

Furfurylated superparamagnetic poplar wood: morphological, physical, and mechanical properties

Mahdi Mashkour^{*1}, Davood Rasouli², Hossein Yousefi³, Afsaneh Rajabi⁴

1. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mashkour@gau.ac.ir
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: hyousefi@gau.ac.ir
4. M.Sc., Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: a.ragabi@yahoo.com

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 08.17.2022

Revised: 12.02.2022

Accepted: 12.05.2022

Keywords:

Furfuryl alcohol,
In situ synthesis,
Magnetite nanoparticle,
Magnetic wood,
Wood-polymer

ABSTRACT

Background and Objectives: Magnetic wood is one of the wood nanotechnology products with a wide range of potential industrial applications. Superparamagnetic wood is generally produced by in situ synthesis of magnetic nanoparticles in the wood structure. Among the various wood species used for the production of magnetic wood, fast-growing species are gaining increasingly important. On the other hand, the inherent properties of wood, such as water absorption, dimensional instability, and susceptibility to biodegradation and weathering, may limit the potential of magnetic wood as an advanced engineering material. This study aimed to investigate the effect of furfurylation on modifying the physical and mechanical properties of superparamagnetic poplar wood prepared by in situ synthesis of magnetic nanoparticles.

Materials and Methods: In situ synthesis of magnetite nanoparticles inside poplar wood (*Populus deltoides*) was carried out using a solution of iron II and III chlorides with a molar ratio of 2:1 in a vacuum/pressure chamber. Then the treated wood was converted to magnetic wood by draining the solution of iron cations and replacing it with a one-molar solution of sodium hydroxide. After washing the excess alkali solution and drying, the magnetic poplar wood was treated with two different concentrations of furfuryl alcohol solution under the vacuum/pressure system and converted into wood polymer after performing the required heat treatments. The samples were characterized using a field emission scanning electron microscope, X-ray diffraction, vibrating sample magnetometry, a static bending test, and long-term water absorption and thickness swelling tests.

Results: The conversion of poplar wood to magnetic wood reduced the weight percentage gain (WPG) resulting from the furfurylation process. The saturation magnetization of the magnetic wood decreased significantly after furfurylation and conversion to the wood-polymer. Changing the concentration of the furfuryl alcohol solution did not substantially affect the saturation magnetization of the produced magnetic wood-polymers. The furfurylation treatment significantly reduced the samples' flexural strength and flexural modulus. The flexural properties of magnetic and non-magnetic wood polymer samples treated with the same concentration

of furfuryl alcohol solution showed no significant difference. Microscopic examination of the fracture surface of the wood cell wall in the specimens subjected to the bending test showed that furfurylation changed the behavior of the fibers from ductile to brittle, which was consistent with the results of the bending test. On the other hand, as the WPG increased, the specimens' long-term water absorption and thickness swelling decreased. Magnetic wood-polymer samples showed higher values for water absorption and thickness swelling than non-magnetic wood-polymer specimens.

Conclusion: Based on the results of this study, it is recommended that magnetic poplar wood, if it must be used in high-humidity environments, be converted to magnetic wood-polymer with furfuryl alcohol, provided it has the required mechanical properties.

Cite this article: Mashkour, Mahdi, Rasouli, Davood, Yousefi, Hossein, Rajabi, Afsaneh. 2022. Furfurylated superparamagnetic poplar wood: morphological, physical, and mechanical properties. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 29 (3), 15-34.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2022.20509.1978

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

چوب صنوبر سوپرپارامغناطیس فور فوریله: ویژگی‌های ریخت‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی

مهدی مشکور^{۱*}، داود رسولی^۲، حسین یوسفی^۳، افسانه رجبی^۴

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mashkour@gu.ac.ir
۲. استادیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: rasouli@gu.ac.ir
۳. دانشیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: hyousefi@gu.ac.ir
۴. کارشناس ارشد گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: a.ragabi@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: چوب مغناطیسی یکی از فرآورده‌های نانوفناوری چوب است که قابلیت‌های کاربردی بالایی را در بخش‌های مختلف صنعتی نشان داده است. چوب سوپرپارامغناطیس فرآورده‌ای است که عموماً با سنتز درجای نانوذرات مغناطیسی درون بافت چوب تولید می‌شود. در این میان، چوب گونه‌های تند رشد توجه بیشتری را به خود معطوف نموده‌اند. از سوی دیگر، برخی ویژگی‌های ذاتی چوب، مانند جذب آب و عدم ثبات ابعادی و نیز آسیب‌پذیری در برابر عوامل مخرب بیولوژیکی و هوازدگی می‌توانند دامنه کاربرد چوب مغناطیسی را به‌عنوان یک ماده پیشرفته مهندسی محدود نمایند. این مطالعه با هدف ارزیابی تأثیر تیمار فورفوریل‌اسیون بر اصلاح رفتارهای فیزیکی-مکانیکی چوب صنوبر سوپرپارامغناطیس تولیدشده با روش سنتز درجای نانوذرات مغناطیسی انجام شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴	مواد و روش‌ها: سنتز درجای نانوذرات مگنتیت درون چوب صنوبر (<i>Populus deltoides</i>)، با استفاده محلول کلریدهای آهن II و III، با نسبت مولی ۲:۱، درون یک سیلندر خلاء/فشار انجام شد. پس‌از آن، چوب تیمار شده با زهکشی کاتیون‌های آهن و جایگزینی آن با محلول یک مولار هیدروکسید سدیم به چوب مغناطیسی تبدیل شد. پس از شستشوی محلول سود اضافی و خشک کردن، چوب صنوبر مغناطیسی، تحت سیستم خلاء-فشار، با دو غلظت متفاوت از محلول اشباع فورفوریل‌الکل تیمار و به دنبال انجام تیمارهای حرارتی لازم به چوب-پلیمر تبدیل شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان، پراش پرتو ایکس، مغناطیس‌سنجی نمونه ارتعاشی، آزمون خمش استاتیک و آزمون جذب آب و واکنش‌پذیری ضخامت بلندمدت، جهت ارزیابی رفتار آزمون‌ها استفاده شد.
واژه‌های کلیدی: چوب-پلیمر، چوب مغناطیسی، سنتز درجا، فورفوریل‌الکل، نانوذره مگنتیت	

یافته‌ها: تبدیل چوب صنوبر به چوب مغناطیسی، درصد افزایش وزن حاصل از فرایند فورفوریل‌اسیون را کاهش داد. مغناطش اشباع چوب مغناطیسی در نتیجه تیمار فورفوریل‌اسیون و تبدیل شدن به چوب-پلیمر کاهش معناداری را نشان داد. تغییر غلظت محلول فورفوریل‌الکل تأثیر معناداری را بر مغناطش اشباع چوب-پلیمرهای مغناطیسی تولیدشده نشان نداد. تیمار فورفوریل‌اسیون، مقاومت خمشی و مدول خمشی نمونه‌ها را کاهش داد. رفتار خمشی الکل تفاوت معناداری را نشان نداد. بررسی میکروسکوپی سطح شکست دیواره الیاف چوب در نمونه‌های خمش اثر تیمار فورفوریل‌اسیون در تغییر رفتار دیواره الیاف از منعطف به ترد را نشان داد که منطبق با نتایج آزمون خمش بود. از سوی دیگر، با افزایش درصد جذب ماده پلیمری در ساختار چوب، جذب آب بلندمدت و واکنشیدگی ضخامت نمونه‌ها کاهش یافت. نمونه‌های چوب-پلیمر مغناطیسی جذب آب و واکنشیدگی ضخامت بیشتری در مقایسه با نمونه‌های چوب-پلیمر غیرمغناطیسی نشان دادند.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج این مطالعه، در صورت لزوم استفاده از چوب صنوبر مغناطیسی در محیط‌های با رطوبت بالا، تبدیل آن به چوب-پلیمر مغناطیسی با استفاده از فورفوریل‌الکل توصیه می‌شود، مشروط بر آن‌که ویژگی‌های مکانیکی مورد نیاز را دارا باشد.

استناد: مشکور، مهدی، رسولی، داود، یوسفی، حسین، رجبی، افسانه (۱۴۰۱). چوب صنوبر سوپرپارامغناطیس فورفوریل‌ه: ویژگی‌های ریخت‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۲۹ (۳)، ۱۵-۳۴.

DOI: 10.22069/JWFST.2022.20509.1978



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

با پیشرفت دانش بشری، گام به گام دامنه کاربرد چوب و محصولات پیشرفته مبتنی بر آن توسعه بیشتری یافته است. امروزه با بهره‌گیری از فناوری نانو، طیف گسترده‌ای از محصولات مهندسی شده با ویژگی‌های مغناطیسی، الکتریکی و نوری متنوع از این کامپوزیت زیستی تولید می‌شود که کاربرد فراوانی در بسیاری از صنایع برای آن‌ها پیش‌بینی می‌شود.

ساخت نانو کامپوزیت‌های آلی- معدنی با ویژگی‌های مهندسی معین، حاصل از ترکیب و یا سنتز درجای نانوذرات اکسید فلزی درون بافت چوب و سایر انواع بسترهای سلولزی و لیگنوسلولزی از جمله پیشرفت‌های مبتنی بر فناوری نانو می‌باشد (۱، ۲، ۳، ۴). ساختار سلسله‌مراتبی و متخلخل چوب، متشکل از حفرات چند ده میکرومتری تا منافذ نانومتری، فرصتی استثنایی را برای خلق نانو کامپوزیت‌های هیبرید آلی- معدنی با پتانسیل‌های کاربردی گوناگون فراهم می‌نماید. نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن، یکی از انواع نانوذرات عمل‌گرای معدنی هستند که به سبب دارا بودن مجموعه‌ای از ویژگی‌های کاربردی قابل توجه مانند غیرسمی بودن، سطح ویژه بالا، ویژگی‌های کاتالیستی مطلوب و پایدار، رفتارهای سوپر پارامغناطیس، محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس و هم‌چنین جذب فلزات سنگین، در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهش‌گران علم مواد را به خود معطوف نموده‌اند (۵ و ۶). گزارش‌های موفق متعددی پیرامون ساخت انواع نانو کامپوزیت‌های آلی- معدنی مغناطیسی با وارد کردن نانوذرات اکسید آهن درون بسترهای سلولزی و لیگنوسلولزی از جمله چوب ماسیو منتشر شده است (۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳). سنتز درجا یکی از متداول‌ترین روش‌های استفاده شده جهت تثبیت نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن بر روی بسترهای سلولزی و لیگنوسلولزی است (۸، ۹، ۱۴).

استفاده از چوب به‌عنوان بستر نگهداری نانوذرات مغناطیسی امتیازات ویژه‌ای را به همراه دارد؛ ساختار سلسله‌مراتبی متخلخل چوب امکان بهره‌گیری از آن به‌عنوان یک نانو راکتور جهت سنتز نانوذرات مغناطیسی را فراهم می‌نماید، بدین معنا که منافذ ریز موجود در ساختار چوب فضاهایی مناسب برای واکنش سنتز نانو کریستال‌های مغناطیسی هستند. هم‌چنین بسترهای مبتنی بر چوب و سایر انواع مواد سلولزی و لیگنوسلولزی را متناسب با نیاز می‌توان به‌صورت اجرام هندسی ساده تا پیچیده طراحی و تولید نمود. از سوی دیگر دانسیته پایین چوب، متخلخل بودن و ضریب انبساط حرارتی جزئی آن از جمله امتیازات دیگر این ماده طبیعی به‌عنوان بستر نگهدارنده نانوذرات مغناطیسی تلقی می‌گردد. علی‌رغم این امتیازات، برخی ویژگی‌های ذاتی چوب مانند جاذب رطوبت بودن، عدم پایداری ابعادی در مواجهه با رطوبت و نیز آسیب‌پذیری در مواجهه با عوامل مخرب بیولوژیک مواردی هستند که می‌توانند دامنه کاربرد نانو کامپوزیت‌های مغناطیسی بر پایه چوب را محدود نمایند (۱۵ و ۱۶).

چوب صنوبر به‌عنوان یکی از چوب‌های سبک با دانسیته حدود ۰/۳۵ تا ۰/۵۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب، از گونه‌های چوبی مهم صنعتی به‌ویژه در صنعت تخته لایه است (۱۷ و ۱۸). با توجه به سریع‌الرشد بودن گونه صنوبر، قیمت پایین، سهولت ماشین‌کاری و لایه‌گیری، دانسیته کم، ویژگی‌های مکانیکی ویژه مطلوب و نیز قابلیت اشباع‌پذیری مناسب منتج از ساختار میکروسکوپی آن، چوب صنوبر و فرآورده‌های چوبی مشتق شده از آن از دیرباز در صنعت ساختمان جایگاه ویژه‌ای داشته‌اند (۱۹ و ۲۰). علی‌رغم این ویژگی‌های مثبت، چوب صنوبر در مواجهه با رطوبت، از منظر ثبات ابعادی و نیز مقاومت در برابر عوامل مخرب بیولوژیک نسبت به بسیاری از

اصلاح چوب به‌طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است. فورفوریل الکل یکی از مونومرهای به‌دست‌آمده از مشتقات زیست‌توده است که در سال‌های اخیر گزارش‌های متعددی در خصوص استفاده از آن جهت اصلاح چوب منتشر شده است (۱۹، ۲۰، ۲۴، ۲۹، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸). فورفوریل الکل، از مشتقات فورفورال است که خود از پنتوزان‌های حاصل از پسماندهای زراعی (عمدتاً با منشأ باگاس) به دست می‌آید. مولکول‌های کوچک و قطبی فورفوریل الکل در طی فرایند اشباع چوب به درون دیواره سلول‌های چوبی نفوذ کرده و موجب واکنش‌دهی آن می‌شوند که در ادامه با تکمیل فرایند پلیمریزاسیون، درون دیواره سلول‌های چوب ماندگار می‌شوند (۲۹، ۳۷، ۳۹). در مطالعه‌ای شن و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر تیمار فورفوریل‌اسیون بر ساختار سلسله‌مراتبی چوب را ارزیابی نمودند. نتایج دلالت بر تأثیر قابل‌توجه تیمار مذکور بر ساختار سلسله‌مراتبی چوب و اندازه قطر و حجم منافذ موجود در آن داشت؛ به‌طوری‌که در غالب موارد قطر و حجم منافذ موجود در چوب کاهش یافت (۲۰). در پژوهش دیگری، دونگ و همکاران (۲۰۱۶) به ارزیابی و مقایسه تأثیر تیمار فورفوریل‌اسیون و استیل‌اسیون بر ویژگی‌های گونه‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ پرداختند. نتایج این مطالعه دلالت بر آن داشت که تیمار فورفوریل‌اسیون در گونه‌های چوبی واجد روزه‌های غیر هاله‌ای و باز با ساختار منظم‌تر، تأثیر بیشتری بر اصلاح ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی خواهد داشت (۲۴). نتایج مطالعه استیوز و همکاران (۲۰۱۱) قابلیت مطلوب تیمار فورفوریل‌اسیون را در بهبود کیفیت چوب *Pinus pinaster* نشان داد. کاهش رطوبت تعادل، افزایش پایداری ابعادی و کاهش ناهمسانگردی، افزایش سختی و نیز بهبود قابل‌توجه دوام چوب تیمار شده در برابر قارچ عامل پوسیدگی قهوه‌ای از جمله نتایج مطالعه ایشان بود

گونه‌های چوبی دیگر صنعتی ضعیف‌تر می‌باشد (۲۰ و ۲۱). بنابراین تلاش‌های زیادی به‌منظور اصلاح رفتارهای فیزیکی-مکانیکی و دوام چوب صنوبر با هدف توسعه دامنه کاربرد صنعتی آن انجام شده است (۲۰، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵). تبدیل چوب به چوب-پلیمر یکی از روش‌های اصلاحی شناخته‌شده است که در آن چوب ماسیو با استفاده از محلول‌های منومری معین هم‌چون استایرن و متیل متاکریلات اشباع‌شده و سپس طی فرایندهایی مانند پرتودهی و تیمار حرارتی مونومر در داخل ساختار چوب به پلیمر تبدیل می‌شود (۲۲، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸). بسته به ویژگی‌های مولکولی مونومر استفاده شده و فرایند اصلاح، محصول نهایی می‌تواند چوب پلیمر نوع حفره‌ای، دیواره‌ای و یا ترکیبی (حفره‌ای-دیواره‌ای) باشد (۲۹، ۳۰، ۳۱). متناسب با نوع گونه چوبی، محل استقرار پلیمر درون ساختار چوب، میزان جذب ماده پلیمری، ویژگی‌های ذاتی پلیمر استفاده شده و شرایط اعمال‌شده حین تبدیل چوب به چوب-پلیمر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب-پلیمرها متفاوت است (۲۲، ۲۸). نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که عمده ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و سختی در چوب پلیمر نسبت به چوب اصلاح‌نشده افزایش می‌یابد (۲۱، ۲۷، ۳۰، ۳۲). از منظر ثبات ابعادی، به‌طورکلی بر اساس نتایج، دیواره الیاف در چوب-پلیمر دیواره‌ای نسبت به نوع حفره‌ای، به دلیل نفوذ و جایگیری پلیمر درون ساختار آن، رطوبت‌پذیری کم‌تر و ثبات ابعادی بیشتری دارد (۲۸، ۳۰). هم‌چنین نتایج نشان داده است چوب-پلیمر دیواره‌ای نسبت به نوع حفره‌ای از مقاومت به تخریب قارچی بیشتری برخوردار است (۲۸، ۳۳). در سال‌ها اخیر با توجه به کاهش منابع فسیلی، بهره‌گیری از مواد آلی مشتق شده از زیست‌توده جهت

به منظور محلول سازی از آب دو بار تقطیر (شرکت زلال، ایران) استفاده شد.

روش ها

تهیه چوب صنوبر مغناطیسی: الوارهای صنوبر، حدود یک ماه پس از برداشت، به مقطوعاتی با ابعاد $20 \times 20 \times 340$ میلی متر تبدیل شدند و بعد از شماره گذاری، برای مدت حدود ۲۴ ساعت درون آونی با دمای 2 ± 103 درجه سانتی گراد خشک شدند. وزن، ابعاد و دانسیته خشک هر یک از مقطوعات اندازه گیری و ثبت شد.

از فرایند سنتز درجا نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) تحت سیستم خلأ/ فشار، به منظور نشان دادن نانوذرات مغناطیسی درون بافت چوب استفاده شد. پیش تر لو و همکاران (۲۰۱۸) تهیه چوب مغناطیسی را با استفاده از سیستم خلأ/ فشار گزارش نموده اند (۴۲). برای این منظور، مقطوعات چوب صنوبر هوا-خشک (رطوبت تعادل در حدود ۱۰ درصد) درون سیلندر اشباع آزمایشگاهی بارگذاری شدند و برای مدت ۱۵ دقیقه خلأ ۰/۹ بار اعمال گردید؛ سپس محلول آبی از پیش آماده شده کلرید آهن II و III با مولاریته ۰/۰۶ و ۰/۱۲ با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به درون سیلندر وارد شد و برای حدود یک ساعت، ۸ بار فشار اعمال گردید تا از نفوذ کامل یون های آهن به درون بافت چوب اطمینان حاصل گردد. در پایان محلول کلرید آهن اضافی باقی مانده از درون سیلندر زه کشی شد و سیلندر با محلول ۱ مولار هیدروکسید سدیم با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد مجدداً شارژ گردید و تحت فشار ۸ بار نمونه ها برای مدت چهار ساعت در معرض محلول قلیا قرار گرفتند تا فرایند سنتز درجای نانوذرات مغناطیسی درون بافت چوب تکمیل گردد. پس از زه کشی هیدروکسید سدیم اضافی، نمونه ها از درون سیلندر خارج شده و به منظور شستشو و حذف

(۳۴). نتایج نشان می دهند با تبدیل چوب به چوب فورفوریله شده، ثبات ابعادی، مقاومت در برابر اسیدها و بازها و برخی ویژگی های دیگر بهبود می یابد (۲۴، ۲۶، ۳۵). هم چنین چوب فورفوریله، به عنوان محصولی سازگار با محیط زیست شناخته می شود که فاقد سمیت برای مصرف کننده بوده و در صورت اشتعال گازهای سمی حاوی ترکیبات آلی فرار یا هیدروکربن های پلی آروماتیک تولید نمی کند (۳۱، ۴۰). امروزه چوب فورفوریله در مقیاس تجاری تولید شده و در تولید پوشش کف، مبلمان و نظایر آنها استفاده می شود (۳۵، ۳۸).

با توجه به پتانسیل های کاربردی بالای چوب-مغناطیسی، به ویژه در تولید فراورده های چوبی جاذب امواج الکترومغناطیس و واجد ویژگی گرمایش القایی (۴۱) و نیز عوامل محدود کننده ای هم چون جذب آب و عدم ثبات ابعادی چوب در برابر رطوبت، این پژوهش به بررسی تأثیر استفاده از ماده فورفوریل الکل در اصلاح رفتارهای فیزیکی-مکانیکی چوب صنوبر مغناطیسی با تبدیل آن به چوب پلیمر می پردازد. ویژگی های ریخت شناسی، فیزیکی و مکانیکی چوب-پلیمرهای مغناطیسی و غیر مغناطیسی ساخته شده با درجات مختلف بارگذاری ماده پلیمری در این مطالعه ارزیابی و مقایسه می شوند.

مواد و روش ها

مواد: نمونه های چوب، از برون چوب راست تار و فاقد هر گونه عیب صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoids*)، پرورش یافته در جنگل تحقیقاتی شصت کلاته (گرگان-ایران) به دست آمد. در این پژوهش از کلرید آهن (II) آبدار ($FeCl_2 \cdot 4H_2O$)، کلرید آهن (III) آبدار ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$)، هیدروکسید سدیم، اسیدسیتریک، مالئیک انیدرید و اتانول تهیه شده از کمپانی مرک با گرید آزمایشگاهی استفاده شد. در تمامی موارد

مقطوعات چوبی، محلول فورفوریل‌الکل به درون سیلندر وارد شده و برای مدت ۱۵ دقیقه، خلأ ۰/۹ بار و در ادامه برای مدت‌زمان ۶۰ دقیقه، فشار ۸ بار بر روی آن‌ها اعمال گردید تا محلول به‌خوبی درون مقطوعات چوبی نفوذ کند. پس از اشباع، نمونه‌ها در دو توالی زمانی ۲ ساعته، ابتدا در دمای محیط (۲۵±۲) درجه سانتی‌گراد و سپس درون آن با دمای ۴۰±۲ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا اتانول اضافی از نمونه‌ها خارج شود. در مرحله بعد با هدف پلیمریزاسیون فورفوریل‌الکل وارد شده به ساختار چوب، مقطوعات چوبی ابتدا به‌صورت پیچیده شده درون فویل آلومینیومی برای مدت‌زمان ۱۶ ساعت و سپس بدون پوشش برای مدت‌زمان ۲۴ ساعت درون آونی با دمای ۱۰۳±۲ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا فرایند فورفوریل‌اسیون تکمیل گردد. درصد افزایش وزن آزمون‌ها (WPG) در نتیجه انجام فرایند فورفوریل‌اسیون با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$WPG = [(W_f - W_o) / W_o] * 100 \quad (1)$$

در این رابطه، W_f وزن خشک نمونه چوب فورفوریل‌ه و W_o وزن خشک نمونه چوب پیش از تیمار فورفوریل‌اسیون می‌باشد. جدول ۱ کد اختصاری آزمون‌ها و وجه تمایز آن‌ها را مشخص نموده است. شکل ۱، تصاویر اسکن شده از سطح نمونه‌های ساخته‌شده در هر تیمار را نشان می‌دهد.

اثر قلیا به مدت ۴۸ ساعت در تانکی با جریان دائمی آب غوطه‌ور شدند. چوب‌های مغناطیسی مرطوب تهیه‌شده، ابتدا ۲۴ ساعت در دمای ۶۰±۲ درجه سانتی‌گراد و سپس ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۳±۲ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. وزن و دانسیته خشک نمونه چوب‌های مغناطیسی تهیه‌شده اندازه‌گیری و ثبت شد. نمونه‌ها با انتقال به درون کیسه‌های پلی‌اتیلنی ضخیم تا انجام تیمارهای بعدی از مجاورت با رطوبت حفظ شدند.

فرایند فورفوریل‌اسیون: مشابه گزارش استیوز و همکاران (۲۰۱۱) به‌منظور دستیابی به سطوح مختلف فورفوریل‌اسیون، ابتدا محلول اشباع فورفوریل‌الکل آماده شد و سپس متناسب با مقادیر مورد نظر با افزودن حلال آب یا اتانول رقیق گردید (۳۴). در تهیه محلول اشباع، نخست محلول آب و اسیدسیتریک با نسبت وزنی ۵ به ۱، در دمای ۴۰±۲ درجه سانتی‌گراد، تحت هم زدن ملایم مغناطیسی آماده شد. به‌صورت جداگانه محلول فورفوریل‌الکل و ۲ درصد وزنی مالئیک انیدرید نیز آماده شد و سپس محلول از پیش آماده‌شده آب/اسیدسیتریک به آن اضافه گردید. در محلول اشباع نهایی سهم وزنی مالئیک انیدرید، اسیدسیتریک و آب، به ترتیب حدود ۲ درصد، ۱ درصد و ۵ درصد وزن فورفوریل‌الکل در نظر گرفته شد. محلول اشباع، با دو غلظت متفاوت ۱۰۰ و ۵۰ درصد (رقیق‌شده با حلال اتانول)، جهت اشباع مقطوعات چوبی در روش سلول خلأ-فشار استفاده شد. برای این منظور، پس از بارگیری سیلندر با

جدول ۱- کد اختصاری نمونه‌های ساخته شده در این مطالعه.

Table 1. Abbreviated codes for specimens prepared in this study.

آزمونه Specimens	کد اختصاری Abbreviated code
چوب صنوبر خام Raw poplar wood	PW
چوب صنوبر فورفوریله - کم WPG Furfurylated poplar wood- low WPG	PW-F(L)
چوب صنوبر فورفوریله - زیاد WPG Furfurylated poplar wood- high WPG	PW-F(H)
چوب صنوبر مغناطیسی Magnetic poplar wood	PW-Mag
چوب صنوبر مغناطیسی فورفوریله - کم WPG Furfurylated magnetic poplar wood- low WPG	PW-Mag-F(L)
چوب صنوبر مغناطیسی فورفوریله - زیاد WPG Furfurylated magnetic poplar wood- high WPG	PW-Mag-F(H)



شکل ۱- تصاویر اسکن شده از سطح نمونه‌های ساخته شده.

Figure 1. Scanned images of the surface of the prepared specimens.

انجام شد؛ پیش از تصویربرداری میکروسکوپی، تمامی نمونه‌ها با استفاده از پلاتین پوشش‌دهی شدند. به منظور آماده‌سازی مقطع عرضی نمونه‌های چوب صنوبر مغناطیسی و غیرمغناطیسی، جهت تصویربرداری FESEM، از یک دستگاه میکروتوم (ERM-200P, Tokyo, Japan) استفاده شد.

مشخصه‌یابی نمونه‌ها: بررسی ریزساختار چوب مغناطیسی با استفاده از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FESEM, S4800, Hitachi, Japan) و تصویربرداری از سطح شکست خمشی نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, SEMART PS-250, PEMTRON, S. Korea)

ضخامت (استاندارد ISO ۳۱۳۰)، بر روی نمونه‌های با ابعاد ۲۰*۲۰*۳۰ میلی‌متر (به ترتیب شعاعی، مماسی و طولی)، در دمای اتاق (۲±۲۳ درجه سانتی‌گراد)، برای یک دوره زمانی ۵۷۶ ساعته و به‌صورت دوره‌ای اندازه‌گیری شد.

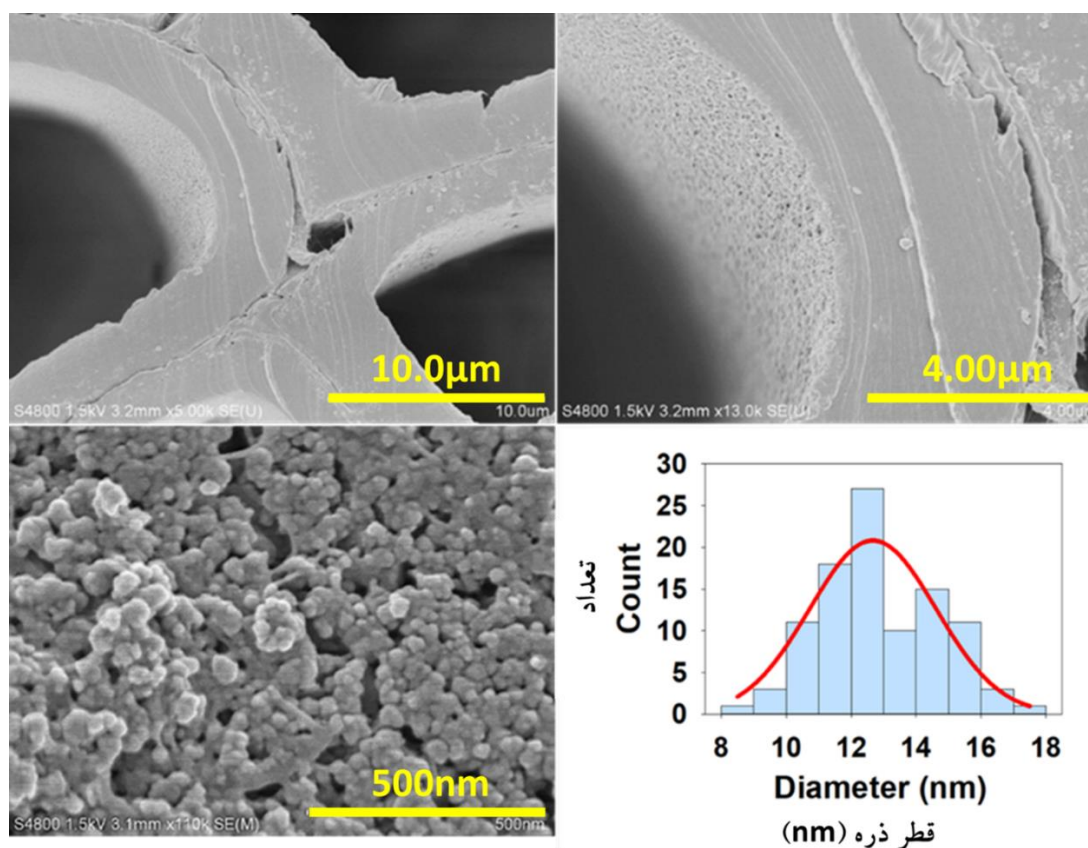
نتایج و بحث

شکل ۲ ریزنگاره‌های FESEM به‌دست‌آمده از سطح مقطع عرضی چوب مغناطیسی تهیه‌شده را نشان می‌دهد. آن‌چنان‌که ملاحظه می‌گردد سطح داخلی الیاف چوب با نانوذرات مغناطیسی کروی شکل با میانگین اندازه قطری $12/9 \pm 1/82$ نانومتر پوشیده شده است. این میکروگراف‌ها نشان می‌دهند که فرایند سنتز درجای نانوذرات مغناطیسی درون بافت چوب موفق بوده است. توزیع مناسب نانوذرات مغناطیسی بر روی سطح داخلی حفره الیاف چوب نشان از کیفیت مطلوب نفوذ محلول‌های کلریدهای آهن و به‌دنبال آن محلول سود به درون بافت چوب دارد. با آزمون تعیین خاکستر، سهم وزنی نانوذرات مغناطیسی سنتز شده درون بافت چوب حدود $8/26 \pm 0/26$ درصد برآورد گردید. هم‌چنین، با توجه به میکروگراف‌های FESEM جدایش الیاف مجاور درون بافت چوب، به‌واسطه تأثیر محلول هیدروکسید سدیم ۱ مولار حین فرایند سنتز درجای نانوذرات مغناطیسی، تحت شرایط دمایی و مدت‌زمان اعمال شده، کاملاً مشهود است. این جدایش الیاف به تأثیرپذیری لیگنین، به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده الیاف و انحلال جزئی آن در مواجهه با محلول NaOH نسبت داده شد (۴۵ و ۴۶).

شناسایی فازی نانوذرات مغناطیسی سنتز شده با یک دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD, Philips X'pert Pro MPD, Holland) مجهز به منبع اشعه کاتودی CuK α (طول موج ۱/۰۵۴۵۶ آنگستروم)، در ولتاژ ۴۰kV و شدت جریان ۴۰mA، در زوایای ۲ تا ۱۰ تا ۶۰ درجه انجام شد. از معادله شرر جهت تعیین اندازه قطری نانوذرات مغناطیسی سنتز شده (D) استفاده شد (رابطه ۲).

$$D=0.89\lambda/\beta\cos\Theta \quad (2)$$

که در این رابطه، λ طول موج (nm)، β پهناى پیک در نصف ارتفاع بیشینه آن (رادیان) و Θ زاویه براگ (درجه) می‌باشد. آزمون تعیین خاکستر مطابق استاندارد شماره TAPPI T211 om-02 به‌منظور محاسبه مقدار وزنی نانوذرات سنتز شده درون بافت چوب انجام شد. ارزیابی ویژگی مغناطیسی آزمون‌ها، در دمای اتاق (۲±۲۳ درجه سانتی‌گراد) و با استفاده از دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM, Meghnatis Kavir Kashan Co., Iran) انجام شد. مطالعه رفتار خمشی آزمون‌ها تحت بارگذاری استاتیک سه‌نقطه، توسط یک دستگاه تست یونیورسال (Zwick/Roell Z250, Zwick GmbH & Co., Germany) و مطابق با استاندارد DIN 52186 انجام شد. در آزمون خمش ابعاد نمونه‌ها برابر ۲۰*۲۰*۳۶۰ میلی‌متر، طول دهانه ۳۰ میلی‌متر و سرعت بارگذاری ۱۳ میلی‌متر بر دقیقه بود. در تحلیل نتایج آزمون خمش استاتیک و مقایسه تفاوت میانگین‌ها از محاسبه فواصل اطمینان ۹۵٪ و نمایش آن‌ها بر روی نمودارهای ستونی مربوطه استفاده شد (۴۳ و ۴۴). جذب آب و واکشیدگی

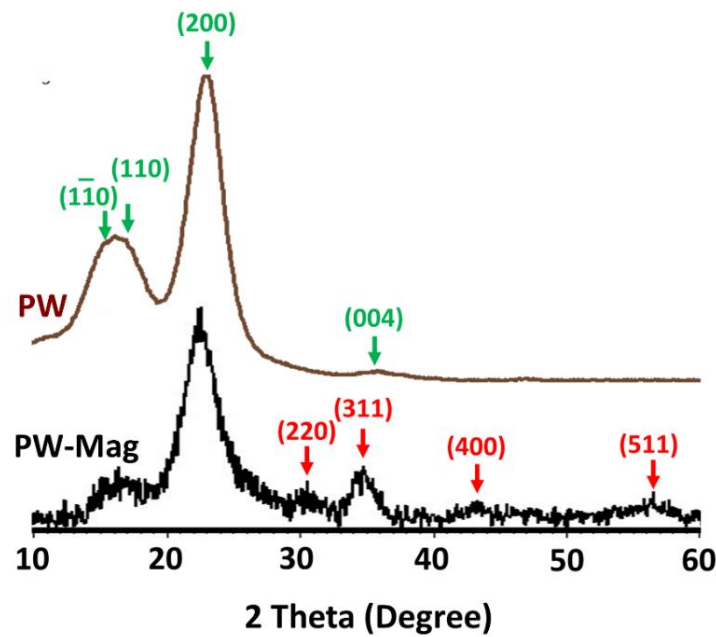


شکل ۲- ریزنگاره‌های FESEM سطح مقطع عرضی PW-Mag و هیستوگرام توزیع اندازه نانوذرات مغناطیسی سنتز شده بر روی سطح حفره الیاف چوب صنوبر.

Figure 2. FESEM micrographs of the cross-section of PW-Mag and a size distribution histogram of the synthesized magnetic nanoparticles on the lumen surface of poplar wood fibers.

و اندازه قطری نانوکریستال‌های سنتز شده در این پژوهش با آنچه در مطالعات پیشین گزارش شده است، هم‌خوانی مطلوبی را نشان داد (۹، ۱۱، ۱۴، ۴۷، ۴۸، ۴۹، ۵۰). دلیل تفاوت در بزرگی اندازه نانوذرات مغناطیسی محاسبه‌شده بر اساس میکروگراف‌های FESEM و نتایج آزمون (XRD)، به اثر کلوخه‌ای شدن نانوذرات مذکور و خطای ناشی از آن به هنگام تحلیل تصویری میکروگراف‌های FESEM نسبت داده شد (۹ و ۴۸).

شکل ۳ نتایج حاصل از آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) آزمون‌های PW و PW-Mag را نشان می‌دهد. ظهور پیک در موقعیت‌های دو-تتای ۳۰/۵، ۳۵/۵، ۴۳/۲ و ۵۷/۴ درجه در نمونه‌های PW-Mag، به‌خوبی با محل ظهور پیک‌های مربوط به اندیس میلرهای (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰) و (۵۱۱) مگنتیت (Fe_3O_4) انطباق داشت (JCPDS 01-075-0449). با استفاده از معادله شرر متوسط اندازه بلور نانوذرات مگنتیت سنتز شده حدود ۵/۲ نانومتر به‌دست آمد. نوع



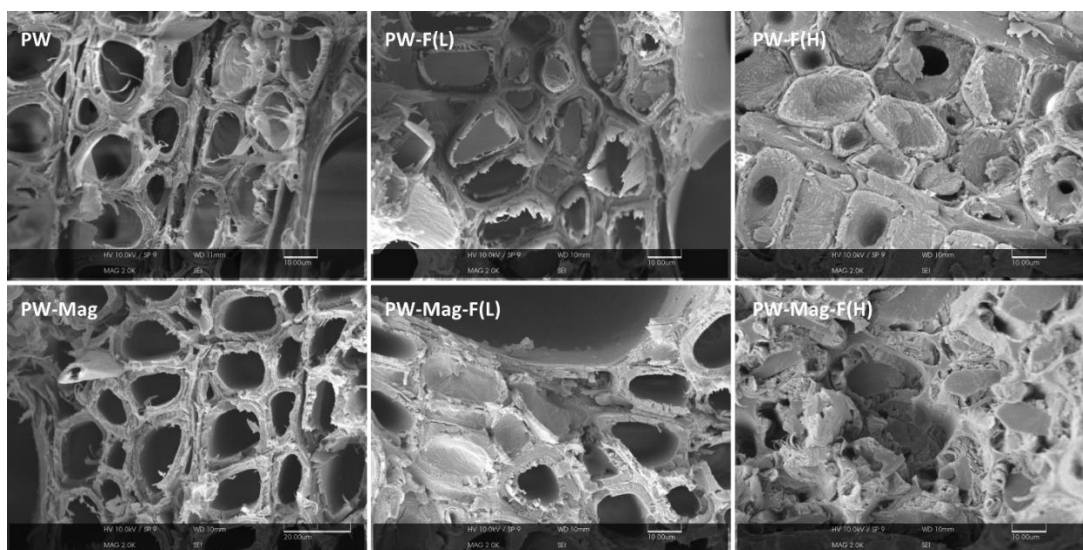
شکل ۳- الگوی XRD چوب صنوبر خام (PW) و چوب صنوبر مغناطیسی (PW-Mag).

Figure 3. The XRD patterns of the raw poplar wood (PW) and the magnetic poplar wood (PW-Mag).

می‌شود. به نظر می‌رسد، فرایند سنتز درجای نانوذرات مغناطیسی و نیز حضور فورفوریل الکل پلیمر شده درون ساختار دیواره الیاف سبب تغییر رفتار مکانیکی آن‌ها از حالت انعطاف‌پذیر^۱ به ترد^۲ می‌گردد. ریزنگاره‌های SEM نشان می‌دهند با افزایش شاخص WPG به سطح H، کیفیت سطح شکست دیواره الیاف دو نوع نمونه چوب-پلیمر مغناطیسی و غیرمغناطیسی به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود.

شکل ۴ ریزنگاره‌های SEM به‌دست‌آمده از سطح شکست خمشی نمونه‌های تهیه‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. مقایسه ریزنگاره‌ها گویای آن است که با افزایش سطح فورفوریل‌اسیون، سهم بیشتری از حفرات ساختار چوب با پلیمر اشغال شده است. هم‌چنین تفاوت ریزساختار سطح شکست دیواره الیاف نمونه‌های PW و PW-Mag کاملاً مشهود است. این تفاوت الگوی شکست در مقایسه نمونه‌های PW-F(L) و PW-Mag-F(L) نیز دیده

1- Ductile
2- Brittle

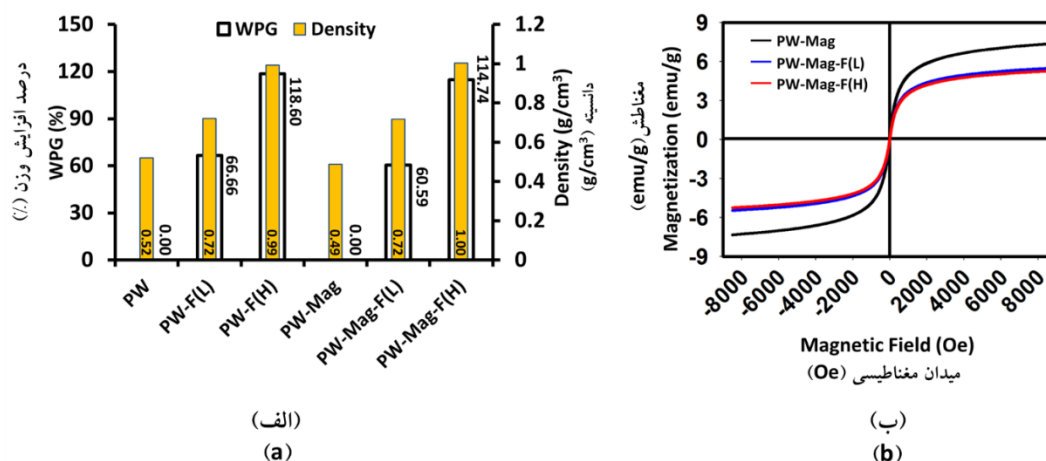


شکل ۴- میکروگراف‌های SEM سطح شکست خمشی نمونه‌ها.

Figure 4. SEM micrographs of the flexural fracture surface of the specimens.

مغناطیسی قبل و پس تبدیل به چوب-پلیمر پسماند و وادارندگی مشاهده نشد؛ اما آن‌چنان که ملاحظه می‌گردد، در پی انجام فرایند فورفوریل‌اسیون، مغناطش اشباع نمونه‌ها از حدود $7/24 \text{ emu/g}$ برای PW-Mag به حدود $5/42 \text{ emu/g}$ و $5/27 \text{ emu/g}$ به ترتیب برای PW-Mag-F(L) و PW-Mag-F(H) کاهش یافت. کاهش معنادار مغناطش اشباع نمونه PW-Mag نسبت به نمونه‌های چوب-پلیمر مغناطیسی، به تأثیر فرایند فورفوریل‌اسیون و واکنش‌های شیمیایی انجام‌شده بین محلول اشباع و نانوذرات مغناطیسی موجود در بافت چوب نسبت داده شد که احتمالاً با متأثر نمودن لایه سطحی نانوذرات مگنتیت و تشکیل لایه‌ای مرده از قطر مؤثر آن‌ها را کاسته و مغناطش اشباع نمونه‌های چوب-پلیمر مغناطیسی را کاهش می‌دهد. تأثیر تیمارهای شیمیایی و حرارتی بر تغییر رفتار نانوذرات مگنتیت پیش‌تر نیز گزارش شده است (۹، ۴۷، ۵۱، ۵۲).

شکل ۵ تغییرات در مقادیر دانسیته و WPG نمونه‌ها و نیز رفتار مغناطیسی آن‌ها را متأثر از غلظت محلول اشباع استفاده شده در فرایند فورفوریل‌اسیون نشان می‌دهد. به‌طور کلی، با افزایش غلظت محلول اشباع، میزان دانسیته و WPG در نمونه‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی افزایش یافت. کاهش دانسیته نمونه PW-Mag نسبت به نمونه PW به تأثیر استفاده از محلول NaOH یک مولار حین فرایند سنتز نانوذرات مغناطیسی و حذف بخشی از ترکیبات ساختار چوب نسبت داده شد. WPG ارزیابی شده در نمونه‌های چوب-پلیمر مغناطیسی نسبت به غیرمغناطیسی مقادیر کم‌تری را نشان داد که دلیل آن به تأثیر سنتز در جای نانوذرات مغناطیسی درون بافت چوب و ایجاد مزاحمت احتمالی در نفوذ فورفوریل الکل به درون ساختار چوب نسبت داده شد. از سوی دیگر نتایج آزمون VSM ویژگی سوپر پارامغناطیس نمونه‌های حاوی نانوذرات مگنتیت را تأیید نمود. در منحنی‌های مغناطش به‌دست‌آمده از نمونه‌های

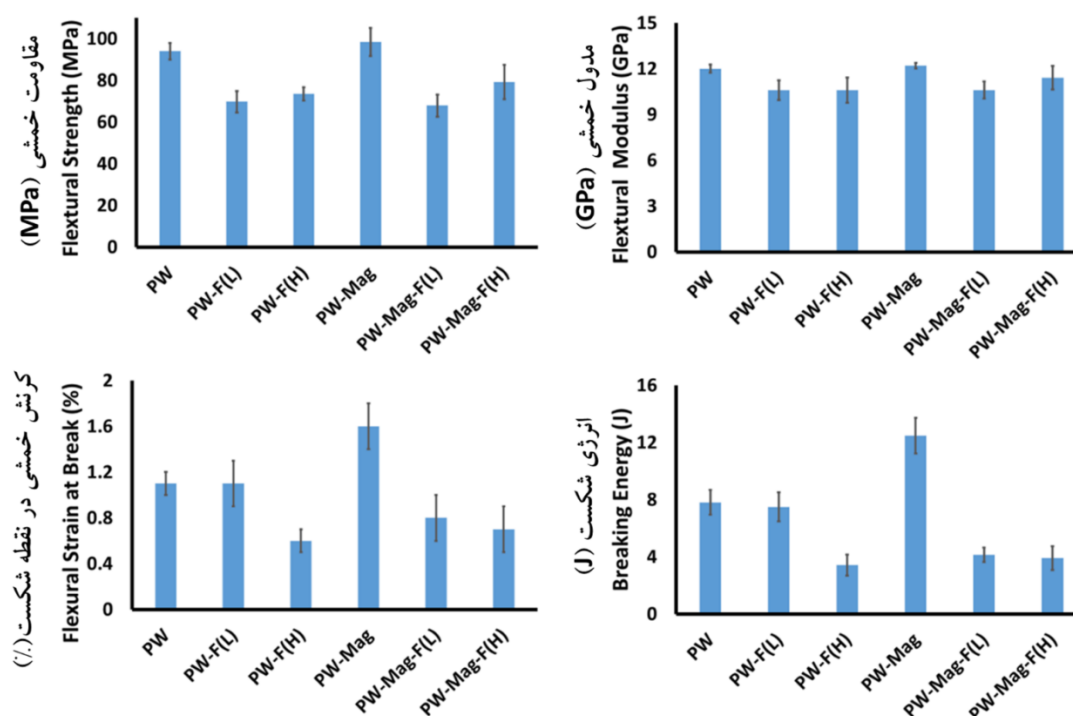


شکل ۵- هیستوگرام مقادیر WPG و دانسیته نمونه‌ها (الف) و منحنی‌های VSM نمونه‌های مغناطیسی قبل و پس از انجام فرایند فورفوریلایسیون (ب).

Figure 5. The histogram of the WPG and density values (a) and the VSM curves of the magnetic wood samples before and after the furfurylation process (b).

به صورت معناداری کاهش یافت؛ این در حالی است که نمونه PW نسبت به PW-F(L) تفاوت معناداری در کرنش و انرژی شکست خمشی نشان نداد. از سوی دیگر، کاهش مقادیر کرنش و انرژی شکست نمونه‌های PW-Mag-F(L) و PW-Mag-F(H) نسبت به نمونه PW-Mag کاملاً معنادار بود. آن‌چنان که در تحلیل میکروگراف‌های FESEM سطح شکست خمشی نمونه‌ها اشاره شد، جایگیری پلیمر حاصل از فرایند فورفوریلایسیون درون دیواره الیاف، موجب تغییر رفتار الیاف چوب از حالت انعطاف‌پذیر به ترد می‌گردد و بنابراین انتظار می‌رود، میزان کرنش خمشی و به تبع آن انرژی شکست خمشی کاهش یابد که نتایج آزمون مکانیکی این فرض را ثابت نمود؛ اما کاهش مقاومت و مدول خمشی چوب-پلیمرهای مغناطیسی و غیرمغناطیسی نسبت به نمونه چوب و چوب مغناطیسی اولیه، به تخریب احتمالی ساختار لیگنین به سبب شرایط دمایی و سیستم کاتالیستی مرکب اعمال شده در تیمار فورفوریلایسیون نسبت داده شد (۲۶، ۵۳، ۵۴).

شکل ۶ رفتار نمونه‌ها را تحت بارگذاری استاتیک خمشی سه نقطه‌ای نشان می‌دهد. به طور کلی، بر اساس نتایج آزمون خمش، سنتز درجای نانوذرات مغناطیسی در بافت چوب، تأثیر معناداری بر ویژگی‌های مقاومت و مدول خمشی نمونه‌ها نشان نداد. در مقابل، تیمار فورفوریلایسیون هم در نمونه‌های مغناطیسی و هم در نمونه‌های غیر مغناطیسی موجب کاهش معنادار مدول و مقاومت خمشی استاتیک نمونه‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ گردید؛ به طوری که تأثیر فورفوریلایسیون در کاهش ویژگی‌های مذکور در نمونه‌های با مقدار WPG کوچک‌تر مشهودتر بود. بیش‌ترین میزان کرنش خمشی در نمونه‌های PW-Mag (حدود ۱/۶ درصد) و کم‌ترین مقدار در آن در نمونه‌های PW-F(H) (حدود ۰/۶ درصد) ثبت شد. تأثیر تیمار فورفوریلایسیون بر تغییر میزان کرنش خمشی در نمونه‌های مغناطیسی نسبت به نمونه‌های غیرمغناطیسی مشهودتر بود. در نمونه‌های غیرمغناطیسی، برخلاف نمونه‌های مغناطیسی، با افزایش میزان فورفوریلایسیون از سطح (L) به (H)، مقدار کرنش و انرژی شکست خمشی نمونه‌ها



شکل ۶- نتایج آزمون خمش استاتیک آزمون‌ها.

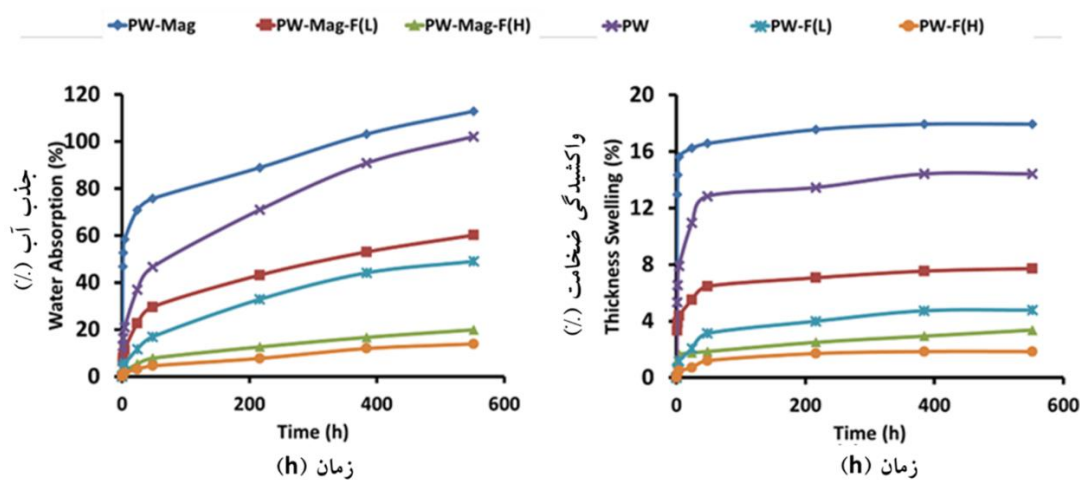
Figure 6. The results of the static flexural test of specimens.

دادند. از سوی دیگر انجام فرایند فورفوریل‌اسیون، مقاومت به جذب آب آزمون‌ها را افزایش داد و در نتیجه ثبات ابعادی آن‌ها بهبود یافت. افزایش غلظت محلول اشباع در فرایند فورفوریل‌اسیون، مقاومت به جذب آب آزمون‌ها و نیز ثبات ابعادی آن‌ها را افزایش داد. به‌طور کلی، رتبه‌بندی آزمون‌ها از منظر تمایل به جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت در زمان غوطه‌وری مشابه بود. بیش‌ترین میزان جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت در طول زمان غوطه‌وری در آزمون‌های PW-Mag و کم‌ترین مقادیر مربوطه در آزمون‌های PW-F(H) مشاهده شد. در توضیح علت کاهش جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت چوب-پلیمرهای مغناطیسی و غیرمغناطیسی نسبت به نمونه‌های غیرفورفوریله باید به حضور پلیمر در دیواره، اشغال فضاهای قابل‌دسترس برای مولکول‌های آب و نیز ایجاد واکنش‌دهی ماندگار در دیواره ایفای اشاره نمود

شکل ۷ نتایج ارزیابی رفتار جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت آزمون‌ها را در طول ۵۷۶ ساعت غوطه‌وری نشان می‌دهد. میزان جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت آزمون‌ها در طول زمان غوطه‌وری متأثر از فرایند سنتز در جای نانوذرات مغناطیسی و تیمار فورفوریل‌اسیون مورد بررسی قرار گرفت. به‌طور کلی، سنتز در جای نانوذرات مگنتیت درون بافت چوب، تمایل به جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت آزمون‌ها را افزایش داد. چنین به نظر می‌رسد که تیمار سنتز در جای نانوذرات مغناطیسی با متأثر نمودن ساختار شیمیایی بافت چوب موجب افزایش تمایل به جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت آزمون‌ها گردید؛ به‌طوری‌که حتی پس از فورفوریل‌اسیون، آزمون‌های مغناطیسی فورفوریله شده در مقایسه با آزمون غیرمغناطیسی فورفوریله شده جذب آب و واکنش‌دهی ضخامتی بیش‌تری نشان

سهم سلولز آمورف نسبت داده شد. دونگ و همکاران (۲۰۱۶) نتایج مشابهی را در مقایسه نمونه چوب صنوبر مغناطیسی و غیرمغناطیسی مشاهده نمودند و دلیل آن را به تخریب جزئی ساختار شیمیایی چوب حین فرایند سنتز درجای نانوذرات مغناطیسی نسبت دادند (۵۰).

(۲۰، ۳۶، ۵۵). هم‌چنین، جذب آب بیشتر و ثبات ابعادی کمتر مشاهده شده در نمونه‌های مغناطیسی (چوب و چوب-پلیمر)، نسبت به نمونه‌های غیرمغناطیسی به تأثیر استفاده از محلول NaOH یک مولار در مرحله سنتز نانوذرات مغناطیسی درون بافت چوب و حذف جزئی لیگنین و نیز افزایش احتمالی



شکل ۷- نتایج آزمون جذب آب و واکنشیدگی ضخامت بلندمدت آزمونه‌ها.

Figure 7. The results of long-term water absorption and thickness swelling of the specimens.

الکل، تمایل به جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طی آزمون غوطه‌وری بلندمدت کاهش یافت. آزمونه‌های مغناطیسی در مقایسه با نمونه‌ها غیرمغناطیسی جذب آب و واکنشیدگی ضخامت بیشتری نشان دادند. با افزایش غلظت محلول اشباع، تفاوت در مقادیر جذب آب و واکنشیدگی ضخامت آزمونه‌های چوب-پلیمر مغناطیسی و غیرمغناطیسی کاهش یافت. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، می‌توان چنین بیان نمود که در صورت تأمین خصوصیات مکانیکی مورد انتظار، جهت استفاده از چوب مغناطیسی در محیط‌های مرطوب، اعمال تیمار فورفوریل‌اسیون و تبدیل چوب مغناطیسی به چوب-پلیمر مغناطیسی توصیه می‌گردد.

نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه، در این پژوهش تأثیر اصلاح چوب صنوبر مغناطیسی با فورفوریل‌الکل، بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن بررسی گردید. براساس نتایج، تیمار فورفوریل‌اسیون مغناطش اشباع آزمونه‌های چوب صنوبر مغناطیسی را کاهش داد؛ اما میزان غلظت محلول اشباع اثر معناداری بر مغناطش اشباع آزمونه‌ها نشان نداد. مقاومت و مدول خمشی چوب صنوبر مغناطیسی و غیرمغناطیسی تفاوت معناداری را نشان نداد؛ حال آن‌که، فرایند فورفوریل‌اسیون مقادیر مقاومت و مدول خمشی آزمونه‌ها را به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داد. با افزایش WPG آزمونه‌های تیمار شده با فورفوریل

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله، از پروفسور آراتا یوشیناگا، از دانشگاه کیوتو، جهت آماده‌سازی مقاطع عرضی نمونه‌های چوب مغناطیسی به‌منظور تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی FESEM صمیمانه تشکر

می‌نمایند. این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و در قالب طرح تحقیقاتی داخلی با کد شناسه ۱۳۹-۳۵۴-۹۵ انجام شد.

منابع

1. Mohseni Tabar, M., Tabarsa, T., Mashkour, M. and Khazaeian, A. 2015. Using silicon dioxide (SiO₂) nanopowder as reinforcement for walnut shell flour/HDPE composite materials. *J. of the Indian Academy of Wood Science*. 12: 1. 15-21.
2. Habibzade, S., Omidvar, A., Farahani, M., and Mashkour, M. 2014. Effect of nano-ZnO on decay resistance and artificial weathering of wood polymer composite. *J. of Nanomaterials and Molecular Nanotechnology*. 3: 3. 1-5.
3. Holy, S., Temiz, A., Köse Demirel, G., Aslan, M., and Mohamad Amini, M.H. 2022. Physical properties, thermal and fungal resistance of Scots pine wood treated with nano-clay and several metal-oxides nanoparticles. *Wood Material Science & Engineering*. 17: 3. 176-185.
4. Boury, B., and Plumejeau, S. 2015. Metal oxides and polysaccharides: an efficient hybrid association for materials chemistry. *Green Chemistry*. 17: 1. 72-88.
5. Mendoza-Garcia, A., and Sun, S. 2016. Recent advances in the high-temperature chemical synthesis of magnetic nanoparticles. *Advanced Functional Materials*. 26: 22. 3809-3817.
6. Tokarev, A., Yatvin, J., Trotsenko, O., Locklin, J., and Minko, S. 2016. Nanostructured soft matter with magnetic nanoparticles. *Advanced Functional Materials*. 26: 22. 3761-3782.
7. Berglund, L.A., and Burgert, I. 2018. Bioinspired wood nanotechnology for functional materials. *Advanced Materials*. 30: 19. 1704285-1704300.
8. Tan, Y., Wang, K., Dong, Y., Zhang, W., Zhang, S., and Li, J. 2020. Bulk superhydrophobicity of wood via in-situ deposition of ZnO rods in wood structure. *Surface and Coatings Technology*. 383: 125240.
9. Mashkour, M., and Ranjbar, Y. 2018. Superparamagnetic Fe₃O₄@ wood flour/polypropylene nanocomposites: Physical and mechanical properties. *Industrial Crops and Products*. 111: 47-54.
10. Mashkour, M., Kimura, T., Kimura, F., Mashkour, M., and Tajvidi, M. 2014. One-dimensional core-shell cellulose-akaganeite hybrid nanocrystals: synthesis, characterization, and magnetic field induced self-assembly. *RSC Advances*. 4: 94. 52542-52549.
11. Segmehl, J.S., Laromaine, A., Keplinger, T., May-Masnou, A., Burgert, I., and Roig, A. 2018. Magnetic wood by in situ synthesis of iron oxide nanoparticles via a microwave-assisted route. *J. of Materials Chemistry C*. 6: 13. 3395-3402.
12. Cheng, Z., Wei, Y., Liu, C., Chen, Y., Ma, Y., Chen, H., Liang, X., Sun, N.X., and Zhu, H. 2020. Lightweight and constructible magnetic wood for electromagnetic interference shielding. *Advanced Engineering Materials*. 22: 10. 2000257.
13. Goldoust Jooibari, A., Mashkour, M., Tabarsa, T., and Yousefi, H. 2020. Fabrication and evaluation of physical and mechanical properties of magnetic-cellulose paper/epoxy resin nanocomposites. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 27: 3. 93-108.
14. Mashkour, M., Moradabadi, Z., and Khazaeian, A. 2017. Physical and tensile properties of epoxy laminated magnetic bacterial cellulose nanocomposite films. *J. of Applied Polymer Science*. 134: 30. 45118.

15. Jiang, F., Li, T., Li, Y., Zhang, Y., Gong, A., Dai, J., Hitz, E., Luo, W., and Hu, L. 2018. Wood-based nanotechnologies toward sustainability. *Advanced Materials*. 30: 1. 1703453.
16. Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., and Grazieschi, G. 2017. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*. 114: 307-332.
17. Khan, G., and Chaudhry, A.K. 2007. Effect of spacing and plant density on the growth of poplar (*Populus deltoides*) trees under agro-forestry system. *Pak. J. of Agricultural Science*. 44: 2. 321-327.
18. Öncel, M., Vurdu, H., Aydoğan, H., Özkan, O.E., and Kaymakci, A. 2019. The tensile shear strength of outdoor type plywood produced from fir, alnus, pine and poplar wood. *Wood Research*. 64: 5. 913-920.
19. Kong, L., Guan, H., and Wang, X. 2018. In situ polymerization of furfuryl alcohol with ammonium dihydrogen phosphate in poplar wood for improved dimensional stability and flame retardancy. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 6: 3. 3349-3357.
20. Shen, X., Jiang, P., Guo, D., Li, G., Chu, F., and Yang, S. 2020. Effect of furfurylation on hierarchical porous structure of poplar wood. *Polymers*. 13: 1. 32.
21. Li, J., Zhang, A., Zhang, S., Gao, Q., Chen, H., Zhang, W., and Li, J. 2018. High-performance imitation precious wood from low-cost poplar wood via high-rate permeability of phenolic resins. *Polymer Composites*. 39: 7. 2431-2440.
22. Dong, Y., Zhang, W., Hughes, M., Wu, M., Zhang, S., and Li, J. 2019. Various polymeric monomers derived from renewable rosin for the modification of fast-growing poplar wood. *Composites Part B: Engineering*. 174: 106902.
23. Jones, D., Sandberg, D., and Gicomo, G. Wood modification in Europe: A state-of-the-art about processes, products, applications; Firenze University Press, 2019.
24. Dong, Y., Qin, Y., Wang, K., Yan, Y., Zhang, S., Li, J., and Zhang, S. 2016. Assessment of the performance of furfurylated wood and acetylated wood: comparison among four fast-growing wood species. *BioResources*. 11: 2. 3679-3690.
25. Militz, H., and Lande, S. 2009. Challenges in wood modification technology on the way to practical applications. *Wood Material Science and Engineering*. 4: 1-2. 23-29.
26. Dong, Y., Ma, E., Li, J., Zhang, S., and Hughes, M. 2020. Thermal properties enhancement of poplar wood by substituting poly (furfuryl alcohol) for the matrix. *Polymer Composites*. 41: 3. 1066-1073.
27. Mattos, B.D., De Cademartori, P.H., Missio, A.L., Gatto, D.A., and Magalhães, W.L. 2015. Wood-polymer composites prepared by free radical in situ polymerization of methacrylate monomers into fast-growing pinewood. *Wood Science and Technology*. 49: 6. 1281-1294.
28. Li, Y. 2011. Wood-polymer composites. *Advances in Composite Materials-Analysis of Natural and Man-Made Materials*. BoD-Books on Demand. pp. 978-953.
29. Li, W., Wang, H., Ren, D., Yu, Y., and Yu, Y. 2015. Wood modification with furfuryl alcohol catalysed by a new composite acidic catalyst. *Wood Science and Technology*. 49: 4. 845-856.
30. Schneider, M. 1995. New cell wall and cell lumen wood polymer composites. *Wood Science and Technology*. 29: 2. 121-127.
31. Dong, Y., Wang, K., Li, J., Zhang, S., and Shi, S. Q. 2020. Environmentally benign wood modifications: a review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 8: 9. 3532-3540.
32. Ghorbani, M., Poorzahed, N., and Amininasab, S.M. 2020. Morphological, physical, and mechanical properties of silanized wood-polymer composite. *J. of Composite Materials*. 54: 11. 1403-1412.
33. Li, Y.F., Liu, Y.X., Wang, X.M., Wu, Q.L., Yu, H.P., and Li, J. 2011. Wood-polymer composites prepared by the in situ polymerization of monomers within wood. *J. of Applied Polymer Science*. 119: 6. 3207-3216.

34. Esteves, B., Nunes, L., and Pereira, H. 2011. Properties of furfurylated wood (Pinus pinaster). *European J. of Wood and Wood Products*. 69: 4. 521-525.
35. Mantanis, G.I. 2017. Chemical modification of wood by acetylation or furfurylation: A review of the present scaled-up technologies. *BioResources*. 12: 2. 4478-4489.
36. Yang, T., Wang, J., Xu, J., Ma, E., and Cao, J. 2019. Hygroscopicity and dimensional stability of Populus euramericana Cv. modified by furfurylation combined with low hemicellulose pretreatment. *J. of Materials Science*. 54: 20. 13445-13456.
37. Liu, L., Chang, H.M., Jameel, H., and Park, S. 2018. Furfural production from biomass pretreatment hydrolysate using vapor-releasing reactor system. *Bioresource Technology*. 252: 165-171.
38. Sultan, M., Rahman, M., Hamdan, S., and Hossen, M. 2020. *Materials Science Forum*. pp. 29-36.
39. Hadi, Y.S., Mulyosari, D., Herliyana, E.N., Pari, G., Arsyad, W.O.M., Abdillah, I.B., and Gérardin, P. 2021. Furfurylation of wood from fast-growing tropical species to enhance their resistance to subterranean termite. *European J. of Wood and Wood Products*. 79: 4. 1007-1015.
40. Lande, S., Westin, M., and Schneider, M. 2008. Development of modified wood products based on furan chemistry. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 484: 1. 1-367.
41. Gan, W., Gao, L., Xiao, S., Gao, R., Zhang, W., Li, J., and Zhan, X. 2017. Magnetic wood as an effective induction heating material: Magnetocaloric effect and thermal insulation. *Advanced Materials Interfaces*. 4: 22. 1700777.
42. Lou, Z., Han, H., Zhou, M., Han, J., Cai, J., Huang, C., Zou, J., Zhou, X., Zhou, H., and Sun, Z. 2018. Synthesis of magnetic wood with excellent and tunable electromagnetic wave-absorbing properties by a facile vacuum/pressure impregnation method. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 6: 1. 1000-1008.
43. Amrhein, V., Greenland, S., and Mcshane, B. 2019. Scientists rise up against statistical significance. *Nature*. 567: 305-307.
44. Kaffashsaie, E., Yousefi, H., Nishino, T., Matsumoto, T., Mashkour, M., Madhoushi, M., and Kawaguchi, H. 2021. Direct conversion of raw wood to TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. *Carbohydrate Polymers*. 262: 117938.
45. Wang, J., Fishwild, S.J., Begel, M., and Zhu, J. 2020. Properties of densified poplar wood through partial delignification with alkali and acid pretreatment. *J. of Materials Science*. 55: 29. 14664-14676.
46. Sreekala, M., Kumaran, M., and Thomas, S. 1997. Oil palm fibers: Morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties. *J. of Applied Polymer Science*. 66: 5. 821-835.
47. Mashkour, M., and Mashkour, M. 2021. A Simple and scalable approach for fabricating high-performance superparamagnetic natural cellulose fibers and Papers. *Carbohydrate Polymers*. 256: 117425.
48. Mashkour, M., Tajvidi, M., Kimura, F., Yousefi, H., and Kimura, T. 2014. Strong highly anisotropic magnetocellulose nanocomposite films made by chemical peeling and in situ welding at the interface using an ionic liquid. *ACS applied materials & interfaces*. 6: 11. 8165-8172.
49. Chia, C., Zakaria, S., Ahamd, S., Abdullah, M., and Jani, S.M. 2006. Preparation of magnetic paper from kenaf: lumen loading and in situ synthesis method. *American J. of Applied Sciences*. 3: 3. 1750-1754.
50. Dong, Y., Yan, Y., Zhang, Y., Zhang, S., and Li, J. 2016. Combined treatment for conversion of fast-growing poplar wood to magnetic wood with high dimensional stability. *Wood Science and Technology*. 50: 3. 503-517.
51. Shaterabadi, Z., Nabiyouni, G., Goya, G.F. and Soleymani, M. 2022. The effect of the magnetically dead layer on the magnetization and the magnetic anisotropy of the dextran-coated magnetite nanoparticles. *Applied Physics A*. 128: 8. 1-10.

52. Abbas, M., Takahashi, M., and Kim, C. 2013. Facile sonochemical synthesis of high-moment magnetite (Fe_3O_4) nanocube. *J. of nanoparticle research*. 15: 1. 1-12.
53. Pfriem, A., Dietrich, T., and Buchelt, B. 2012. Furfuryl alcohol impregnation for improved plasticization and fixation during the densification of wood. *Holzforschung*. 66: 2. 215-218.
54. Sejati, P.S., Imbert, A., Gérardin-Charbonnier, C., Dumarçay, S., Fredon, E., Masson, E., Nandika, D., Priadi, T., and Gérardin, P. 2017. Tartaric acid catalyzed furfurylation of beech wood. *Wood Science and Technology*. 51: 2. 379-394.
55. Beck, G., Hill, C., Cocher, P.M. and Alfredsen, G. 2019. Accessibility of hydroxyl groups in furfurylated wood at different weight percent gains and during *Rhodonía placenta* decay. *European J. of Wood and Wood Products*. 77: 5. 953-955.