

## بررسی مقاومت به آتش و خواص مکانیکی چوب پلیمر صنوبر تیمار شده با نانو ولاستونیت/استایرن

سهیلا ایزدیاری<sup>۱\*</sup>، رقیه حمزه زاده<sup>۲</sup> و داود افهامی سیسی<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول، استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران، پست الکترونیک: sizadyar@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناس ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

دریافت: دی ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: اسفند ۱۳۹۸

### چکیده

هدف از این پژوهش، اثر اشباع چوب صنوبر با نانو ولاستونیت و مخلوط نانو ولاستونیت و استایرن بر مقاومت به آتش و خواص مکانیکی چوب پلیمر ساخته شده می‌باشد. نمونه‌های چوب صنوبر (*Populus deltoides*) با نانو ولاستونیت با غلظت ۴ درصد و مونومر استایرن محلول در متانول با غلظت ۷۵ درصد، با روش خلأ- فشار اشباع شدند. چهار تیمار مختلف چوب با نانو ولاستونیت، استایرن، اشباع مخلوط نانو ولاستونیت و استایرن (تیمار یک مرحله‌ای) به نسبت یک‌به‌یک و در نهایت اشباع اولیه چوب به وسیله نانو ولاستونیت و بعد استایرن (تیمار دو مرحله‌ای) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، خواص مقاومت به آتش و خواص مکانیکی نمونه‌ها بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که کاهش وزن چوب در برابر آتش در تیمار دو مرحله‌ای (NW+St)، ۶۱/۳۸ درصد و در تیمار یک مرحله‌ای (NW/St)، ۶۹/۶۸ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود یافت. دوام شعله تیمار NW/St نیز تقریباً با تیمار NW برابر می‌باشد و ۳۰ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود نشان داد. کاهش سطح کربونیزه شده در تیمارهای دو مرحله‌ای (NW+St) و یک مرحله‌ای (NW/St) به ترتیب برابر ۲۸/۵۳ و ۲۹/۰۶ درصد بود که کاهش قابل توجهی را نشان داد. نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان داد که در اثر حضور ماده کندسوز کننده مقاومت به فشار موازی الیاف در تیمار NW/St بیشترین مقدار را در بین سایر تیمارها داشت که افزایشی برابر ۵۷/۴۱ درصد را نسبت به نمونه شاهد نشان داد. مدول الاستیسیته و گسیختگی تیمار NW/St به ترتیب ۲۶/۷۷ و ۳۵/۷۱ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشتند. به علاوه، مقاومت به سختی تیمار NW/St ۱۰۷/۰۹ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش نشان داد. در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مخلوط کردن نانو ولاستونیت با استایرن در عین حال که مقاومت چوب پلیمر را در برابر آتش افزایش داد، بلکه باعث بهبود خواص مکانیکی چوب پلیمر هم شد.

واژه‌های کلیدی: نانو ولاستونیت، چوب پلیمر، مقاومت به آتش، صنوبر، خواص مکانیکی.

### مقدمه

درخت‌کاری‌ها دارای معایب بیشتری نسبت به چوب‌های به دست آمده از جنگل‌های طبیعی می‌باشد. ابعاد آنها کوچک‌تر بوده و حجم زیادی جوان چوب به همراه دارند. دوام طبیعی آنها کمتر بوده و در مجموع چوبی با کیفیت پایین و تغییرات شدید ارائه می‌دهند که برای کاربرد نیاز به اصلاح دارند (Zabel, 1992). یکی از روش‌های اصلاح چوب، اشباع آنها

امروزه بهره‌برداری از جنگل‌های طبیعی کاهش یافته است و تأمین چوب معمولاً از درخت‌کاری‌ها با گونه‌های تند رشد چوبی انجام می‌شود. به عنوان مثال در کشور ما بیش از ۴۰ درصد نیاز کشور با چوب صنوبرهای دست کاشت تأمین می‌شود (Modaberi et al., 2014). چوب به دست آمده از

اتانول، متانول، دی‌اتیل اتر، استون و تولوئن قابل حل است. استایرن یک مونومر غیرقطبی است، بنابراین انتظار می‌رود پس از نفوذ در چوب بیشتر حفره‌های سلولی (حفره آوند، فیبر، سلول‌های پارانشیم) را اشغال کرده و کمتر در دیواره نفوذ نماید (Siau, 1969). معمولاً دیگر مونومرها برای کنترل میزان پلیمریزاسیون، میزان پلیمریزاسیون و اتصالات عرضی استایرن اضافه می‌شوند تا خواص فیزیکی چوب پلیمر بهبود یابد (Li et al., 2009; Li et al., 2011). سختی، مقاومت فشاری، مقاومت برشی و مقاومت خمشی چوب تیمار شده با استایرن بهتر از نمونه‌های تیمار نشده است. با این حال، معمولاً مقاومت به ضربه به شدت بیشتر از چوب تیمار نشده کاهش می‌یابد که این به دلیل ترک‌هایی است که در مورفولوژی چوب تیمار شده با استایرن دیده شده است (Li et al., 2009; Li et al., 2011; Razi & Raman, 2000). بر خلاف تمام مزایایی که چوب پلیمرها دارند ولی در برابر آتش بسیار حساس هستند و به دلیل وجود پلیمر در ساختار آنها در مقایسه با چوب احتمال آتش‌گیری بیشتری دارند، از این رو بهبود رفتار چوب پلیمر در برابر آتش دارای اهمیت زیادی می‌باشد. به منظور افزایش مقاومت چوب پلیمر در مقابل آتش، آن را با انواع مواد حفاظتی و کندسوز کننده ترکیب می‌کنند. تحقیقات اخیر نشان داده است که اشباع چوب با نانولاستونیت باعث افزایش قابل توجه مقاومت به آتش چوب صنوبر شده است (Rangavar et al., 2018). علاوه بر کندسوز کردن چوب باعث افزایش دوام طبیعی آن در مقابل حمله قارچ‌ها نیز می‌گردد (Haghighi et al., 2013). از این رو این تحقیق با هدف بررسی تأثیر اشباع دو مرحله‌ای چوب با نانولاستونیت و مونومر وینیل و همچنین مخلوط نانولاستونیت و مونومر وینیل بر خواص مقاومت به آتش و مقاومت مکانیکی در چوب پلیمر صنوبر انجام شد.

با مونومر و بعد پلیمریزاسیون مونومر به روش حرارتی می‌باشد. به چوبی که با این روش اصلاح می‌شود چوب پلیمر گفته می‌شود. در این فرایند یکپارچگی و ظاهر چوب حفظ می‌شود، در حالی که حفره‌های سلولی و بین سلولی آن توسط پلیمر پر می‌شود (Din, 1989). مقاومت مکانیکی (Li et al., 2010) مقاومت در برابر تخریب بیولوژیکی (Schaudy & Proksch, 1982) و ویژگی‌های فیزیکی چوب (Stolf & Lahr, 2004) بهبود می‌یابد، به طوری که چوب اصلاح شده می‌تواند جایگزین مناسبی برای فلزات و آلیاژهای گران‌قیمت در بسیاری از کاربردهای صنعتی باشد (Deka & Saikia, 2000).

برخی از مونومرهای وینیل مورد استفاده در چوب پلیمرها عبارتند از: استایرن، کلرید وینیل، وینیل استات، اکسید اتیلن، بسیاری از اکریلات‌ها به ویژه متاکریلات، اکریلونیتریل، بوتیل استایرن و کلرو استایرن. از آنجا که مونومرهای وینیلی غیر قطبی‌اند در هر صورت اثر متقابل کمی با گروه‌های OH متصل به مولکول سلولز دارند. به طور کلی پلیمرهای وینیل به آسانی آوندها و سایر فضاهای خالی در ساختار چوب را پر می‌کنند (Meyer, 1981). با این حال، مواردی وجود دارد که در آن پلیمرهای وینیلی به صورت توده جمع شده و با اجزای دیواره سلولی پیوند تشکیل می‌دهند (Li et al., 2011). مونومرهای وینیل برای افزایش ثبات ابعادی و خواص مکانیکی استفاده می‌شوند، همین‌طور باعث حفظ کیفیت زیبایی چوب شده و به مرغوبیت آن می‌افزایند. برخلاف رنگ تیره پلیمرهای ترموست، پلیمر وینیلی روشن، بی‌رنگ و یک ماده گرماسخت است. روند پلیمریزاسیون پلیمر وینیلی به این صورت است که فضاهای خالی چوب تغییر رنگ نمی‌دهد و از جذابیت ظاهری آن نمی‌کاهد (Haque, 1997).

استایرن با نام وینیل بنزن، مونومری است که معمولاً برای چوب پلیمرها استفاده می‌شود (Ibach & Ellis, 2005). بسیار فرار است و قابلیت انحلال کم و پایینی در آب دارد (۳۰۰ میلی‌گرم در یک لیتر آب  $20^{\circ}\text{C}$ )، اما در بنزن، اتر،

## مواد و روش‌ها

مواد

گونه چوبی

چوب گونه صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides*) از جنگل خیرودکنار واقع در شهرستان نوشهر به تعداد چهار اصله گرده‌بینه تهیه شد. درختان قطع شده دارای قطر برابر سینه  $5 \pm 35$  سانتی‌متر بودند. نمونه‌های چوبی اندازه‌بری و مدت دو هفته در اتاق کلیمای نگهداری گردیدند تا به رطوبت تعادل محیط برسند. سپس نمونه‌های آزمونی به ابعاد لازم برای آزمون‌های مختلف طبق استانداردهای مربوطه بریده شدند.

مواد حفاظتی

مونومر استایرن و متانول از شرکت پتروشیمی صنایع ملی ایران خریداری شد. بنزوئیل پروکساید به‌عنوان آغازگر واکنش و اتیلن گلیکول دی‌متاکریلات به‌عنوان اتصال‌دهنده عرضی از شرکت Merck (آلمان) تهیه گردید. همچنین نانو ولستونیت  $(CaSiO_3)$  از شرکت ورد خراسان تهیه شد که دارای رنگ سفید شیری تا خاکستری با ابعادی حدود ۷۰-۱۰۰ نانومتر بود.

## روش‌ها

روش اشباع نمونه‌ها

اشباع نمونه‌ها با روش خلأ- فشار انجام شد. در این روش ابتدا خلأ به میزان ۰/۷ بار به مدت ۲۰ دقیقه اعمال شد، سپس عمل غوطه‌وری نمونه‌ها با محلول حفاظتی با حفظ خلأ انجام شد و به‌دنبال آن فشار ثابت ۴ بار به مدت ۲ ساعت اعمال گردید.

در اشباع با نانو ولستونیت (NW)، نمونه‌ها با محلول ۴ درصد نانو ولستونیت و با روش خلأ- فشار اشباع شدند و پس از پاک کردن سطح آنها، به مدت ۲ هفته در رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردیدند. بعد از آن در آون با دمای  $2 \pm 103$  درجه سانتی-گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند و بعد وزن ( $M_1$ ) و حجم آنها ( $V_1$ ) اندازه‌گیری شد. افزایش وزن نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) و میزان ماندگاری<sup>۱</sup> بر مبنای حجم چوب با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{Weight Gain (\%)} = \left( \frac{M_1 - M_0}{M_0} \right) \times 100$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{Retention} = \left( \frac{M_1 - M_0}{V_1} \right) \times 1000$$

با نسبت وزنی ۷۵ درصد استایرن استفاده شد. از بنزوئیل پروکساید به میزان ۰/۵ درصد وزنی استایرن به‌عنوان آغازگر واکنش پلیمریزاسیون و اتیلن گلیکول دی‌متاکریلات به میزان ۱/۵ درصد وزنی استایرن برای ایجاد اتصال عرضی به محلول استایرن اضافه شد و عمل اشباع نمونه‌ها به روش خلأ- فشار انجام شد. بعد از مرحله اشباع، به‌منظور انجام عمل پلیمریزاسیون نمونه‌ها مدت ۸ ساعت در آون با دمای  $5 \pm 80$  درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شدند و پس از آن در

Weight Gain: درصد افزایش وزن خشک بر اثر اشباع با

ماده حفاظتی

$M_0$ : وزن خشک نمونه قبل از اشباع (g)

$M_1$ : وزن خشک نمونه بعد از اشباع (g)

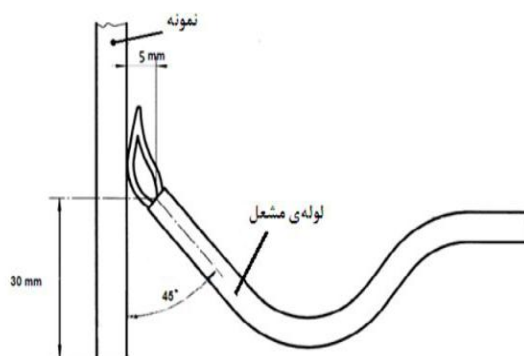
Retention: میزان ماندگاری ( $Kg/m^3$ )

$V_1$ : حجم خشک نمونه ( $cm^3$ )

در تیمار استایرن (St) از مونومر استایرن محلول در متانول

### آزمون‌های مقاومت به آتش

نمونه‌های چوبی مطابق استاندارد ISO 11925-3 در ابعاد  $9 \times 100 \times 150 \text{ mm}^3$  با ۱۰ تکرار در هر تیمار برای هر آزمون تهیه شده و به مدت ۴ هفته در اتاق کلیما مشروط‌سازی شدند. برای انجام آزمون مقاومت به آتش (Rangavar *et al.*, 2018) از دستگاه ذکر شده در استاندارد فوق استفاده شد (شکل ۱). پس از استقرار هر نمونه در دستگاه، دهانه نازل آتش با زاویه ۴۵ درجه و به فاصله ۵ میلی‌متر از سطح و ۳۰ میلی‌متر از لبه پایین نمونه‌ها قرار گرفت و آزمون مقاومت به آتش با فشار ثابت گاز خروجی به مدت ۱۲۰ ثانیه انجام شد. پس از اتمام آزمون وزن نمونه‌ها دوباره اندازه‌گیری شده و درصد کاهش وزن نمونه نسبت به وزن اولیه به‌عنوان میزان مقاومت به آتش در نظر گرفته شد.



شکل ۱- شیوه قرار گرفتن نازل آتش بر روی نمونه طبق استاندارد ISO 11925-3

کلیما به کمک دستگاه Instron 4486 اندازه‌گیری شد. سرعت ثابت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بود. در پایان حداکثر بار وارد شده به نمونه‌ها در هنگام شروع شکست ثبت شد و مقاومت به فشار موازی الیاف با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$\sigma$ : حداکثر تنش موازی الیاف ( $\text{N/mm}^2$ )

$P$ : حداکثر بار وارد شده هنگام شروع شکست (N)

$A$ : سطح مقطع نمونه ( $\text{mm}^2$ )

آون با دمای  $2 \pm 103$  درجه سانتی‌گراد خشک و توزین گردیدند ( $M_1$ ). افزایش وزن حاصل با استفاده از رابطه (۱) تعیین گردید. در تیمار دو مرحله‌ای نانو ولاستونیت و استایرن ( $NW+St$ )، ابتدا نمونه‌ها با نانو ولاستونیت ۴ درصد اشباع و بعد توزین شده و به مدت ۱۴ روز به اتاق کلیما منتقل شدند. پس از مشروط‌سازی، نمونه‌ها در آون با دمای  $2 \pm 103$  درجه سانتی‌گراد خشک شده و وزن آنها اندازه‌گیری شد. پس از آن نمونه‌ها با مونومر استایرن اشباع شدند. در تیمار تک مرحله‌ای استایرن/ نانو ولاستونیت ( $NW/St$ )، ابتدا نانو ولاستونیت و استایرن به نسبت یک‌به‌یک مخلوط شدند و بعد از این مخلوط برای اشباع نمونه‌ها استفاده شد.

### آزمون‌های مکانیکی

پیش از انجام آزمون‌های مکانیکی، نمونه‌ها به مدت یک ماه در شرایط استاندارد کلیما شدند. آزمون‌های مکانیکی شامل فشار موازی الیاف، سختی و خمش استاتیکی مطابق با استاندارد ISO 13061-2014 انجام شد.

### فشار موازی الیاف

برای تعیین میزان تأثیر تیمارها بر مقاومت مکانیکی نمونه‌ها، آزمون فشار موازی الیاف مطابق استاندارد ISO 13061 - 2014 در ۱۰ تکرار انجام شد. مقاومت نمونه تیمار شده به ابعاد  $20 \times 20 \times 60 \text{ cm}^3$  پس از رسیدن به رطوبت تعادل در اتاق

## خمش استاتیکی

برای تعیین مقاومت خمشی، نمونه‌ها طبق استاندارد ISO13061-4(2014) در ابعاد  $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$  تهیه شدند. طول دهانه در این آزمون ۲۲۰ میلی‌متر بود.

## K: ضریب سختی

P: مقدار بار وارد شده به نمونه برحسب نیوتن (N)

## تحلیل آماری

تحلیل آماری نتایج به دست آمده در این مطالعه با نرم افزار آماری SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. برای بررسی اثر متقابل عوامل متغیر از آزمون تحلیل واریانس استفاده گردید. برای مقایسه و دسته‌بندی میانگین گروه‌های معنی دار از آزمون دانکن استفاده شد.

## سختی

آزمون مقاومت به سختی طبق استاندارد ISO 13061-12(2014) انجام شد. نمونه‌ها با ابعاد  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$  تهیه و برای هر تیمار، ۱۰ تکرار در نظر گرفته شد. بارگذاری نمونه‌ها بر روی سطوح شعاعی و مماسی و با استفاده از دستگاه Instron 4486 انجام شد. بار لازم برای نفوذ گلوله‌ای به شعاع  $5/64$  میلی‌متر به عمق شعاع آن در نمونه‌های آزمون برای تعیین مقاومت به سختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرعت بارگذاری با این دستگاه ۳-۶ میلی‌متر بر دقیقه است. در نهایت مقدار نیروی وارد شده به نمونه ثبت گردید و با استفاده از رابطه (۴) مقاومت به سختی نمونه‌ها محاسبه شد.

## نتایج

افزایش وزن و ماندگاری در تیمارهای مختلف

میانگین درصد افزایش وزن و مقادیر ماندگاری (کیلوگرم بر مترمکعب) نانو و لاستونیت و مونومر استایرن در تیمارهای مختلف در جدول (۱) شرح داده شده است. این داده‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی نمونه‌های با ابعاد  $(50 \times 25 \times 15 \text{ mm}^3)$  می‌باشد. نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد که افزایش وزن و ماندگاری بین نمونه‌های شاهد و تیمار شده در فاصله اطمینان ۹۹ درصد معنی دار است.

$$H = KP \quad \text{رابطه (۴)}$$

H: میزان سختی برحسب نیوتن (N)

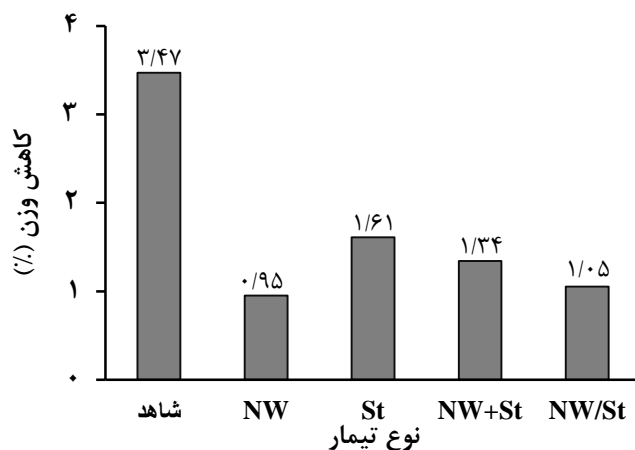
جدول ۱- میزان درصد افزایش وزن و ماندگاری نمونه‌ها در تیمارهای مختلف

ماندگاری ( $\text{kg/m}^3$ )	افزایش وزن (%)	تیمار
۳/۶۷	۰/۹	NW
۲۱۹/۹۵	۵۳/۷۹	St
۱۶۹/۶۴	۳۹/۷۱	NW+St
۲۶۲/۲۲	۶۴/۲۸	NW/St

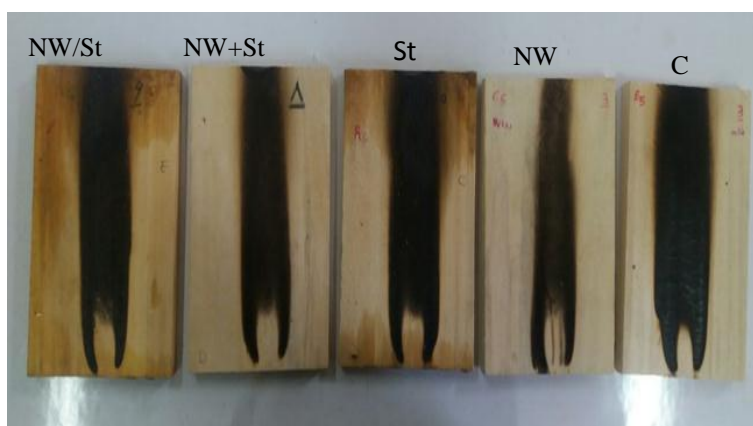
## کاهش وزن در آزمون آتش

وزن چوب در برابر آتش در تیمار دو مرحله‌ای (NW+St) و در تیمار یک مرحله‌ای (NW/St) به ترتیب به مقدار  $61/38$  و  $69/68$  درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود یابد.

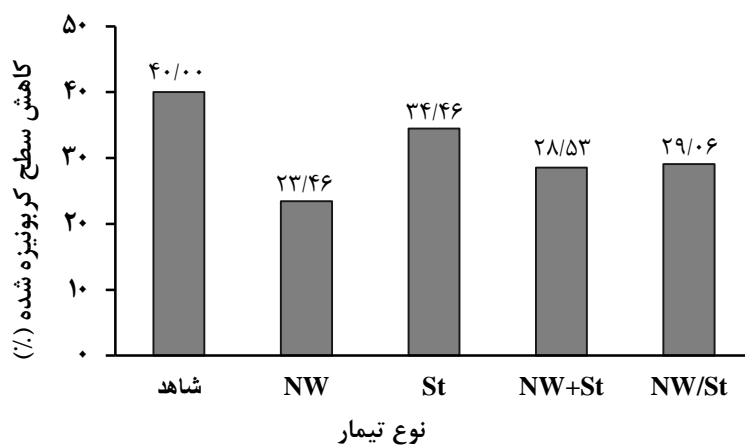
نتایج مربوط به کاهش وزن در برابر آتش در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن نانو و لاستونیت به چوب پلیمر استایرن، باعث شد که کاهش



شکل ۲- مقادیر کاهش وزن در برابر آتش در تیمارهای مختلف



شکل ۳- مقایسه سطح کربونیزه شده نمونه‌ها در تیمارهای مختلف



شکل ۴- سطح کربونیزه شده در برابر آتش در تیمارهای مختلف

چه این زمان طولانی‌تر باشد مطلوب‌تر است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن نانو و لاستونیت به چوب زمان آتش‌گیری از ۸ ثانیه که مربوط به نمونه شاهد است به ۱۰ ثانیه افزایش پیدا می‌کند. این مقدار در مورد چوب پلیمر ساخته شده با مخلوط نانو و لاستونیت و استایرن (NW/St) نیز همان مقدار ۱۰ ثانیه می‌باشد که نسبت به نمونه شاهد ۲۵ درصد افزایش نشان می‌دهد.

#### دوام شعله در آزمون آتش

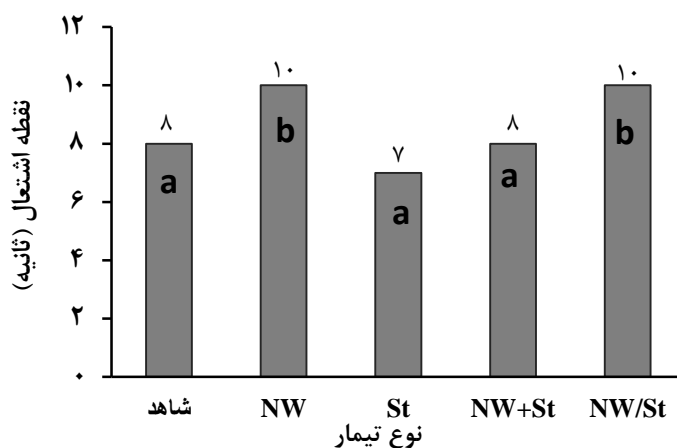
اثر نانو و لاستونیت و نوع تیمار بر دوام شعله به همراه گروه‌بندی دانکن در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود بیشترین دوام شعله مربوط به تیمار St و کمترین آن مربوط به نمونه تیمار شده با نانو و لاستونیت (NW) می‌باشد. دوام شعله تیمار NW/St نیز تقریباً با تیمار NW برابر است و ۳۰ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود نشان می‌دهد.

#### سطح کربونیزه در آزمون آتش

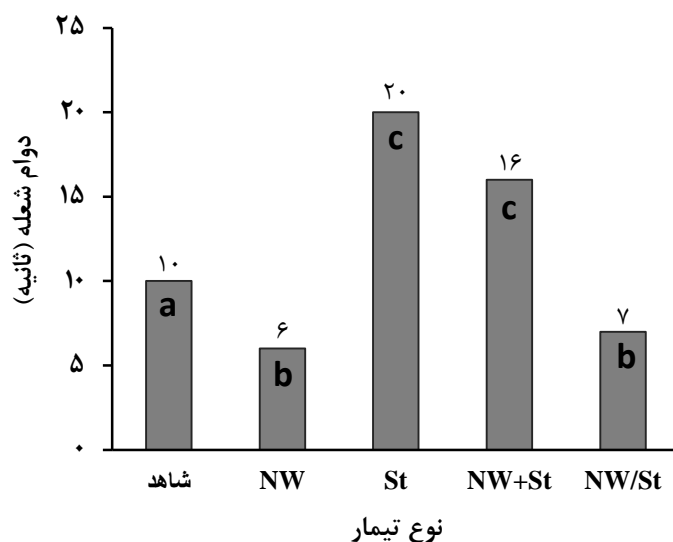
تصاویر مربوط به مقایسه سطح کربونیزه شده در تیمارهای مختلف در شکل ۳ و میانگین نتایج به دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است. تیمار چوب با نانو و لاستونیت به طور قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش سطح کربونیزه بر اثر شعله مستقیم شد. درصد کاهش سطح کربونیزه شده در تیمارهای دو مرحله‌ای (NW+St) و یک مرحله‌ای (NW/St) با نانو و لاستونیت و استایرن به ترتیب برابر ۲۸/۵۳ و ۲۹/۰۶ درصد بود که کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.

#### زمان آتش‌گیری (نقطه اشتعال) در آزمون آتش

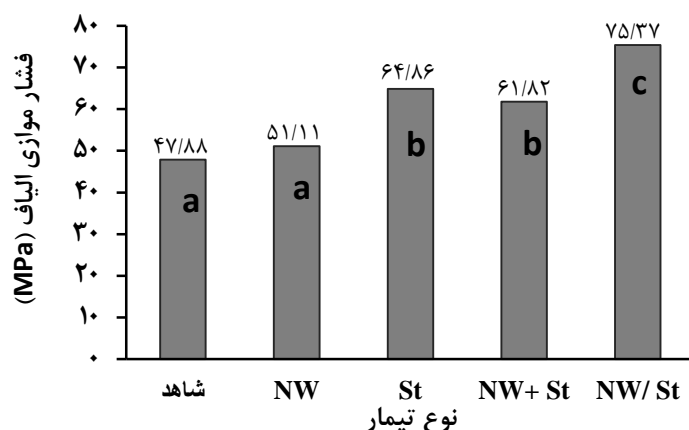
اثر مواد کندسوز کننده و نوع تیمار بر زمان آتش‌گیری تیمارهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. این پارامتر نشان‌دهنده مدت زمانی است که نمونه برای رسیدن به احتراق پایدار نیاز دارد و قابلیت احتراق مواد را نشان می‌دهد و هر



شکل ۵- تأثیر ماده کندسوز کننده و نوع تیمار بر مدت زمان آتش‌گیری چوب پلیمر



شکل ۶- تأثیر ماده کندسوز کننده و نوع تیمار بر دوام شعله چوب پلیمر



شکل ۷- مقاومت به فشار موازی الیاف نمونه‌ها

## خواص مکانیکی

مقاومت به فشار موازی بر الیاف

تاکنون به‌طور مستقل اثر اشباع با نانو و لاستونیت بر روی مقاومت‌های مکانیکی چوب بررسی نشده است اما در مورد استفاده از این ماده در چندسازه‌های چوبی نتایج خوبی بدست آمده است. نتایج تحقیقات گذشته، در مورد استفاده از نانو و لاستونیت در فرآورده‌های چندسازه حکایت از آن دارد که این ماده به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، سبب فشردگی

بیشتر تخته‌ها، ایجاد یک شبکه قوی و کارآمد بین ذرات سیمان و الیاف می‌گردد که این امر موجب بهبود چسبندگی داخلی و مقاومت فشاری چندسازه الیاف-سیمان می‌شود (Hassanpoortichi *et al.*, 2016). نتایج مربوط به مقاومت فشاری موازی الیاف در شکل ۷ نشان داده شده است. در این تحقیق بیشترین مقاومت به فشار موازی بر الیاف با NW/St به دست آمد که مربوط به تیمار NW/St با دانسیته  $63 \text{ Kg/m}^3$  بود و افزایشی برابر  $57/41$  درصد را



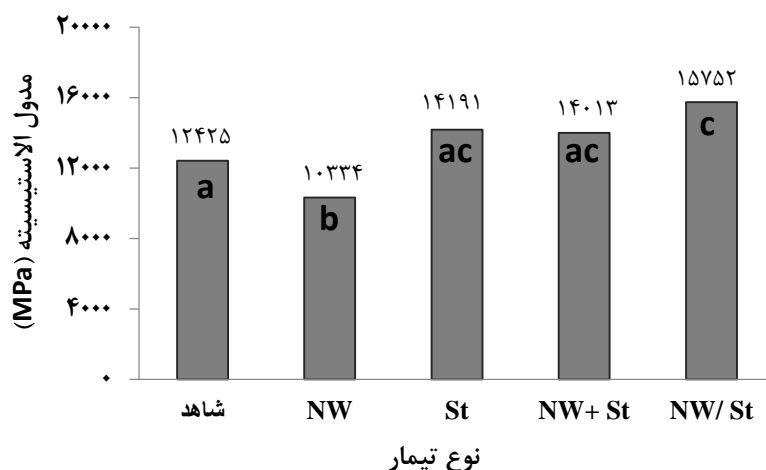
نسبت به نمونه شاهد نشان داد. شده است. مدول الاستیسیته تیمار NW نسبت به نمونه شاهد ۱۶/۸۲ درصد کاهش یافت. بیشترین مدول الاستیسیته مربوط به تیمار NW/St بود که نسبت به نمونه شاهد ۲۶/۷۷ درصد افزایش یافت.

نسبت به نمونه شاهد نشان داد.

### مقاومت خمشی استاتیکی

مدول الاستیسیته

نتایج مربوط به مدول الاستیسیته در شکل ۸ نشان داده

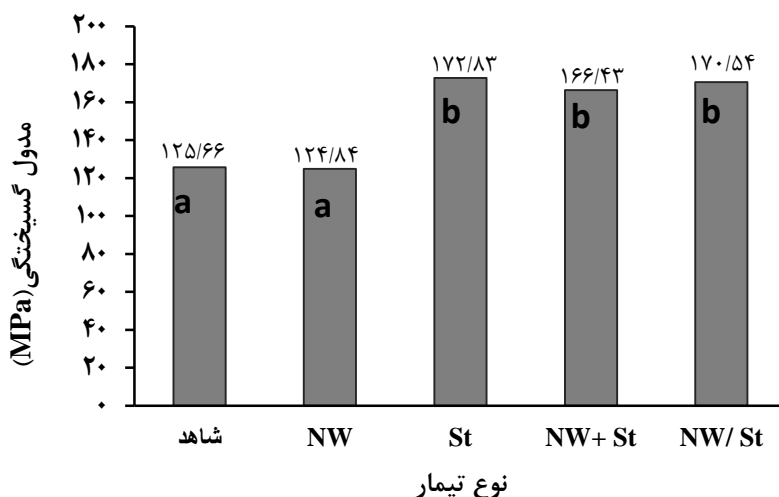


شکل ۸- مقادیر مدول الاستیسیته در تیمارهای مختلف

کلوخه شدن نانو ولاستونیت و نفوذ کم آن به داخل ساختار چوب نسبت داد. نمونه‌های تیمار شده با استایرن بیشترین مدول گسیختگی را داشتند. مدول گسیختگی این نمونه‌ها ۳۷/۵۳ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت.

### مدول گسیختگی

نتایج مدول گسیختگی نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. مدول گسیختگی نانو ولاستونیت کاهش کمی نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد. علت این کاهش را می‌توان به

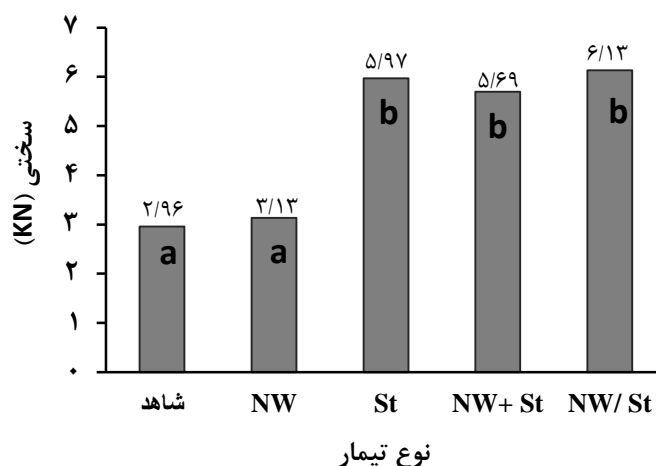


شکل ۹- مدول گسیختگی تیمارهای مختلف

## مقاومت به سختی

مربوط به چوب پلیمر و نمونه شاهد قابل توجه بود. در این تحقیق، بیشترین مقدار مقاومت به سختی مربوط به تیمار تک مرحله‌ای (NW/St) بود که نسبت به نمونه شاهد ۱۰۷/۰۹ درصد افزایش داشت.

نتایج مربوط به متوسط مقاومت به سختی در شکل ۱۰ برای تیمارهای مختلف نشان داده شده است. مقاومت به سختی نمونه تیمار شده با نانو و لاستونیت با نمونه شاهد اختلاف زیادی با یکدیگر نداشتند. ولی اختلاف بین مقادیر



شکل ۱۰- مقادیر سختی نمونه‌ها در تیمارهای مختلف

## بحث

## مقاومت به آتش

از جمله پلیمر و چوب عمل می‌کند و به این ترتیب باعث کاهش آتش‌گیری چوب پلیمر می‌شود. نتایج به‌دست آمده با نتایج Haghghi و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد. آنان بیان کردند که در نمونه‌های صنوبر اشباع شده با نانو و لاستونیت با افزایش غلظت نانو و لاستونیت، مقاومت به آتش افزایش می‌یابد. علاوه بر این، Taghiyari و همکاران (۲۰۱۲) نیز در مطالعه خود نشان دادند که افزودن نانو و لاستونیت تا میزان ۱۵ درصد باعث بهبود خواص حرارتی تخته‌ها می‌شود ولی بیشتر از این مقدار، ذرات نانو و لاستونیت در فرایند چسبندگی اختلال ایجاد کرده و با جذب رزین توسط ماده حفاظتی سبب کاهش چسبندگی الیاف به یکدیگر و به دنبال آن، پرزدار شدن سطح تخته‌ها می‌شود، از این رو آتش‌گیری الیاف سطحی سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

## زمان آتش‌گیری

نتایج حاصل نشان داد که با افزودن نانو و لاستونیت به چوب زمان آتش‌گیری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش

با توجه به نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری مقاومت به آتش نمونه‌های اشباع شده مشخص شد که افزودن نانو و لاستونیت به چوب پلیمر استایرن، باعث شد که مقاومت نمونه‌ها در برابر آتش در تیمار دو مرحله‌ای (NW+St) و در تیمار یک مرحله‌ای (NW/St) افزایش یابد. ذرات نانو و لاستونیت دارای عناصر سیلیس و کلسیم می‌باشند که در برابر آتش مقاوم هستند و همین خاصیت باعث کاهش احتمال آتش‌گیری در چوب‌های حاوی نانو و لاستونیت می‌شود. بعکس پلیمرها به شدت قابل احتراق هستند و اشباع چوب با مواد پلیمری باعث بالا رفتن احتمال آتش‌گیری در آنها می‌گردد. هنگامی که از ترکیبی از نانو و لاستونیت و مواد پلیمری در اشباع چوب استفاده شود، از سوختن نانو و لاستونیت یک لایه زغال تشکیل می‌شود که روی لایه‌های زیری را می‌پوشاند و با توجه به کندسوز بودن آن مانند یک لایه حفاظتی و ضد حریق برای لایه‌های زیری

حفره‌های سلولی چوب تیمار شده با نانو ولاستونیت خالی باقی می‌ماند. افزایش کم وزن نمونه اشباع شده با نانو ولاستونیت و همچنین ماندگاری کم نانو ولاستونیت در چوب در مقایسه با سایر تیمارها (جدول ۱) دلیل محکمی برای این امر می‌باشد؛ اما وجود پلیمر در حفره باعث پوشش دیواره می‌شود و ضخامت آن را زیاد می‌کند؛ به همین دلیل موجب ثبات ابعاد و استحکام جانبی آن می‌شود (Siau *et al.*, 1968). افزودن پلیمر روی دیواره سلولی آن را ضخیم‌تر می‌سازد و تا حد زیادی ثبات جانبی آن را تحت فشار موازی الیاف افزایش می‌دهد (Rozman *et al.*, 1998). این اثر مهارکنندگی ممکن است به علت اثر متقابل بین اتصال‌دهنده عرضی در استایرن با گروه‌های چوب افزایش یابد. از آنجاکه این ویژگی رابطه مستقیمی با وزن مخصوص دارد، می‌توان پیش‌بینی کرد که چوب پلیمر با وزن مخصوص بالاتر قابلیت بالایی در عرضه محصولاتی با مقاومت فشاری بهتر دارد. در واقع، تشکیل پلیمر داخل چوب، نسبت فضای خالی آن را کاهش و مقدار نیروی لازم را برای تغییر شکل چوب پلیمر افزایش می‌دهد (Saiful *et al.*, 2012). اثر افزایشی مقاومت فشاری در چوب پلیمر، بیش از مقاومت‌های کششی و خمشی است، زیرا پلیمر در حفره‌های سلولی موجب نگه‌داری و استحکام دیواره سلولی و مقاومت آن در برابر کمانش ناشی از فشار می‌شود (Omidvar, 2009). چوب تیمار نشده به علت داشتن دیواره نازک و خالی بودن حفره سلولی، در مقابل فشار موازی الیاف دچار لهیدگی می‌شود.

#### مدول گسیختگی

مدول گسیختگی به‌دست آمده از این تحقیق برای تیمارهای NW+St و NW/St به ترتیب افزایش ۳۲/۴۴ و ۳۵/۷۱ درصدی را نسبت به نمونه شاهد نشان داد و تقریباً با مدول گسیختگی تیمار استایرن مساوی بود. نتایج حاصل با نتایج تحقیقات Ghorbani و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت داشت. طبق تحقیقات آنان، مقدار مدول گسیختگی در نمونه‌های تیمار مونومر استایرن با غلظت ۱۰۰ درصد، ۴۷/۲۲ درصد افزایش یافت. مدول خمشی نشان‌دهنده

پیدا کرد. همچنین نتایج نشان داد که زمان آتش‌گیری چوب پلیمر ساخته شده با مخلوط نانو ولاستونیت و استایرن (NW/St) در مقایسه با نمونه شاهد ۲۵ درصد افزایش داشت. در واقع وقتی ذرات نانو ولاستونیت در داخل چوب قرار می‌گیرند، این ذرات در داخل چوب توزیع شده و مسیرهای نفوذ اکسیژن را کاهش می‌دهند، در نتیجه زمان آتش‌گیری به تعویق می‌افتد. این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیق Tzakor-Rezaie و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. آنان در تحقیقی تأثیر نانو ولاستونیت را بر روی زمان آتش‌گیری چندسازه آرد چوب و پلی‌پروپیلن انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که در چندسازه حاوی ۵٪ نانو ولاستونیت، زمان آتش‌گیری ۱۸/۸٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا می‌کند.

#### دوام شعله

نتایج به‌دست آمده نشان داد که دوام شعله تیمار NW/St تقریباً مشابه با تیمار NW بود و در واقع نسبت به نمونه شاهد ۳۰ درصد بهبود نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین دوام شعله مربوط به تیمار St و کمترین آن مربوط به نمونه تیمار شده با نانو ولاستونیت (NW) بود. کاهش مدت زمان دوام شعله می‌تواند به همان دلایلی باشد که در رابطه با افزایش زمان آتش‌گیری و افزایش مقاومت به آتش توضیح داده شد. نتایج به‌دست آمده با یافته‌های Tzakor-Rezaie و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. آنان در تحقیق خود نشان دادند که در چندسازه چوب و پلی‌پروپیلن حاوی ۵ درصد نانو ولاستونیت، دوام شعله نسبت به نمونه شاهد ۲۲/۸ درصد بهبود می‌یابد.

#### مقاومت به فشار موازی بر الیاف

در این تحقیق، نانو ولاستونیت نفوذ کافی به داخل بافت چوب نداشت، بنابراین منافذ و حفره‌های سلولی خالی بود. در نتیجه، مقاومت فشاری چوب تیمار شده با نانو ولاستونیت تفاوت چندانی با نمونه شاهد نداشت. از آنجایی که نانو ولاستونیت به مقدار کافی به داخل بافت چوب نفوذ نمی‌کند،

ویسکوزیته بالاتر و هم‌کشیدگی کمتر اثر محسوس‌تری بر سختی دارد. علاوه بر این، از آنجاکه در سطوح یکسان غلظت مونومر، مقدار جذب پلیمر استایرن بیش از متیل متاکریلات بوده است، بنابراین بر بهبود سختی مؤثرتر عمل کرده است. سختی چوب، ارتباط معکوس با رطوبت و رابطه مستقیم با جرم ویژه و جهت الیاف دارد. نوع پلیمر، اتصال‌دهنده‌های عرضی، میزان جذب، روش و میزان پلیمریزاسیون روی سختی پلیمر تأثیر می‌گذارد. میزان جذب نیز بستگی به نوع چوب، دانسیته و خلل و فرج چوب دارد (Ibach et al., 2005). فرایند جذب تحت تأثیر روش اشباع و ویژگی‌های مونومر مانند ویسکوزیته، نقطه جوش (به علت تبخیر طی فرایند پلیمرشدن)، قطبیت و وزن مولکولی است (Ellis, 2000). همچنین سختی پلیمر به درجه پلیمریزاسیون و مقدار مونومر باقیمانده بستگی دارد (Schneider et al., 1990).

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر اشباع چوب با مخلوط نانو ولاستونیت و استایرن بر خواص مکانیکی و مقاومت به آتش چوب پلیمر صنوبر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که تیمار دو مرحله‌ای (NW+ST) و یک مرحله‌ای (NW/ST) هر دو در آزمون کاهش وزن در مقابل آتش و سطح کربونیزه عملکرد خوبی داشتند و کاهش وزن آنها در مقایسه با نمونه شاهد به ترتیب برابر ۶۱/۳۸ و ۶۹/۶۸ درصد و کاهش سطح کربونیزه آنها در مقایسه با نمونه شاهد به ترتیب برابر ۲۸/۵۳ و ۲۹/۰۶ درصد می‌باشد. نمونه‌های تیمار شده با تیمار NW/ST در آزمون‌های زمان آتش‌گیری و دوام شعله عملکرد بهتری داشتند و به ترتیب افزایش ۲۵ درصدی را در زمان آتش‌گیری و کاهش ۳۰ درصدی در دوام شعله نسبت به نمونه شاهد نشان دادند.

نتایج آزمون‌های مکانیکی نیز نشان داد که نمونه‌های تیمار شده با تیمار یک مرحله‌ای NW/ST بهترین عملکرد را داشته و مقاومت به فشار موازی الیاف، مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی و مقاومت به سختی آنها به ترتیب ۵۷/۴۱

نیروی لازم برای خم کردن نمونه است، بنابراین اجسام دارای سفتی بیشتر مدول خمشی زیادتری دارند (Mehrabzadeh et al., 2009). وجود پلیمر در چوب سفتی دیواره نازک سلولی را برای جلوگیری از کم‌انرژی تحت فشار بار به اندازه کافی بالا می‌برد که این امر به افزایش نسبتاً بالا در مقاومت‌های خمشی فرآورده‌های چوب پلیمر منتهی می‌شود (Schneider et al., 1990; Siau et al., 1968).

البته افزایش دانسیته نیز منجر به بهبود مدول گسیختگی می‌شود (Yalinkilic et al., 1998)، ولی با توجه به نتایج تحقیق Ghorbani و همکاران (۲۰۱۵)، اثر مونومر متیل متاکریلات بر مقاومت‌های خمشی، حتی در سطوح غلظت مونومر یکسان بهتر از مونومر استایرن است. آنان نتیجه گرفتند که با وجود افزایش دانسیته بیشتر متعاقب جذب استایرن، فاکتور غالب در اثر پلیمر بر این مقاومت توزیع یکنواخت پلیمر داخل ساختار چوب است و مونومر متیل متاکریلات با ماهیت قطبی‌تر در مقایسه با استایرن (به دلیل داشتن گروه‌های هیدروکسیل) قدرت نفوذ بیشتری به داخل ساختار چوب دارد و این توزیع بیشتر و یکنواخت‌تر به اثر مثبت محسوس‌تر بر مقاومت‌های خمشی منتهی می‌شود. وجود پلیمر در حفره سلولی موجب استحکام دیواره نازک سلولی می‌شود و از کم‌انرژی دیواره زیر بار فشار جلوگیری می‌کند. این موضوع احتمالاً علت افزایش مقاومت خمشی چوب پلیمرهاست (Schneider et al., 1990; Siau et al., 1968).

#### مقاومت به سختی

در این تحقیق، بیشترین مقدار مقاومت به سختی مربوط به تیمار تک مرحله‌ای (NW/St) بود، به طوری که نسبت به نمونه شاهد ۱۰۷/۰۹ درصد افزایش داشت. نتایج مقاومت به سختی به دست آمده در این تحقیق برای نمونه‌های چوب پلیمر با تحقیقات Ghorbani و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد. آنان در تحقیق خود نشان دادند که سختی نمونه‌ها در سطح ۱۰۰ درصد، ۳۶/۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. آنان همچنین نشان دادند که استایرن با نقطه جوش و

2011. Wood-Polymer Composites Prepared by In-situ Polymerization of Monomers within Wood. *Journal of Applied Polymer Science*, 119(6): 3207–3216.
- Li, Y., Meng, X., Li, J. and Liu, Y., 2010. Performance of Wood-Polymer Composite Prepared by In-situ Polymerization of Styrene, *Applied Mechanics and Materials* Vols. 26-28: 181-185, Trans Tech Publications, Switzerland.
- Mehrabzadeh, M. and Kamal, M. R., 2009. Effects of Different Types of Clays and Maleic Anhydride Modified Polystyrene on Polystyrene/Clay Nanocomposites. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 22(2): 151-157.
- Meyer, J., 1981. Wood-Polymer Materials: State of the Art. *Wood Science*, 14 (2): 49- 54
- Modaberi, A., Adeli, K. and Soosani, J., 2014. Evaluating Populus Nigra Absolute Age of Exploitation with Different Planting Distances in the Central Zagros. *Philippine Scientist Journal*, 52(1): 56–61.
- Omidvar, A., 2009. Wood-Polymer Composite. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, 127pp.
- Rangavar, H., Khojasteh Khosro, S. and Taghipour Javy, M., 2018. The Effect of Nano Wollastonite on the Fire Resistance and the Adhesion Properties of Water Based Acrylic Coating on Wood Surface. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 33 (2): 166-178 (In Persian).
- Razi, P. and Raman, A., 2000. Studies on Impact Fracture Properties of Wood-Polymer Composites, *Journal of Composite Materials*, 34 (12): 980-997.
- Rozman, H.D., Kumar, R.N., Abusamah, A. and Saad, M.J., 1998. Rubber Wood-Polymer Composites Based on Glycidyl Methacrylate and Diallylphthalate. *Journal of Applied Polymer Science*, 67: 1221-1226.
- Saiful Islama, Md., Sinin Hamdana, Jusohb, I. Rezaur Rahmana, Md. and Saleh Ahmed., Abu., 2012. The Effect of Alkali Pretreatment on Mechanical and Morphological Properties of Tropical Wood Polymer Composites, *Materials and Design*, 33: 419–424.
- Schaudy, R. and Proksch, E., 1982. Wood-Plastic Combinations with High Dimensional Stability. *Industrial and Engineering Chemistry Research and Development*, 21 (3): 369-375.
- Schneider, M.H., Phillips, J.G., Tingley, D.A. and Brebner, K.I., 1990. Mechanical Properties of Polymer-impregnated Sugar Maple. *Forest Products Journal*, 40(1): 37–41.
- Siau, J.F., 1969. The Swelling of Bass Wood Vinyl Monomers. *Journal of Wood Science*, 1(4): 250-253.
- Siau, J.F., Davidson, R.W., Meyer, J.A. and Skaar, C. ۲۶/۷۷، ۳۵/۷۱ و ۱۰۷/۰۹ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است.
- سپاسگزاری  
در پایان، نویسندگان از مسئولان محترم دانشگاه تهران به دلیل حمایت مالی و امکانات آزمایشگاهی برای انجام هرچه بهتر این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌نمایند.
- منابع مورد استفاده
- Deka, M. and Saikia, C., 2000. Chemical Modification of Wood with Thermosetting Resin: Effect on Dimensional Stability and Strength Property. *Bioresource Technology*, 73 (2): 179-181.
- Din, R., 1989. Wood Polymer Composites: Their Properties and Applications. Ms. Thesis. Univeristy of Wales, Bangor. 60-63.
- Ellis, W., 2000. Wood-Polymer Composites: Review of Processes and Properties. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 353: 75-84.
- Ghorbani kookandeh, M., Kaki, R. and 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.
- Haghighi, A., Taghiyari, H.R. and Karimi, A.N., 2013. Study on Fire-Retardant Properties of Nano-Wollastonite in Fir Wood (*Abies alba*). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 28 (2): 298-265 (In Persian).
- Haque, N., 1997. A Literature Review of Research into Wood-Plastic Composites. Ms. Thesis. University of Wales, Bangor. 1-11.
- Hassanpoortichi, A., Bazyar, B., Khademieslam, H., Rangavar, H. and Talaeipour, M., 2016. The Effect of Nano-Wollastonite on Biological, Mechanical, Physical, and Microstructural Properties of the Composite Made of Wood-Cement Fiber. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 8: 1466–1479.
- Ibach, R. and Ellis, W., 2005. Lumen Modifications, *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, Boca Raton, Fla.: CRC Press, pages 421-446.
- Li, Y., Liu, Y., Haipeng, YU. and Qingfeng, S., 2009. Property Improvement of Wood Polymer Composites with Glycidyl Methacrylate, Key Laboratory of Bio-based Material Science and Technology of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China.
- Li, Y., Liu, Y., Wang, X., Wu, Q., Yu, H. and Li, J.,

- and Fire Resistance of Wood Flour/Polypropylene Composite. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 31(3):425-43 (In Persian).
- Yalinkilic, M.K., Tsunoda, K., -Takahashi, M., Gezer, E.D., Dwianto, W. and Nemoto, H., 1998. Enhancement of Biological and Physical Properties of Wood by Boric Acid-Vinyl Monomer Combination Treatment. Holzforshung, 52 (6): 667-672.
- Zabel, R.A. and Morrell, J.J. 1992. Wood Microbiology: Decay and Its Prevention. Academic Press. 476 pp
1968. A geometrical Model for Wood-Polymer Composites. Wood Science and Technology, 1(2): 116-128.
- Stolf, D.O. and Roco Lahr., F.A., 2004. Wood- polymer Composites: Physical and Mechanical Properties of Some Wood Species Impregnated with Styrene and Methyl Methacrylate. Materials Research, 7(4): 611-617.
- Taghiyari H.T., 2012. Fire-Retarding Properties of Nano-Silver in Solid Woods. Wood Science and Technology; 46(5): 939 – 952.
- Tzakor-Rezaie, V., Najafi A. and Sinaie, A., 2016. The Effect of Nano-Wollastonite on Bending Properties

## Fire resistance and mechanical properties of nano-wollastonite/styrene-treated poplar wood

S. Izadyar<sup>1\*</sup>, R. Hamzezadeh<sup>2</sup> and D. Efhami sisi<sup>3</sup>

1\*-Corresponding author, Assistant Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Iran, Email: sizadyar@ut.ac.ir

2-M.Sc., student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Iran

3-Assistant Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Iran

Received: Jan., 2020

Accepted: March, 2020

### Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of poplar wood impregnation with nano-wollastonite and nano-wollastonite-styrene mixture on fire resistance and mechanical properties of wood/polymer. *Populus deltoids* wood samples were saturated using 4% nano-wollastonite and 75% methanolic solution of styrene monomer by vacuum-pressure method. Four different wood treatments with nano-wollastonite, styrene, mixture of 1:1 ratio of nano-wollastonite and styrene (one-step) and finally, the initial wood impregnation by nano-wollastonite and then styrene (two-stage treatment) were investigated. In this study, the fire resistance and mechanical properties of the specimens were measured. The results showed that the weight loss of wood against fire in two-stage treatment (NW+St) was 61.38% and in one-stage treatment (NW/St) was 69.68% lower than control. NW/St treatment flame durability was approximately equal to NW treatment and improved by 30% compared to control. The reduction of carbonized area in two-stage (NW+St) and one-stage (NW/St) treatments was 28.53% and 29.06%, respectively, which showed a significant decrease. The results of mechanical tests showed that the NW/St treatment had the highest value due to the presence of condensing material in parallel to the NW/St treatment which showed an increase of 57.41% compared to the control sample. The modulus of elasticity and disruption of NW/St treatment increased by 26.77% and 35.71%, respectively. In addition, resistance to hardness of NW/St treatment increased by 10.07% compared to control. Overall, it can be concluded that mixing nano-wollastonite with styrene, while increasing the polymer wood fire resistance, also improved the mechanical properties of the polymer wood.

**Keywords:** Nano wollastonite, wood-polymer, fire resistance, poplar, mechanical properties.