی برقرار کرد و بریده شدن الیاف در سطح شکست را می‌توان به تشکیل پیوند و بهبود سازگاری بین ماده زمینه‌ای و آرد چوب نسبت داد (نقطه A) (شکل ۱۰c) (۲۷). بر اساس سطح شکست

تصاویر میکروسکوپ الکترونی چوب‌پلاستیک: شکل ۸ تصویر سطح شکست نمونه کشش حاوی ۴۰ درصد آرد چوب‌های: شاهد، شاهد در حضور جفت‌کننده و اصلاح‌شده با GMA و GMA/MMA را نشان می‌دهد. تصویر سطح شکست نمونه کشش حاوی ۴۰ درصد آرد چوب شاهد فاقد جفت‌کننده نشان داد که برهمکنش بین ذرات آرد و ماده زمینه‌ای ضعیف بود و پرکننده در سطح شکست، بدون بریدگی از ماده زمینه بیرون کشیده شد (نقطه A)، هم‌چنین در سطح کشش، حفره‌هایی دیده می‌شود که آرد چوب شاهد از آن خارج شدند (نقطه B) (شکل ۸a). در سطح شکست فرآورده حاوی جفت‌کننده

متاکریلات است. بررسی تصاویر سطح شکست نمونه کشش چوب پلاستیک پلی‌پروپیلن حاوی آرد ساقه آفتابگردان اصلاح گرمایی شده نیز بیانگر یکپارچگی بیش‌تر ساختار چوب پلاستیک، توزیع یکنواخت‌تر آرد ساقه آفتابگردان و حفره‌های کم‌تر در سطح شکست بوده است (۵).

شکل ۱۰d، با جداشدن کم‌تر آرد از ماده زمینه‌ای، نمونه حاوی آرد چوب اصلاح‌شده با GMA/MMA حفره‌های کم‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها، در سطح ماده زمینه‌ای نشان داد. در این سطح، حفره محدودتر و تعداد ذرات آرد کم‌تر دیده می‌شود که بیانگر حضور بیش‌تر پلیمر به‌واسطه اصلاح با ترکیب متیل



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی چوب پلاستیک حاوی ۴۰ درصد آرد چوب: (a) شاهد، (b) حاوی جفت‌کننده، (c) اصلاح‌شده با: GMA و (d) GMA/MMA.

Figure 8. Field emission scanning electron microscopy images of WPC containing 40% of wood flour: a) control, b) containing coupling agents, modified wood flour with: c) GMA and d) GMA/MMA.

فیزیکی آرد چوب و متعاقباً خواص فیزیکی چندسازه ایجاد کرد. اصلاح آرد چوب با ترکیب دوعاملی گلیسیدیل متاکریلات به بهبود چسبندگی و سازگاری پلیمر متیل متاکریلات به دیواره سلولی آرد چوب انجامید. اصلاح دیواره با گلیسیدیل متاکریلات با

نتیجه‌گیری

براساس نتایج، اصلاح با ترکیبات آکریلاتی گلیسیدیل متاکریلات و متیل متاکریلات با تغییرات ساختار شیمیایی که در طیف‌سنجی تأیید گردید، بهبود معنی‌داری در پایداری گرمایی و خواص

خواص فیزیکی نسبت به اصلاح دیواره‌ای گلیسیدیل متاکریلات ایجاد کرد. اصلاح فرآورده مرکب چوب پلاستیک در پژوهش حاضر می‌تواند با افزایش عمر مفید فرآورده حاصل در محوطه‌های بیرونی مانند نرده و کف‌پوش‌ها، قاب‌های درب و پنجره و تخته‌های سازه‌های پیش‌ساخته، به گسترش کاربرد آن بیانجامد.

کاهش گروه‌های هیدروکسیل، تغییر ساختار هلوسلولز و کاهش پتانسیل جذب رطوبت دیواره سلولی موجب بهبود سازگاری پرکننده آرد چوب با زمینه پلیمر شد که این اثر در اصلاح ترکیبی با پلیمر محسوس‌تر شد. در مقایسه بین دو سطح اصلاح، گلیسیدیل متاکریلات/ متیل متاکریلات با ایجاد ساختاری یکنواخت‌تر با سازگاری مطلوب‌تر بین اجزا، بهبود محسوس‌تری در

منابع

- Pundhir, N., Zafar, S., & Pathak, H. (2021). Performance evaluation of HDPE/MWCNT and HDPE/kenaf composites. *J. of Thermoplastic Composite Materials*. 34 (10), 1315-1333.
- Saini, G., Narula, A. K., Choudhary, V., & Bhardwaj. J. (2009). Effect of Particle Size and Alkali Treatment of Sugarcane Bagasse on Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of PVC-Bagasse Composites. *J. of Reinforced Plastics and Composites*. 29 (5), 731-740.
- Oksman, K., & Sain, M. (2008). Wood-Polymer Composites. Woodhead Publishing Ltd, Great Abington, Cambridge, UK, 366p.
- Shahreki, A., Nosrati Sheshkal, B., Mohebbi Gargari, R., & Abdouss, M. (2016). The effect of nano clay and MAPP coupling agent on physical, mechanical and natural durability of polypropylene Haloxylon wood flour composite. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 23 (2), 265-284. [In Persian]
- Ghorbani, M., Zabihzadeh, S. M., & Fooladian, F. (2017). Effect of thermal modification on physical and mechanical behavior of sunflower-polypropylene composites. *Iranian J. of Wood and Paper Science Research*. 32 (3), 392-401. [In Persian]
- Li, X., Tabil, L. G., & Panigrahi S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A Review. *J. of Polymer Environment*. 15, 25-33.
- Ghorbani, M., Nikkhah Shahmirzadi, A., & Toopa A. (2020). Effect of densification on the practical properties of chemical and thermal modified poplar wood. *Iranian J. of Wood and Paper Industries*. 11 (2), 185-197. [In Persian]
- Ismaeili 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]
- Fallah-Moghadam, P., & Mohebbi, B. (2012). Water Absorption and Dimensional Stability of Polypropylene/Acetylated Wood Fiber. *J. of Wood & Forest Science and Technology*. 18 (4), 29-43. [In Persian]
- Ozmen, N., Cetin, N. S., Mengeloglu, F. M., Birinci, E., & Karakus, K. [2013]. Effect of wood acetylation with vinyl acetate and acetic anhydride on the properties of wood plastic composite. *Bioresources*. 8 (1), 753-767.
- Kalagar, M., Baziyar, B., Khademi eslam, H., Ghasmi, E., & Hemmasi, A. H. (2015). The investigation on composites produced using polylactic acid/wheat straw fibers treated with silane. *Iranian J. of Wood and Paper Science Research*. 30 (2), 207-219. [In Persian]
- Koohestani, B., Ganetri, I., & Yilmaz, E. (2017). Effects of silane modified minerals on mechanical, microstructural, thermal, and rheological properties of wood plastic composites. *Composites Part B Engineering*. 111, 103-111.

13. Ghorbani, M., Asghari Aghmashhadi, Z., Amininasab, S. M., & Abedini, R. (2019). Effect of different coupling agents on chemical structure and physical properties of vinyl acetate/wood polymer composites. *J. of Applied Polymer Science*. 136, 47467.
14. Abbasi, Z., Ghorbani, M., Abedini, R., & Amininasab, S. M. (2021). Physicochemical and microscopic properties of wood polymer modified with silane compounds. *J. of Wood & Forest Science and Technology*, 28 (2), 59-73. [In Persian]
15. Devi, R. R., & Maji, T. (2007). Effect of glycidyl methacrylate on the physical properties of wood polymer composites. *Polymer Composites*. 28 (1), 1-5.
16. Li, Y., Liu, Y., Li, J., Lv, D., & Fan, X. (2010). Fabrication of a Novel wood-based composite by in-situ polymerization functional monomers. International conference on measuring technology and mechatronics automation, Changsha, China, 208-211. doi:10.1109/ICMTMA.160.
17. Li, Y. F., Wu, Q. L., Li, J. Liu, Y. X., Wang, X. M., & Liu, Z. B. (2011). Improvement of dimensional stability of wood via combination treatment: Swelling with maleic anhydride and grafting with glycidyl methacrylate and methyl methacrylate. *Holzforschung*. 66 (1), 59-66.
18. Devi, R. R., Maji T. K., & Banjere, A. N. (2004). Studies on dimensional stability and thermal properties of rubber wood chemically modified with styrene and glycidyl methacrylate. *J. of Applied Polymer Science*. 93 (4), 1938-1945.
19. Yongfeng, L., Xiaoying, D., Zeguana, L., Wanda, J., & Yixing L. (2012). Effect of polymer in situ synthesized from methyl methacrylate and styrene on the morphology, thermal behavior, and durability of wood. *J. of Applied Polymer Science*. 128 (1), 13-20.
20. Denq, B. L., Hu, Y. S., Chiu, W. Y., Chen, L. W., & Chiu, Y. S. (1997). Thermal degradation behavior and physical properties for poly (methyl methacrylate) blended with propyl ester phosphazene. *Polymer Degradation and Stability*. 57 (3), 269-278.
21. Becidan, M., Skreiberg, O., & Hustad, J. E. (2007). Experimental study on pyrolysis of thermally thick biomass residues samples: Intra-sample temperature distribution and effect of sample weight ("scaling effect"). *Fuel*. 17-18 (86), 2754-2760.
22. Zhang, X., Tian, X., Zheng, J., Yao, X., Liu, W., Cui, P., & Li, Y. (2008). Relationship between microstructure and tensile properties of PET/Silica Nano composite fibers. *J. of Macromolecular Science*. 47 (2), 368-377.
23. Devi, R. R., & Maji T. (2002). Studies of properties of rubber wood with impregnation of polymer. *Bulletin of Materials Science*. 25 (6), 527-531.
24. Hýsek, Š., Podlena, M., Bartsch, H., Wenderdel, C., & Böhm, M. (2018). Effect of wheat husk surface pre-treatment on the properties of husk-based composite materials. *Industrial Crops and Products*. 125, 105-113.
25. Dong, X., Li, Y., Fu, Y., Gao, J., & Liu, Y. (2012). Characterization and durability of wood-polymer Composites prepared by in-situ polymerization of methyl methacrylate and styrene. *Scientific Research and Essays*. 7 (24), 2143-2149.
26. Li, Y., Liu, Z., Dong, X., Fu, Y., & Liu, Y. (2013). Comparison of decay resistance of wood and wood polymer composite prepared by in-situ polymerization of monomers. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 84, 401-406.
27. Ismaeilimoghadam, S., Masoudifar, M., Shamsian, M., Nosrati Sheshkal, B., Seyedzadeh & Otaghsaraei, S. M. (2016). The effect of chemical treatment of wood flour on some properties of wood-plastic Composite. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 7 (3), 449-462. [In Persian]