

(OPEN ACCESS)

Effect of combined modification with epoxidized Soybean oil-styrene on the physical and mechanical properties of poplar wood

Sajedeh Anbaz¹, Raoufeh Abedini^{*2}, Maryam Ghorbani³, Foroogh Dastoorian⁴

1. M.Sc. Student of Wood and Cellulosic Products Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: s.anbaz987@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Wood and Cellulosic Products Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: r.abedini@sanru.com
3. Professor, Dept. of Wood and Cellulosic Products Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: ghorbani_mary@yahoo.com
4. Assistant Prof., Dept. of Wood and Cellulosic Products Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: fdastoorian@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: The implementation of a logging ban period has restricted the exploitation of ecologically durable forest trees, shifting focus toward the cultivation and utilization of fast-growing species. To enhance the application of species such as poplar (<i>Populus</i> spp.), it is essential to modify their inherent weaknesses. This study investigates the effects of soybean oil functionalization and different combined modification conditions using functionalized vegetable oil and styrene monomer on the properties of poplar wood.
Article history: Received: 07.17.2025 Revised: 09.23.2025 Accepted: 09.23.2025	
Keywords: Epoxidized soybean oil, Poplar wood, Raw soybean oil, Styrene, Surface hydrophobicity	
	Materials and Methods: Poplar wood samples were divided into nine groups: control; modification with raw and epoxidized soybean oil; styrene monomer; combined modification with epoxidized soybean oil/styrene in three ratios (10/90, 20/80, and 30/70); and a two-step modification process using raw or functionalized soybean oil followed by styrene. All samples treated with vegetable oil were heated at 120 °C, while those containing polymer (styrene alone or after oil modification) were heated at 90 °C.
	Results: Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy indicated that modification with functionalized soybean oil increased hydroxyl, carbonyl, and ether groups in the wood. In the two-step process, pretreatment with epoxidized soybean oil reduced styrene uptake in the second stage. The highest modifying agent uptake and weight gain were observed in samples subjected to two-step modification with raw oil and styrene. Scanning electron microscopy revealed that epoxidized soybean oil fully or partially filled the fiber lumens. With increased monomer-to-polymer conversion rates, combined modification with functionalized soybean oil significantly reduced water absorption and dimensional changes. Oil/monomer modification enhanced surface hydrophobicity and droplet contact angle. Combined modification with raw or functionalized oil and styrene improved the modulus of elasticity (MOE) compared to the control, but the modulus of rupture (MOR) increased significantly only in one-step

styrene modification. Hardness was also significantly enhanced in samples modified with styrene alone or with a 10/90 ratio of epoxidized soybean oil/styrene.

Conclusion: Overall, samples modified with oil (raw or epoxidized) and two-step oil/styrene exhibited the best physical properties. In terms of mechanical properties, samples containing polystyrene showed the highest MOR, while combined styrene and oil modification did not lead to significant changes compared to the control. Hardness was significantly higher in samples modified solely with styrene or with 90% styrene and functionalized oil. Except for elastic modulus and swelling, no significant differences were observed between integrated and two-step oil/styrene modification methods, with the highest dimensional stability achieved through two-step modification.

Cite this article: Anbaz, Sajedeh, Abedini, Raoufeh, Ghorbani, Maryam, Dastoorian, Foroogh. 2025. Effect of combined modification with epoxidized Soybean oil-styrene on the physical and mechanical properties of poplar wood. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (2), 103-123.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwfst.2025.23885.2122

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

اثر اصلاح تلفیقی روغن سویای اپوکسی‌دار – استایرن بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب صنوبر

ساجده انباز^۱، رئوفه عابدینی^{۲*}، مریم قربانی^۳، فروغ دستوریان^۴

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: s.anbaz987@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: r.abedini@sanru.com
۳. استاد گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: ghorbani_mary@yahoo.com
۴. استادیار گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: fdastoorian@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: با اجرای طرح تنفس و توقف بهره‌برداری از منابع جنگلی، برداشت گونه‌های بادوام جنگلی محدود و بر زراعت و به‌کارگیری گونه‌های تند رشد تمرکز شد. اصلاح نقاط ضعف گونه‌های چوبی تندرشد مانند صنوبر، راهکاری مناسب برای افزایش کاربرد آن‌ها می‌باشد. در پژوهش حاضر، اثر عامل‌دار کردن روغن سویا و شرایط متفاوت اصلاح تلفیقی با روغن گیاهی عامل‌دار/مونومر استایرن بر خواص چوب صنوبر بررسی شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱	مواد و روش‌ها: نمونه‌های چوب صنوبر به ۹ گروه شاهد، اصلاح با روغن سویای خام و اپوکسی‌دار، مونومر استایرن و تلفیق روغن سویای اپوکسی‌دار/استایرن در ۳ نسبت (۹۰/۱۰، ۸۰/۲۰ و ۷۰/۳۰) و فرآیند دومرحله‌ای اصلاح با روغن سویای خام و عامل‌دار/استایرن تقسیم شدند. کلیه نمونه‌های اصلاح‌شده با روغن گیاهی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و نمونه‌های حاوی پلیمر (استایرن، منفرد یا متعاقب اصلاح با روغن)، در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد گرمادهی شدند.
واژه‌های کلیدی: آبگریزی سطح، استایرن، چوب صنوبر، روغن سویای اپوکسی‌دار، روغن سویای خام	یافته‌ها: بر اساس نتایج طیف زیرقرمز تبدیل‌فوری (FTIR) اصلاح با روغن سویای عامل‌دار به افزایش گروه‌های هیدروکسیل، کربونیل و اتری در نمونه‌های چوب منتهی گردید. فرآیند دومرحله‌ای، اصلاح چوب با روغن سویای اپوکسی‌دار به کاهش جذب استایرن انجامید و

بیش‌ترین جذب و افزایش وزن در نمونه‌های اصلاح دومرحله‌ای روغن خام/استایرن اندازه‌گیری شد. براساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، اصلاح توسط روغن سویای اپوکسی‌دار، حفره فیبرها را به‌طور کامل یا نسبی پر نمود. با افزایش نرخ تبدیل مونومر به پلیمر در اصلاح تلفیقی با روغن سویای عامل‌دار، جذب آب و تغییرات ابعاد کاهش معنی‌داری یافت. اصلاح روغن/مونومر سبب افزایش آگریزی سطح و زاویه تماس قطره گردید. اصلاح با روغن خام و تلفیق روغن عامل‌دار/استایرن به بهبود مدول خمشی نمونه‌های چوب صنوبر نسبت به شاهد انجامید، اما مقاومت خمشی صرفاً در اصلاح یک مرحله‌ای با استایرن افزایش معنادار نشان داد. بهبود سختی نیز در اصلاح با استایرن و روغن سویای اپوکسی‌دار/استایرن به نسبت ۹۰/۱۰ درصد معنادار بود.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی نمونه‌های حاوی روغن (خام و اپوکسی) و اصلاح دومرحله‌ای روغن/استایرن بهترین خواص فیزیکی را نشان دادند. از نظر خواص مکانیکی، سطح حاوی پلیمر استایرن بالاترین مقاومت خمشی را داشت و در سطوح ترکیبی استایرن با روغن، مقاومت خمشی نسبت به شاهد تغییر معنی‌داری نشان نداد. سختی نمونه‌های اصلاح‌شده با استایرن و ترکیب ۹۰ درصد استایرن/روغن عامل‌دار به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایر سطوح بود. بین دو روش اصلاح هم‌زمان و دومرحله‌ای به‌جز مدول الاستیسیته و واکنشیدگی، اختلاف معنی‌داری در سایر ویژگی‌ها مشاهده نشد و اصلاح دومرحله‌ای به بیش‌ترین پایداری ابعاد در فرآورده حاصل انجامید.

استناد: انباز، ساجده، عابدینی، رئوفه، قربانی، مریم، دستوریان، فروغ (۱۴۰۴). اثر اصلاح تلفیقی روغن سویای اپوکسی‌دار - استایرن بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب صنوبر. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۲ (۲)، ۱۲۳-۱۰۳.

DOI: 10.22069/jwfst.2025.23885.2122



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

گسترش دامنه کاربرد چوب در مصارف ساختمانی به افزایش تقاضا برای این پلیمر طبیعی انجامیده است و افزایش روزافزون جمعیت، سیر رشد تقاضا برای این فرآورده را تصاعدی کرده است. با وجود مزایای متعدد چوب از جمله تنوع رنگ و نقش، دانسیته و مقاومت مکانیکی زیاد به تناسب دانسیته، ماهیت آبدوست این ماده موجب تغییر ابعاد، افت خواص مکانیکی (۱) و در نتیجه کاهش عمر مفید آن می‌شود. افزون بر این، ملاحظات زیست‌محیطی و الزامات توسعه پایدار با اجرای دوره تنفس جنگل، برداشت گونه‌های بادوام جنگلی را ممنوع ساخته است. در مقابل، زراعت گونه‌های تند رشد، سبک و کم‌دوام مانند صنوبر، به عنوان راهکاری برای جبران کمبود ماده اولیه در صنایع سلولزی، با چالش‌هایی همچون مقاومت مکانیکی و ثبات ابعاد کم همراه است. در این راستا، اصلاح چوب با استفاده از مواد و روش‌های دوستدار محیط‌زیست از جمله اصلاح شیمیایی، حرارتی، مکانیکی، سطحی و چوب‌پلیمر، می‌تواند بهبود چشمگیری در خواص محصولات چوبی حاصل از گونه تند رشد صنوبر ایجاد کرده و زمینه کاربرد گسترده‌تر آن‌ها را فراهم آورد (۲، ۳).

اصلاح چوب با استفاده از مواد آب‌گریز می‌تواند آبدوستی و معایب ناشی از تغییرات ابعاد را کاهش دهد (۴). نیاز فزاینده به یافتن مواد حفاظتی سازگار با محیط‌زیست پژوهش‌ها را به استفاده از روغن‌های گیاهی سوق داده است. روغن‌های گیاهی به‌طور مستقیم پیوند شیمیایی با ساختار چوب برقرار نمی‌کنند و تنها با پر کردن حفره‌ها و منافذ، به عنوان مانعی فیزیکی در برابر نفوذ آب عمل کرده و اثر محدودی بر ثبات ابعاد چوب دارند (۵). در مقابل،

عامل‌دار کردن روغن‌های گیاهی از طریق اصلاح شیمیایی دیواره سلولی می‌تواند منجر به ایجاد آب‌گریزی پایدار در چوب گردد (۶). در این فرآیند، واکنش‌گرهای قطبی به درون دیواره سلولی و با گروه‌های هیدروکسیل پلیمرهای دیواره سلولی پیوند کووالانسی برقرار می‌کنند؛ رویکردی که به عنوان یکی از روش‌های بالقوه اصلاح شیمیایی، در بهبود برخی از ویژگی‌های نامطلوب چوب شناخته می‌شود (۲، ۷، ۸). به عنوان نمونه، اصلاح چوب صنوبر با روغن سویای اپوکسی‌دار در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش جذب آب و افزایش کارایی آب‌گریزی در مقایسه با چوب اصلاح‌شده با روغن خام شده است (۹). چن و همکاران (۲۰۲۰) از روغن بزرک اپوکسی‌دار به تنهایی و در ترکیب با موم کارنوبا برای اشباع چوب صنوبر استفاده کردند. بر اساس نتایج ثبات ابعاد نمونه‌های اشباع شده با روغن بزرک اپوکسی‌دار بهبود یافت. بیش‌ترین کارایی ضدواکسیدگی در نمونه‌های تیمار ترکیبی روغن عامل‌دار و موم گزارش شد (۴). با بهبود پایدار ویژگی‌های فیزیکی فرآورده اصلاح‌شده با روغن گیاهی عامل‌دار، بخشی از حفرات چوب هم‌چنان خالی باقی می‌مانند و پر کردن این حفرات با پلیمر می‌تواند بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی چوب تند رشد صنوبر و متعاقباً دامنه کاربرد آن را ارتقا بخشد.

استایرن یکی از پرکاربردترین مونومرهای وینیلی غیرقطبی است که پس از نفوذ در چوب، حفره‌های سلولی شامل آوندها، فیبرها و سلول‌های پارانشیم را پر می‌کند. با این حال، این مونومر فاقد قابلیت واکنش با گروه‌های هیدروکسیل دیواره سلولی است و به همین دلیل، چوب‌پلیمر حاصل هم‌چنان ظرفیت بالای

جذب آب را حفظ می‌نماید (۳، ۷). بهبود کارایی پلیمرها از طریق اصلاح هم‌زمان دیواره سلولی می‌تواند منجر به ارتقای معنادار خواص فرآورده نهایی گردد. در این راستا، اصلاح شیمیایی ساختار چوب با افزایش آب‌گریزی دیواره، سبب ارتقای نرخ تبدیل و کاهش فاصله میان پلیمر و دیواره سلولی شده است (۱۰). اصلاح توأم دیواره‌ای و حفره‌ای با گلیسیدیل متاکریلات و استایرن، به بهبود آب‌گریزی، ثبات ابعاد و ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت به فشار و خمش انجامید (۱۰). آکاستا و همکاران (۲۰۲۱) نیز در یک تیمار دومرحله‌ای، با اشباع چوب اصلاح گرمایی‌شده توسط استایرن خواص فیزیکی و مکانیکی آن را بهبود بخشیدند (۱۱).

بررسی‌های پیشین نشان داده‌اند که ترکیب اصلاح شیمیایی دیواره و استفاده از پلیمر، بهبود قابل‌توجهی در ویژگی‌های چوب ایجاد می‌کند (۷، ۱۰). ولی تاکنون اثر اصلاح ترکیبی روغن گیاهی عامل‌دار با پلیمرهای وینیلی بررسی نشده است. پژوهش حاضر با هدف بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب صنوبر از طریق اصلاح با روغن گیاهی عامل‌دار/مونومر استایرن به‌منظور افزایش کاربردهای چوب‌پلیمر حاصل انجام شد.

مواد و روش‌ها

مواد: گرده‌بینه چوب صنوبر (*Populus deltoides*) به الوار تبدیل و به‌مدت دو ماه در هوای آزاد نگهداری شدند. پس از هوا خشک شدن، الوارها مطابق استانداردهای ASTM-D4442 و ASTM-D143-94 به نمونه‌های مورد نیاز برای

آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی با پنج تکرار در هر گروه (جدول ۱) تبدیل گردیدند. نمونه‌ها سپس در دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت گرمادهی شدند. مونومر استایرن با جرم مولکولی ۱۰۴/۱۵ گرم بر مول از شرکت پتروشیمی تبریز، روغن سویای خام و اپوکسی‌دار به‌ترتیب با جرم‌های مولکولی ۸۷۴ و ۱۰۰۰ گرم بر مول از شرکت فناوریان شیمی سپاهان و هم‌چنین بنزوئیل پراکساید به‌عنوان آغازگر از شرکت CDH هند خریداری شدند.

روش‌ها: فرآیند اصلاح نمونه‌ها در سیلندر آزمایشگاهی تحت خلأ ۰/۶ بار به مدت ۳۰ دقیقه و متعاقباً تحت فشار ۸ بار به مدت ۲ ساعت اشباع شدند. به‌منظور اصلاح، نمونه‌های اشباع‌شده‌ی حاوی روغن و روغن/پلیمر به‌صورت پیچیده در فویل، تحت دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت گرمادهی شدند. در فرایندهای دومرحله‌ای، ابتدا نمونه‌های اشباع شده با روغن سویای خام یا اپوکسی‌دار پیچیده در فویل، پس از گرمادهی تحت دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، با استایرن اشباع و متعاقباً درون فویل، به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد گرمادهی شدند. در خاتمه، نمونه‌ها از فویل خارج و پس از گرمادهی تحت دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد، با ترازوی با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین شدند و ابعاد به‌وسیله کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در تمامی تیمارهای حاوی استایرن، بنزوئیل پراکساید به‌عنوان آغازگر با نسبت دو درصد وزن استایرن استفاده شد. کد معرف سطوح تیمار و نوع تیمار در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- کدهای معرف هر سطوح تیمار.

Table 1. Treatments code.

کد Code	تیمار Treatment
C	شاهد Control
SO	اشباع با روغن سویای خام Impregnation with soybean oil
ESO	اشباع با روغن سویای اپوکسی‌دار Impregnation with epoxidized soybean oil
St	اشباع با استایرن Impregnated with styrene
St90/ESO	اشباع با ۹۰ درصد استایرن / ۱۰ درصد روغن سویای اپوکسی‌دار Impregnation with 90% styrene and 10% epoxidized soybean oil
St80/ ESO	اشباع با ۸۰ درصد استایرن / ۲۰ درصد روغن سویای اپوکسی‌دار Impregnation with 80% styrene/20% epoxidized soybean oil
St70/ESO	اشباع با ۷۰ درصد استایرن / ۳۰ درصد روغن سویای اپوکسی‌دار Impregnation with 70% styrene/30% epoxidized soybean oil
SO/St	اشباع دومرحله‌ای: ابتدا با روغن سویای خام و سپس استایرن Impregnation with firstly: soybean oil, secondly: styrene
ESO/St	اشباع دومرحله‌ای: ابتدا با روغن سویای اپوکسی‌دار و سپس استایرن Impregnation with firstly: epoxidized soybean oil, secondly: styrene

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی: میزان جذب، افزایش وزن ناشی از اصلاح، دانسیته و نرخ تبدیل مونومر به پلیمر در نمونه‌های اصلاح‌شده به ترتیب طبق روابط ۱ تا ۴ محاسبه شد:

$$Uptake(\%) = \frac{M_1 - M_0}{V} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، uptake جذب (درصد)، M_1 وزن نمونه بعد از اشباع (گرم)، M_0 وزن نمونه قبل از اشباع (گرم)، V ابعاد خشک اولیه قبل از اشباع (سانتی‌متر مکعب).

$$C = \frac{W_{wpc} - W_c}{W_t - W_c} \times 100 \quad (2)$$

که در آن، C نرخ تبدیل مونومر به پلیمر (درصد)، W_c وزن خشک نمونه قبل از اشباع (گرم)، W_{wpc} وزن

آزمون طیف‌سنجی زیر قرمز تبدیل فوریه (FTIR):

طیف‌سنجی زیر قرمز تبدیل فوریه (Fourier Transform Infrared) به منظور ارزیابی ساختار شیمیایی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با ضخامتی کمتر از یک سانتی‌متر توسط دستگاه طیف‌سنج مدل Agilent Cary 630 (Agilent Co., USA) ساخت آمریکا، انجام شد و نتایج در عدد موج $4000-500 \text{ cm}^{-1}$ ثبت گردید.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM): ساختار میکروسکوپی نمونه‌های چوب شاهد و اصلاح‌شده، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی مدل SNE-4500M ساخت کشور کره، روی بلوک‌هایی به ابعاد $1 \times 1 \times 1$ سانتی‌متر مکعب بررسی شد. به منظور بهبود وضوح تصاویر، سطح نمونه‌ها با لایه نازکی از طلا پوشش داده شد.

که در آن، S واكشیدگی حجمی (درصد)، V_2 حجم چوب تر پس از غوطه‌وری در آب (سانتی‌مترمکعب)، V_1 حجم چوب خشک قبل از غوطه‌وری در آب (سانتی‌مترمکعب).

$$ASE(\%) = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100 \quad (8)$$

که در آن، ASE کارایی ضدواكشیدگی چوب اصلاح‌شده (درصد)، S_1 واكشیدگی چوب شاهد (گرم)، S_2 واكشیدگی چوب اصلاح‌شده (گرم).

زاویه تماس قطره: به‌منظور ارزیابی اثر اصلاح بر خاصیت ترشوندگی نمونه‌ها، زاویه تماس قطره در ثانیه صفر و ۱۲۰، از روی تصاویر تهیه‌شده توسط میکروسکوپ دیجیتال Dino-Lite/5MP ساخت کشور چین، ثبت و با استفاده از نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری شد. سه تکرار برای هر یک از نمونه‌ها در آزمون زاویه تماس قطره، در نظر گرفته شد.

ویژگی‌های مکانیکی: برای ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی، مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با استفاده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای اندازه‌گیری شدند. این آزمون توسط دستگاه $SANTAM-STM-20$ (ساخت ایران) با سرعت بارگذاری ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. همچنین، سختی نمونه‌ها بر روی سطح مماسی و با استفاده از همان دستگاه، در سرعت بارگذاری ۶ میلی‌متر بر دقیقه مورد ارزیابی قرار گرفت. به دلیل این‌که ابعاد نمونه‌های سختی مطابق استاندارد ASTM D143 نبود، از روش اصلاح‌شده سختی Janka استفاده شد (۱۲). مقدار نیرو تا عمق نفوذ ۲/۵ میلی‌متر ثبت گردید و مدول سختی به‌صورت شیب منحنی نیرو-عمق نفوذ (N/mm) گزارش شد.

خشک نمونه بعد از پلیمر شدن (گرم) و W_t وزن تر نمونه بعد از اشباع (گرم).

$$WPG(\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

که در آن، WPG افزایش وزن (درصد)، W_1 وزن خشک قبل از اصلاح (گرم)، W_2 وزن خشک نمونه‌های اصلاح گرمایی شده (گرم).

$$D = \frac{M}{V} \quad (4)$$

که در آن، D دانسیته (گرم بر سانتی‌مترمکعب)، M وزن خشک اولیه نمونه (گرم)، V حجم خشک نمونه (سانتی‌مترمکعب).

برای اندازه‌گیری اثر اصلاح بر خواص فیزیکی، پس از اندازه‌گیری وزن و حجم خشک، نمونه‌ها در آب غوطه‌ور و تا رسیدن به وزن ثابت، وزن و حجم تر در بازه‌های زمانی متفاوت اندازه‌گیری شد. جذب آب، کارایی آب‌گریزی، واكشیدگی حجمی و کارایی ضدواكشیدگی براساس روابط ۵ تا ۸ محاسبه گردیدند.

$$WA(\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (5)$$

که در آن، WA جذب آب (درصد)، W_2 وزن تر بعد از غوطه‌وری در آب (گرم)، W_1 وزن خشک قبل از غوطه‌وری در آب (گرم).

$$WRE(\%) = \frac{W_{ac} - W_{at}}{W_{ac}} \times 100 \quad (6)$$

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

$$S(\%) = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100 \quad (7)$$

(۸، ۹، ۱۶، ۱۷ و ۱۸) که با افزایش نسبت روغن سویای اپوکسی‌دار شدت یافت.

پیک قوی عدد موج 2924 cm^{-1} در تیمارهای حاوی روغن معرف ارتعاشات کششی گروه‌های متیل (CH_3) پایانی زنجیره تری‌گلیسرید و پیک 2854 cm^{-1} معرف بخش متیلنی (CH_2) زنجیره اصلی اسید چرب اشباع شده می‌باشد که در حضور روغن عامل‌دار شده شدیدتر بود (۱۷). روغن سویای خام عمدتاً از گلیسیریدهای اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع تشکیل شده و به‌طور ذاتی واکنش کووالانسی مستقیمی با پلیمرهای دیواره سلولی چوب برقرار نمی‌کند؛ مگر در حضور عوامل فعال‌کننده یا طی فرآیندهای طولانی‌مدت اکسایش آرام (۱۸)؛ بنابراین، تغییرات شیمیایی مشاهده‌شده در چوب تیمار شده با روغن سویا بیش‌تر ماهیتی فیزیکی- شیمیایی دارند تا کووالانسی. حضور باند مشخص در ناحیه $1740\text{--}1730\text{ cm}^{-1}$ بیانگر ارتعاش کششی گروه‌های کربونیل (C=O) در همی‌سلولزها (استات‌ها و گروه‌های کربونیل آزاد) چوب شاهد است (۵، ۹، ۱۳ و ۱۷). کم‌ترین شدت پیک 1740 cm^{-1} مربوط به جذب گروه‌های کربونیل (C=O) در نمونه‌های شاهد و بیشترین شدت آن در نمونه‌های اصلاح‌شده با روغن سویای اپوکسی‌دار مشاهده شد که به حضور کربونیل‌های استیل و تری‌گلیسریدهای روغن (۴، ۸) نسبت داده می‌شود. شدت این پیک در نمونه‌های اصلاح‌شده با استایرن و روغن/استایرن نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت که می‌تواند به نسبت کم‌تر چوب و روغن در وزن ثابت فرآورده حاصل مرتبط باشد. تریز و پانو (۲۰۱۰)، افزایش شدت پیک کربونیل در چوب اصلاح‌شده با روغن سویا اپوکسی‌دار و جابجایی این پیک از عدد موج 1740 cm^{-1} به 1736 cm^{-1} را گزارش نمودند (۱۸). افزایش معنادار باند کربونیل استری در طیف تیمار SO و ESO به این دلیل است

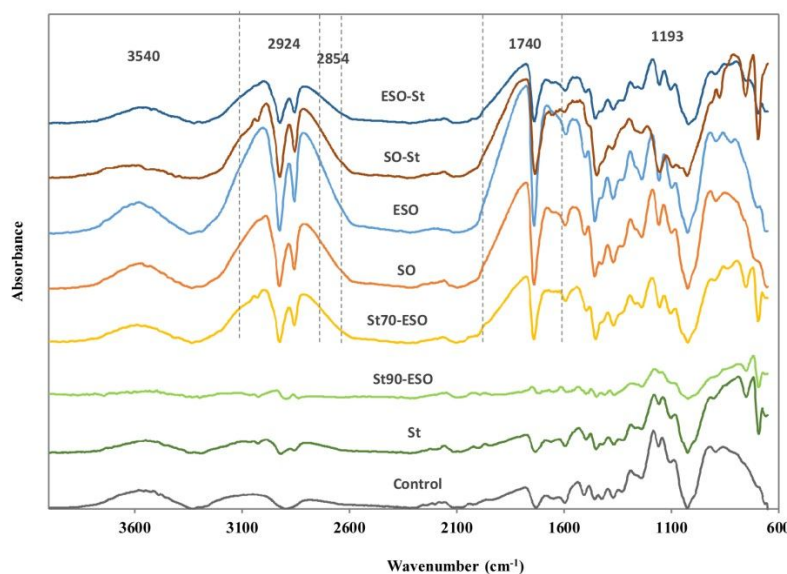
تحلیل آماری: برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار (SPSS 17.0) و آزمون آنالیز واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی با سطح خطای پنج درصد استفاده شد. گروه‌بندی میانگین‌ها نیز با آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام گردید.

نتایج و بحث

طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوری: نتایج طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه چوب شاهد (اصلاح‌نشده) و اصلاح‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است. طیف FTIR مربوط به چوب شاهد حاوی باندهای شاخص متعددی است که بازتاب‌دهنده ساختار شیمیایی اجزای اصلی دیواره سلولی چوب می‌باشد اما پس از اصلاح تغییر یافتند. باند گسترده‌ای که در محدوده 3540 cm^{-1} مشاهده می‌شود به ارتعاش‌های کششی گروه‌های هیدروکسیل (OH -) سلولز و همی‌سلولز نسبت داده می‌شود (۱۳). شدت این پیک در طیف نمونه‌های اصلاح‌شده با استایرن و تلفیقی استایرن/روغن سویای اپوکسی‌دار کاهش و در طیف اصلاح با روغن سویای اپوکسی‌دار افزایش یافت. اصلاح چوب با استایرن منجر به ایجاد یک فاز پلیمری آلی (پلی‌استایرن) در حفره‌ها و تا حدودی در دیواره سلولی می‌شود ولی واکنش شیمیایی مستقیمی با اجزای چوبی برقرار نمی‌کند (۱۴). بنابراین، بیش‌تر گروه‌های عاملی چوب مانند OH - از نظر شیمیایی دست‌نخورده باقی می‌مانند، اما حضور پلیمر آگریز پلی‌استایرن موجب کاهش دسترسی به این گروه‌ها می‌گردد و در مقایسه با طیف FTIR نمونه شاهد، به‌صورت کاهش شدت باند هیدروکسیل مشاهده می‌شود (۱۵). افزایش شدت این پیک در اصلاح با روغن سویا اپوکسی‌دار می‌تواند به باز شدن حلقه اپوکسی و شکل‌گیری گروه‌های هیدروکسیل جدید به‌صورت الکل‌های β - هیدروکسی نسبت داده شود

تا 1193 cm^{-1} مربوط به پیوندهای اتری می‌باشد (۴، ۸) که شدت آن در نمونه‌های حاوی روغن عامل‌دار، متعاقب باز شدن حلقه اپوکسی، بیش‌تر از نمونه‌های حاوی روغن خام و شاهد بود (۸، ۱۸). باز شدن حلقه اپوکسی در حضور کاتالیزور و در دمای مناسب باعث ایجاد گروه‌های اتر/هیدروکسی جدید می‌گردد که می‌تواند به افزایش شدت پیک‌های کربونیل و اتر بیانجامد (۸).

که روغن سویا یک تری‌گلیسرید بوده و هر مولکول آن دارای سه گروه استری (کربونیل‌های استر) است و شدت یافتن آن نشانگر حضور گسترده مولکول‌های روغن در بافت چوب است (۱۹). با این وجود، شدت این پیک در ترکیب با استایرن در سطوح تلفیقی و دومرحله‌ای کاهش یافت. در ناحیه $1025-1260\text{ cm}^{-1}$ طیف چوب شاهد، باندهای مشخصی وجود دارد که ناشی از ارتعاش‌های پیوندهای C-O و C-O-C در پلی‌ساکاریدها می‌باشد (۱۳). عدد موج محدوده 1300



شکل ۱- طیف FTIR نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با: استایرن (St)، روغن سویای اپوکسی‌دار/استایرن به نسبت ۹۰/۱۰ (St90-ESO)، روغن سویای اپوکسی‌دار/استایرن به نسبت ۷۰/۳۰ (St70-ESO)، روغن خام (SO)، روغن سویا اپوکسی (ESO)، و اصلاح دومرحله‌ای با روغن خام/استایرن (SO-St) و روغن اپوکسی‌دار/استایرن (ESO-St).

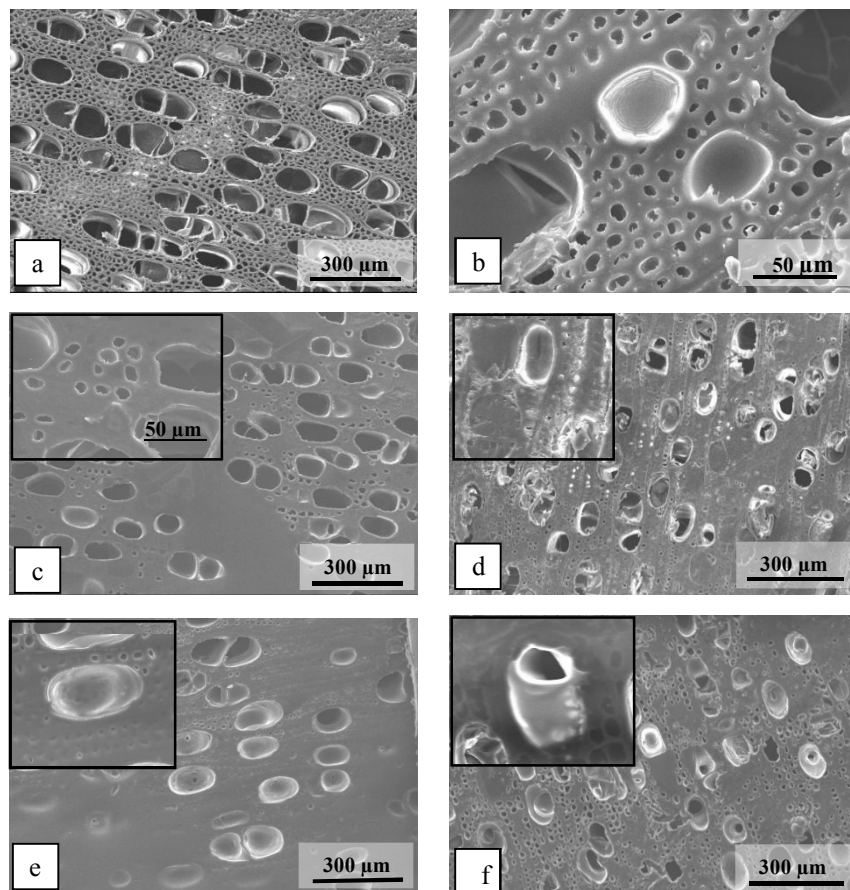
Figure 1. FTIR spectra of control and modified sample with raw soybean oil (SO), epoxidized soybean oil (ESO), styrene (St), two step raw oil/styrene (SO-St) and epoxidized oil/styrene (ESO-St).

نمود، ولی اغلب حفرات آوندی خالی باقی ماندند (شکل ۲c). پرشدن برخی از حفره‌های فیبر چوب صنوبر و تراکنیدهای چوب پایان، اشعه تراکنیدها، منافذ هاله‌ای و نفوذ روغن به دیواره سلولی در نمونه‌های اصلاح‌شده با روغن بزرک اپوکسی‌دار (ELO) در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است (۴، ۸). در نمونه حاوی استایرن، حفره اغلب فیبرها و

ریخت‌شناسی: شکل ۲ تصاویر مقطع عرضی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده را نشان می‌دهد. در تصویر نمونه شاهد، حفره آوندها و فیبرها خالی هستند (شکل ۲a). پس از اصلاح با روغن سویا خام حفرات فیبرها خالی اما برخی از آوندها با روغن پر شدند (شکل ۲b). اصلاح روغن سویای اپوکسی‌دار، حفره برخی از فیبرها را به‌طور کامل و برخی را به‌صورت نسبی پر

قطبی تر از روغن سویای خام نسبت داده شود که ورود استایرن با ماهیت غیرقطبی را محدودتر کرد. در این نمونه‌ها به نظر می‌رسد سطح حفرات فیبر و آوند توسط فیلم نازکی پوشش یافته است که در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده بود (۸). براساس نتایج پایداری ابعاد، اثر روغن سویا و ترکیب روغن سویا و استایرن، مؤثرتر از عملکرد استایرن به تنهایی، به عنوان مانع فیزیکی مسدودکننده حفره بود.

برخی از حفرات آوندی پر شدند (شکل 2d). اشباع هم‌زمان با ترکیب استایرن/روغن سویای اپوکسی دار با نسبت ۳۰/۷۰ (St70-ESO) سبب پرشدن حفره فیبرها و تعدادی از حفرات آوندی شد (شکل 2e). در نمونه‌های تحت اصلاح دومرحله‌ای با روغن عامل دار، حفرات فیبر و آوند خالی بیش‌تری نسبت به نمونه‌های حاوی استایرن و اصلاح یک‌مرحله‌ای (St70-ESO) مشاهده شد (شکل 2e,f). این امر می‌تواند به حضور روغن سویای اپوکسی دار با ماهیت



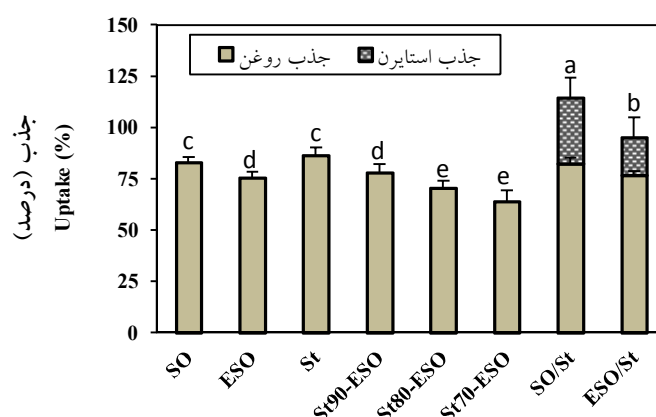
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی نمونه شاهد (a)، نمونه اصلاح شده با روغن سویای خام (b)، اصلاح شده با روغن سویای اپوکسی دار ESO (c)، نمونه اصلاح شده با استایرن (d)، اصلاح شده با تلفیق استایرن/روغن اپوکسی دار (e)، نمونه اصلاح دومرحله‌ای با روغن اپوکسی دار و استایرن (f).

Figure 2. SEM observations on the transvers section of untreated wood (a), SO modified (b), ESO modified (c), St modified (d), St70-ESO (e) and ESO/St treated wood (f).

خواص فیزیکی

روغن عامل‌دار به ساختار چوب را کاهش داده است. با افزایش نسبت روغن سویا اپوکسی‌دار به ترکیب استایرن/روغن عامل‌دار، نیز درصد جذب کاهش یافت. جذب استایرن در نمونه‌های اصلاح‌شده با روغن سویا اپوکسی‌دار در مرحله اول، کم‌تر از نمونه‌های اشباع‌شده با روغن خام بود. کاهش جذب استایرن در مرحله دوم در سطح ESO/St می‌تواند ناشی از ممانعت دیواره اصلاح‌شده با روغن اپوکسی‌دار با ساختار قطبی‌تر در مقابل استایرن غیرقطبی باشد (۷). ارمیدان و همکاران (۲۰۱۴)، نیز افزایش جذب استایرن به ساختار چوب غیرقطبی شده توسط توسیل کلراید را گزارش نمودند (۷).

جذب: شکل ۳، جذب روغن سویا خام، روغن سویا اپوکسی‌دار و روغن/استایرن در اشباع یک‌مرحله‌ای و جذب استایرن در مرحله دوم اشباع را نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار جذب مرحله اول در سطح St و SO مشاهده شد. جذب روغن سویا اپوکسی‌دار کم‌تر از روغن خام و استایرن اندازه‌گیری شد. فرآیند جذب تحت‌تأثیر روش اشباع و ویژگی‌های مونومر مانند ویسکوزیته، نقطه جوش (به‌دلیل تبخیر طی فرآیند پلیمر شدن)، وزن مولکولی، قطبیت و همکشیدگی پلیمریزاسیون می‌باشد (۲۰). به نظر می‌رسد حضور گروه‌های اپوکسی و وزن مولکولی بیش‌تر آن ورود



شکل ۳- جذب روغن و استایرن در مرحله اول و دوم اشباع

(حروف روی نمودارهای ستونی، گروه‌بندی دانکن در سطح معناداری ۹۵ درصد را نشان می‌دهد).

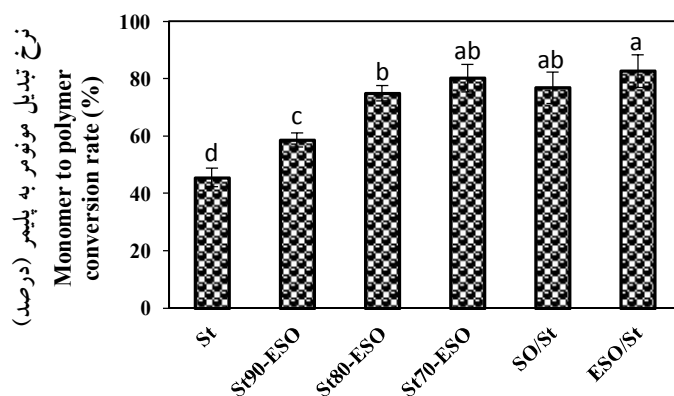
Figure 3. Oil and styrene uptake in first and second stage of impregnation (letters on columns indicate Duncan grouping at 95% significant level).

است. هنگامی‌که استایرن با روش رادیکالی در حضور آغازگر بنزوئیل پراکساید، پلیمره می‌شود، پیوندهای دوگانه روغن نیز احتمالاً در این فرایند شرکت می‌کنند و سبب افزایش نرخ تبدیل مونومر به پلیمر می‌شوند. واکنش استایرن با روغن‌های خشک‌کننده به تراکم این پیوندها بستگی دارد (۲۱). روغن‌های

نرخ تبدیل مونومر به پلیمر: بیش‌ترین و کم‌ترین نرخ تبدیل مونومر به پلیمر به ترتیب در سطح اصلاح دوم‌مرحله‌ای ESO/St و سطح St مشاهده شد (شکل ۴). به نظر می‌رسد حضور روغن سویا سبب افزایش نرخ تبدیل مونومر به پلیمر گردید. روغن سویا غیراشباع با پیوندهای دوگانه در ساختار مولکولی

گروه‌های اپوکسی در روغن سویای عامل‌دار، نرخ تبدیل کل افزایش بیش‌تری نشان داد که این افزایش در اصلاح دومرحله‌ای محسوس‌تر بود.

غیرمزدوج هنگام گرمادهی با استایرن می‌توانند موجب افزایش نرخ تبدیل استایرن (۲۱، ۲۲) و تلفیق روغن سویا اپوکسی/استایرن به پلیمر گردند. با حضور



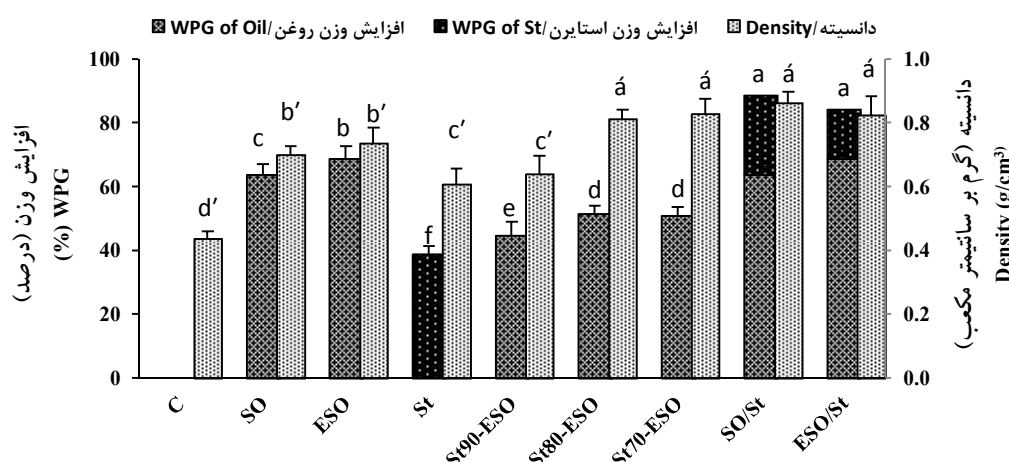
شکل ۴- نرخ تبدیل مونومر به پلیمر در سطوح حاوی مونومر

(حروف روی نمودارهای ستونی، گروه‌بندی دانکن در سطح معناداری ۹۵ درصد را نشان می‌دهد).

Figure 4. Monomer to polymer conversion rate in monomer containing treatments (letters on columns indicate Duncan grouping at 95% significant level).

جذب بیشتر) محسوس‌تر بود. اختلاف معناداری بین سطوح St70-ESO و St80-ESO مشاهده نشد؛ اما کاهش نسبت روغن اپوکسی‌دار به ۱۰ درصد سبب کاهش WPG شد. وزن مولکولی بیش‌تر روغن‌ها و نرخ تبدیل کم‌تر استایرن می‌تواند توجیه‌کننده WPG و دانسیته کم‌تر نمونه‌های اشباع شده با استایرن باشد. با افزایش نسبت روغن عامل‌دار نرخ تبدیل مونومر به پلیمر افزایش یافت که به افزایش وزن بیش‌تر منتهی شد. اختلاف معناداری در افزایش وزن و نرخ تبدیل مونومر به پلیمر در سطوح St80-ESO و St70-ESO مشاهده نشد (شکل‌های ۴ و ۵).

افزایش وزن و دانسیته: دانسیته و درصد افزایش وزن نمونه‌ها پس از اصلاح با دو نوع روغن و همچنین پس از اصلاح دومرحله‌ای نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت (شکل ۵). بیش‌ترین دانسیته مربوط به سطوح اصلاح دومرحله‌ای (ESO/St و SO/St) و اصلاح تلفیقی St80-ESO و St70-ESO بود. مونومر استایرن، در داخل حفره‌های سلولی تبدیل به پلیمر شده و منجر به افزایش دانسیته چوب می‌گردد (۱۰). بیش‌ترین درصد افزایش وزن در اصلاح دومرحله‌ای اندازه‌گیری شد. در این تیمارها با توجه به اشباع مجدد نمونه‌ها، افزایش وزن و دانسیته دور از انتظار نبود. افزایش وزن نمونه‌های اصلاح‌شده با روغن اپوکسی‌دار نسبت به روغن خام (علی‌رغم



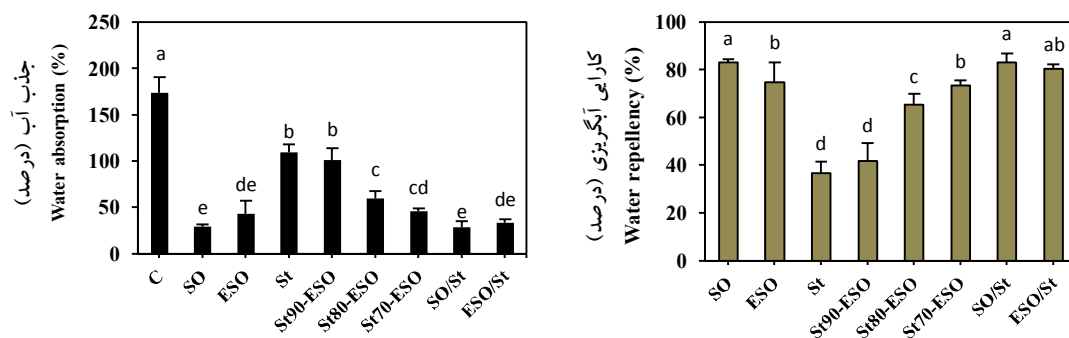
شکل ۵- دانسیته و درصد افزایش وزن (WPG) نمونه شاهد و نمونه‌های اصلاح شده

(حروف روی نمودارهای ستونی، گروه‌بندی دانکن در سطح معناداری ۹۵ درصد را نشان می‌دهد).

Figure 5. Density and weight percent gain (WPG) of control and modified specimens (letters on columns indicate Duncan grouping at 95% significant level).

شده با استایرن شد. متناسب با کاهش جذب آب، بیش‌ترین کارایی آب‌گریزی در سطوح حاوی روغن خام با ماهیت غیرقطبی مشاهده شد. افزایش نسبت روغن اپوکسی‌دار در سطوح تلفیقی سبب افزایش کارایی آب‌گریزی به‌خصوص در سطح St70-ESO گردید (شکل ۶). براساس نتایج نرخ تبدیل مونومر به پلیمر، پیوندهای دوگانه موجود در ساختار روغن سویا خام و عامل‌دار امکان شرکت آن‌ها در فرایند پلیمر شدن استایرن را فراهم می‌سازد؛ بنابراین افزایش نسبت روغن سویا اپوکسی‌دار سبب بهبود پلیمر شدن ترکیب استایرن/روغن سویا اپوکسی‌دار و انسداد حفرات سلولی، کاهش جذب آب و افزایش کارایی آب‌گریزی شد. چن و همکاران (۲۰۲۰) بیان داشتند پیوندهای عرضی بین و درون‌مولکولی روغن بزرک اپوکسی‌دار در ترکیب با موم کارنوبا سبب افزایش آب‌گریزی چوب شد (۴). ارمیدان و همکاران (۲۰۱۴)، نیز به نتایج مشابهی در چوب اصلاح دیواره‌ای شده با توسیل کلراید و سپس اشباع شده با استایرن دست یافتند (۷). حضور روغن با ماهیت غیرقطبی و اصلاح با روغن عامل‌دار سبب افزایش کارایی آب‌گریزی نمونه‌های اصلاح‌شده گردید.

جذب آب و آب‌گریزی: جذب آب نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده پس از ۲۶ ساعت غوطه‌وری در آب در شکل ۶ نشان داده شده است. اصلاح سبب کاهش معنادار جذب آب نمونه‌های اصلاح‌شده نسبت به نمونه شاهد گردید. در بین نمونه‌های اصلاح‌شده، نمونه‌های اصلاح دومرحله‌ای و اصلاح با روغن خام و اپوکسی کم‌ترین جذب آب را داشتند. این در حالی بود که جذب آب سطوح St و St90-ESO بیش‌تر از سایر سطوح اصلاح‌شده بود. تیمار با روغن سویا سبب افزایش آب‌گریزی و کاهش جذب آب چوب می‌شود؛ زیرا زنجیره‌های هیدروکربنی بلند و غیرقطبی اسیدهای چرب با استقرار پوششی آب‌گریز مانند یک مانع در برابر نفوذ رطوبت عمل می‌کنند (۱۶). مونومر استایرن به‌عنوان یک مانع فیزیکی، جریان رطوبت را کند می‌کند و باعث پرشدن فضای خالی و کاهش جذب آب می‌شود اما در مدت‌زمان طولانی به علت عدم نفوذ استایرن در دیواره رطوبت وارد دیواره سلول چوبی می‌شود و جذب آب افزایش می‌یابد (۳، ۷، ۲۳، ۲۴). افزایش نسبت روغن سویا اپوکسی‌دار در سطوح تلفیقی St80-ESO و St70-ESO سبب کاهش معناداری جذب آب نسبت به نمونه‌های اشباع

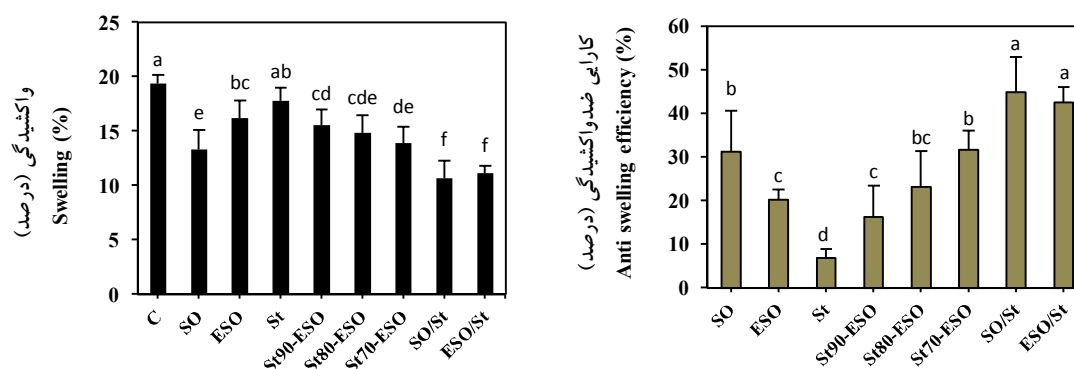


شکل ۶- جذب آب و کارایی آب‌گریزی نمونه‌های شاهد و تیمار شده پس از ۲۶۴ ساعت غوطه‌وری بلندمدت در آب (حروف روی نمودارهای ستونی، گروه‌بندی دانکن در سطح معناداری ۹۵ درصد را نشان می‌دهد).

Figure 6. Water absorption and water repellency after 264 h soaking in water (letters on columns indicate Duncan grouping at 95% significant level).

مشابه با نمونه‌های تیمار نشده دارد (۳، ۲۳). روغن سویا خام با وزن مولکولی پایین‌تر و متعاقباً نفوذ بیش‌تر و ماهیت غیرقطبی‌تر نسبت به روغن اپوکسی‌دار، ثبات ابعاد بیش‌تری ایجاد نمود. در اصلاح تلفیقی متناسب با افزایش نسبت روغن سویا اپوکسی‌دار به استایرن، کارایی ضدواکسیدگی افزایش معناداری یافت (شکل ۷). اصلاح St70-ESO با افزایش نرخ تبدیل مونومر به پلیمر، پر شدن بیش‌تر تخلخل و استقرار پوشش روغنی آبگریز به کاهش جذب آب و متعاقباً کاهش تغییر ابعاد انجامید.

پایداری ابعاد: واکسیدگی حجمی نمونه‌های شاهد و تیمار شده پس از ۲۶۴ ساعت غوطه‌وری در شکل ۷ نشان داده شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین واکسیدگی حجمی به ترتیب در نمونه‌های شاهد و در سطوح دومرحله‌ای (SO/St و ESO/St) مشاهده شد. اختلاف معناداری بین مقادیر میانگین واکسیدگی حجمی نمونه‌های اشباع شده با استایرن و نمونه‌های شاهد وجود نداشت. تغییر ابعاد به تغییرات دیواره سلول چوبی وابسته است؛ اما از آن‌جاکه استایرن قادر به اصلاح دیواره نمی‌باشد در طولانی‌مدت واکسیدگی

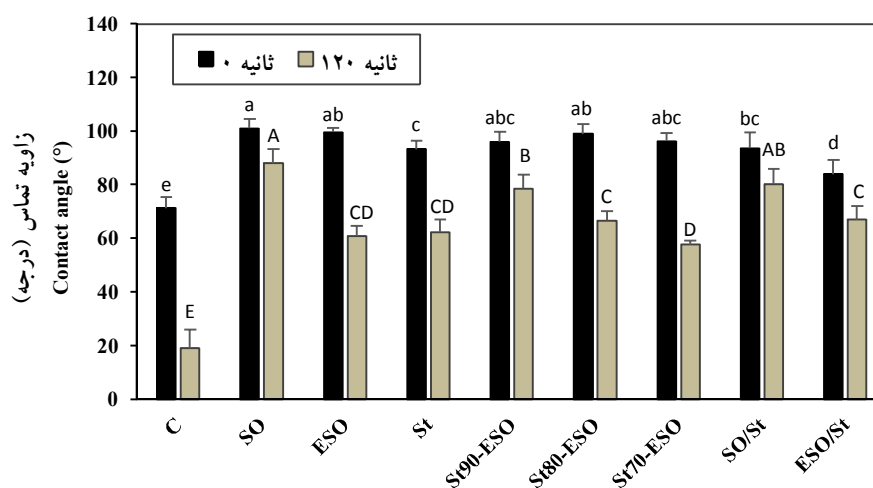


شکل ۷- واکسیدگی حجمی و کارایی ضدواکسیدگی پس از ۲۶۴ ساعت غوطه‌وری در آب (حروف روی نمودارهای ستونی، گروه‌بندی دانکن در سطح معناداری ۹۵ درصد را نشان می‌دهد).

Figure 7. Swelling and anti swelling efficiency after 264 h soaking in water (letters on columns indicate Duncan grouping at 95% significant level).

بود و زاویه تماس در آن‌ها نسبتاً پایدار و کم‌تر از ۱۰ درجه نسبت به زمان افتادن قطره کاهش یافته بود. زاویه تماس در سطوح اصلاح‌شده حاوی روغن اپوکسی‌دار کاهش معناداری یافت. کاهش آب‌گریزی نمونه‌های اصلاح‌شده با روغن اپوکسی‌دار می‌تواند به افزایش گروه‌های آب‌دوست کربونیل (شکل ۱) (۴) و افزایش قطبیت چوب اصلاح‌شده با روغن اپوکسی‌دار مربوط شود. زبری سطح و انرژی سطح نیز دو عامل مهم مؤثر بر زاویه تماس می‌باشند (۴). استایرن از طریق پرکردن نسبی یا کامل حفرات سلولی (شکل ۲) و کاهش انرژی سطح سبب افزایش زاویه تماس چوب می‌گردد (۲۴، ۲۵). روغن سویا خام با ساختاری غیرقطبی آب‌گریزی مطلوبی را به‌تنهایی و در ترکیب با استایرن ایجاد نمود.

ترشوندگی سطح: به‌منظور ارزیابی قابلیت ترشوندگی سطوح اصلاح‌شده زاویه تماس قطره با سطح چوب در زمان صفر و ۱۲۰ ثانیه پس از افتادن قطره روی نمونه، اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، کم‌ترین زاویه تماس مربوط به نمونه شاهد (۷۰ درجه) بود که به سرعت جذب چوب شد و پس از ۱۲۰ ثانیه به ۱۹ درجه رسید. اصلاح سبب کاهش ترشوندگی و ماندگاری قطره روی سطح نمونه‌های چوبی گردید (شکل ۸). در بین سطوح اصلاح‌شده کم‌ترین زاویه تماس مربوط به سطح اصلاح‌شده با روغن سویا اپوکسی‌دار و سطح دومرحله‌ای ESO/St بود. سایر سطوح بیش‌ترین زاویه تماس را داشتند و اختلاف معناداری بین زاویه تماس آن‌ها وجود نداشت. پس از گذشت ۱۲۰ ثانیه تغییرات معناداری در زاویه تماس و جذب قطره رخ داد. بیش‌ترین زاویه تماس مربوط به سطح SO و سطح دومرحله‌ای SO/St و St90-ESO



شکل ۸- زاویه تماس در زمان صفر و ۱۲۰ ثانیه

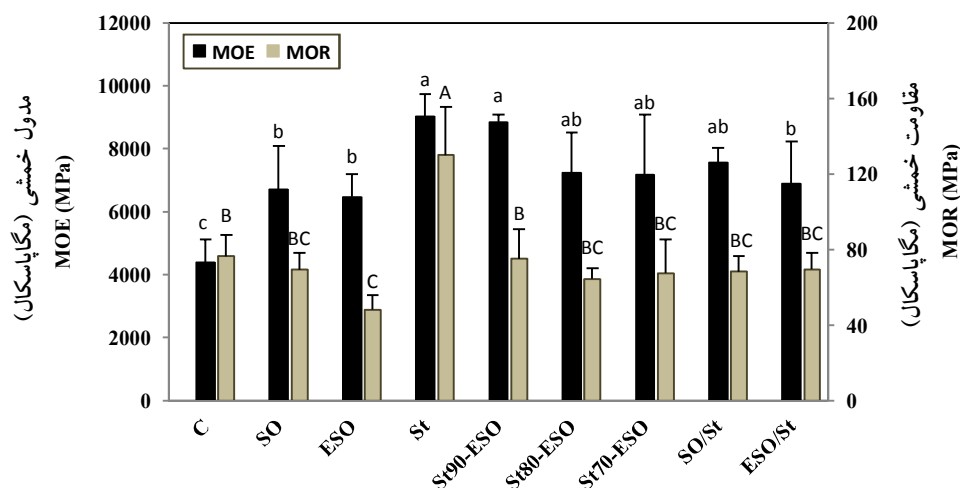
(حروف روی نمودارهای ستونی، گروه‌بندی دانکن در سطح معناداری ۹۵ درصد را نشان می‌دهد).

Figure 8. Contact angle in 0 and 120 second (letters on columns indicate Duncan grouping at 95% significant level).

ویژگی های مکانیکی

خواص خمشی: شکل ۹ به ترتیب میانگین مدول گسیختگی و الاستیسیته نمونه های شاهد و اصلاح شده را نشان می دهد. اصلاح سبب افزایش معنادار مدول گسیختگی نمونه های اصلاح شده با استایرن و کاهش معنادار آن در نمونه های اصلاح شده با روغن شد، اما در سایر سطوح تغییرات معنادار نبود. میانگین مدول گسیختگی از ۷۰ MPa در نمونه شاهد به ۱۲۰ MPa در نمونه اصلاح شده با استایرن افزایش یافت. پژوهش های پیشین نیز افزایش مدول گسیختگی متعاقب اصلاح با استایرن را گزارش نمودند (۲۶) چراکه توزیع پلیمر در حفره سلولی سبب افزایش دانسیته، تقویت زمینه چوبی و بهبود مقاومت خمشی می شود (۱۰، ۲۶، ۲۷، ۲۸). حضور روغن سبب کاهش مدول گسیختگی در نسبت های مختلف اصلاح

ترکیبی و دومرحله ای شد. روغن به عنوان یک فاز نرم و انعطاف پذیر عمل کرده و برخلاف پلیمرهای جامد مانند پلی استایرن، موجب تقویت مقاومت مکانیکی نمی شود. حتی در برخی موارد، نفوذ روغن در دیواره های سلولی می تواند ساختار را تا حدودی پلاستیکی کرده و باعث کاهش مقاومت خمشی شود (۸). اصلاح با روغن خام و اپوکسی به افزایش مدول الاستیسیته نسبت به نمونه شاهد انجامید. پرشدن حفرات سلولی با روغن به عنوان یک سیال تراکم ناپذیر در افزایش مدول الاستیسیته تحت دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد مؤثر است (۲۹، ۳۰). اصلاح دومرحله ای و تلفیقی با افزایش نرخ تبدیل مونومر به پلیمر به دلیل واکنش پلیمریزاسیون رادیکالی روغن و استایرن و پرشدن حفرات سلولی با پلیمر روغن/استایرن سبب افزایش مدول الاستیسیته شد (۲۷، ۲۸).



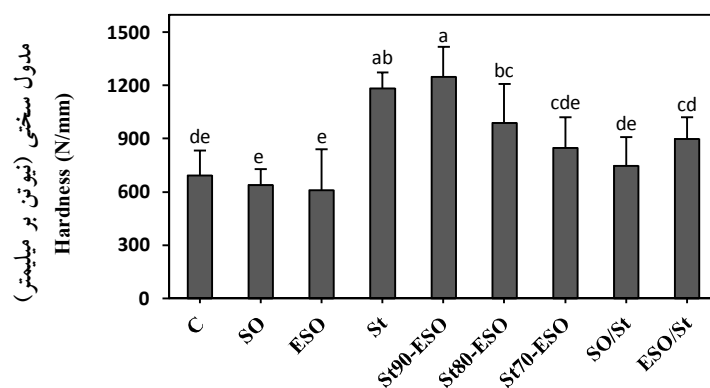
شکل ۹- اثر سطوح مختلف اصلاح بر مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته

(حروف روی نمودارهای ستونی، گروه بندی دانکن در سطح معناداری ۹۵ درصد را نشان می دهد).

Figure 9. Effect of different modification on MOE and MOR (letters on columns indicate Duncan grouping at 95% significant level).

۱۰). دلیل این امر را می‌توان به پر شدن حفرات سلولی با استایرن و افزایش دانسیته نمونه‌های چوبی نسبت داد (۲۷، ۳۱). در نسبت روغن عامل‌دار/ استایرن ۷۰/۳۰، با افزایش نقش نرم‌کنندگی روغن، سختی کاهش معناداری نشان داد.

سختی: کم‌ترین مقدار مدول سختی در نمونه شاهد و نمونه‌های اشباع‌شده با روغن خام و روغن اپوکسی‌دار اندازه‌گیری شد. بیش‌ترین مقدار مدول سختی در نمونه‌های حاوی پلی‌استایرن و پلی‌استایرن در تلفیق با ۱۰ درصد روغن اپوکسی‌دار اندازه‌گیری شد (شکل



شکل ۱۰- سختی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده

(حروف روی نمودارهای ستونی، گروه‌بندی دانکن در سطح معناداری ۹۵ درصد را نشان می‌دهد).

Figure 10. Effect of different modification on hardness (letters on columns indicate Duncan grouping at 95% significant level).

اپوکسی‌دار کم‌ترین مقاومت خمشی را داشت. در سطوح ترکیبی استایرن با روغن، مقاومت خمشی نسبت به شاهد تغییر معناداری نشان نداد. روغن به‌عنوان یک فاز نرم و انعطاف‌پذیر عمل کرده و برخلاف پلیمرهای جامد مانند پلی‌استایرن، موجب تقویت مقاومت مکانیکی نشد. با این وجود سختی نمونه‌های اصلاح‌شده با استایرن و ترکیب ۹۰ درصد استایرن/روغن عامل‌دار به‌طور معناداری بیش‌تر از سایر سطوح بود.

در مقایسه بین دو روش اصلاح هم‌زمان و دومرحله‌ای، بیش‌ترین پایداری ابعاد در اصلاح دومرحله‌ای حاصل شد، اما مقاومت خمشی و مدول خمشی تفاوت معناداری نداشت. سختی چوب اصلاح‌شده مستقل از روش اصلاح، به کاهش نسبت استایرن تغییر معنادار نشان داد.

نتیجه‌گیری

بر پایه یافته‌های این پژوهش، نمونه‌های اصلاح‌شده با روغن (خام و اپوکسی) و اصلاح دومرحله‌ای روغن/استایرن بهترین خواص فیزیکی را نشان دادند. تلفیق روغن/استایرن و افزایش نسبت روغن با افزایش نرخ تبدیل مونومر به پلیمر، انسداد بیش‌تر حفرات سلولی را به همراه داشت که به بهبود معنادار کارایی آب‌گریزی و کارایی ضدواکسیدگی انجامید. اصلاح با روغن سویا خام با ماهیت غیرقطبی، سرعت جذب قطره را کاهش و آب‌گریزی سطح را نسبت به روغن اپوکسی‌دار با ماهیت نسبتاً قطبی بهبود بخشید که این نتیجه در تلفیق با استایرن نیز مشاهده شد.

از نظر خواص مکانیکی، سطح حاوی پلیمر استایرن بالاترین و سطح اصلاح‌شده با روغن سویای

است تا برای افزایش سختی و استحکام مکانیکی. ولیکن معرفی شرایط بهینه اصلاح روغن/پلیمر که با برهمکنش مطلوب به بهبود محسوس‌تر خواص مکانیکی و فیزیکی بیانجامد، مستلزم پژوهش‌های گسترده‌تر می‌باشد.

درمجموع، تیمار چوب با روغن سویای خام/اپوکسی موجب افزایش آب‌گریزی و پایداری ابعادی می‌شود، اما از نظر تقویت مکانیکی نسبت به تیمارهای پلیمری کارایی کم‌تری دارد. این تیمار بیش‌تر برای ارتقای ویژگی‌های فیزیکی مانند کاهش جذب آب و بهبود مقاومت در برابر رطوبت مؤثر

منابع

1. Ermeýdan, M., Babacan, M., & Dizman Tomak, E. (2020). Evaluation of dimensional stability, weathering and decay resistance of modified pine wood by in-situ polymerization of styrene. *J. of Wood Chemistry and Technology*. 40, 1-12.
2. Hill, C. A. S. (2006). Wood modification: chemical, thermal and other processes. Wiley, Chichester, 239 p.
3. Ghorbani, M., & Kaki, R. (2016). Investigation on physical behavior of styrene wood-polymer in different concentrations of monomer. *Iranian J. of Wood and Paper Industries*, 7(2), 231-239. [In Persian]
4. Chen, J., Wang, Y., Cao, J., & Wang, W. (2020). Improved Water Repellency and Dimensional Stability of Wood via Impregnation with an Epoxidized Linseed Oil and Carnauba Wax Complex Emulsion. *Forests*, 11(3), 271.
5. Demirel, G. K., Temiz, A., Demirel, S., Jebrane, M., Terziev, N., Gezer, E. D., & Ertas, M. (2016). Dimensional stability and mechanical properties of epoxidized vegetable oils as wood preservatives. Second COST Action FP1407 International Conference, Brno, Czech Republic. Pp: 49-50.
6. Panov, D., & Terziev, N. (2015). Durability of epoxi-oil modified and alkoxysilane treated wood in field testing, *BioResources*. 10(2), 2479-2491.
7. Ermeýdan, M. A., Cabane, E., Gierlinger, N., Koetz, J., & Burgert, I. (2014). Improvement of wood material properties via in situ polymerization of styrene into tosylated cell walls. *RSC Advances*. 4, 12981-12988.
8. Jebrane, M., Fernández-Cano, V., Panov, D., Terziev, N., & Daniel, G. (2015b). Novel hydrophobization of wood by epoxidized linseed oil. Part 2: Characterization by FTIR spectroscopy and SEM, and determination of mechanical properties and field test performance. *Holzforschung*. 69(2), 179-186.
9. Ghasemi, M., Dastoorian, F., Abedini, R., & Amininasab, S. M. (2020). Effect of poplar wood impregnation with epoxidized soybean oil on the set recovery, *Iranian J. of Wood and Paper Industries*. 11(3), 381-394. [In Persian]
10. Ghorbani M., & Nikkhah, A. (2021) Comparing the effect of cell wall modification with glycidyl methacrylate and maleic anhydride on the physical, mechanical and biological properties of poplar wood-styrene polymer composite. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 12(2), 259-270. [In Persian]
11. Acosta, A. P., de Avila Delucis, R., Amico, S. C., & Gatto, D. A. (2021). Fast-growing pine wood modified by a two-step treatment based on heating and in situ polymerization of polystyrene. *Construction and Building Materials*. 302(4), 124422.
12. Green, D. W., Begel, M., & Nelson, W. (2006). Janka hardness using nonstandard specimens. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Product Laboratory. 303, 13p.
13. Pandey, K. K. (1999). A study of chemical structure of soft and hardwood

- and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*. 71(12), 1969-1975.
14. Jambrečković, B., Govorčin Bajsić, E., Španić, N., Sedlar, T., & Sinković, T. (2022). Viscoelastic and thermal properties of styrene-modified fir wood. *Polymers*, 14(4), 786.
15. Żmuda, E., Wronka, A., Kowaluk, G., & Radomski, A. (2024). Effect of Styrene Polymerization on the Bondability of Beech and Alder Wood with Different Adhesives. *Polymers*. 16(1), 149.
16. Demirel, G. K., Temiz, A., Jebrane, M., Terziev, N., & Gezer, E. D. (2018). Micro-distribution, water absorption, and dimensional stability of wood treated with epoxidized plant oils. *BioResources*. 13(3), 5124-5138.
17. Li, W., Zhang, Z., Wang, X., Mei, C., Van Acker, J., & Van den Bulcke, J. (2021). Understanding the effect of growth ring orientation on the compressive strength perpendicular to the grain of thermally treated wood. *Wood Science and Technology*. 55, 1439-1456.
18. Terziev, N., & Panov, D. (2010). Plant oils as green substances for wood protection. *Ecwood: Minimizing the environmental impact of the forest products industries*. Porto, Portugal, Pp: 143-149.
19. Wu, G., Lang, Q., Chen, H., & Pu, J. (2012). Physical and chemical performance of eucalyptus wood with impregnated chemicals. *BioResources*. 7(1), 816-826.
20. Ibach, R. E., & Ellis, W. D. (2005). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Chapter 15: Lumen Modification*, USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI. ISBN 0-8493-1588-3, Pp: 421-446.
21. Lu, Y., & Larock, R. C. (2009). Novel polymeric materials from vegetable oils and vinyl monomers: preparation, properties and applications. *ChemSusChem*. 2, 136-147.
22. Gultekin, M. U., Beker Gu'ner, F. S., Erciyes, A., & Yagci, Y. (2000). Styrenation of castor oil and linseed oil by macromer method. *Macromolecular Materials and Engineering*. 283, 15-20.
23. Jafari, A., & Omidvar, A. (2018). The effect of nano copper oxide on physical properties and leaching resistance of wood-Polystyrene polymer. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 25(1), 49-60.
24. Pelit, H., & Arisut, U. (2023). Roughness, Wettability, and Morphological Properties of Impregnated and Densified Wood Materials, Impregnated & densified wood, *BioResources*. 18(1), 429-446.
25. Che, W., Xiao, Z., Wang, Z., Nguyen, T. T., & Xie, Y. (2019). Enhanced weathering resistance of radiata pine wood by treatment with an aqueous styrene/acrylic acid copolymer dispersion. *J. of Wood Chemistry and Technology*. 10, 1-15.
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-suit polymerization of monomers. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 84, 401-406.
27. Ghorbani, M., Heydari, F., & Zabihzadeh, S. M. (2017). Effect of cell wall modification of styrene wood polymer with maleic anhydride and glycidyl methacrylate on thermal stability, mechanical behavior and biological resistance of composite. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 7(4), 601-614. [In Persian]
28. Yildiz, Ü. C., Yildiz, S., & Gezer, E. D. (2005). Mechanical properties and decay resistance of wood-polymer composites prepared from fast growing species in Turkey. *Bioresource Technology*. 96(9), 1003-1011.
29. Baar, J., Brabec, M., Slávik, R., & Čermák, P. (2021). Effect of hemp oil impregnation and thermal modification on European beech wood properties. *European Journal of Wood and Wood Products*. 79, 161-175.

30. Hejazi, S. J., Abedini, R., Ghorbani, M., & Dastoorian, F. (2025). Evaluating vegetable oil epoxidation efficiency on properties of eucalyptus wood: Thermal and thermo-chemical processing, *BioResources*. 20(2), 4450-4463.
31. Ghorbani Kookandeh, M., Kaki, R., & Omidvar, A. (2015). Effect of styrene and methyl methacrylate monomers on mechanical properties and decay resistance of beech (*Fagus Orientalis*). *Forest and Wood Products*. 68(1), 195-207. [In Persian]

