

بررسی مقاومت به پوسیدگی و ثبات ابعاد چوب صنوبر تیمار شده با ترکیب استایرن/نانو ولاستونیت

چکیده

چوب بسپارهای ساخته شده با تک‌پارهای وینیل (مانند استایرن) به دلیل عدم نفوذ به دیواره‌های سلولی، مقاومت به پوسیدگی کمی داشته و نیاز به تیمار حمایتی دارند. در این مطالعه مقاومت به پوسیدگی و ثبات ابعاد چوب صنوبر (*Populus deltoides*) تیمار شده با استایرن و نانو ولاستونیت مورد بررسی قرار گرفت. از روش خلاء- فشار برای اشباع نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌های چوبی با چهار تیمار مختلف شامل نانو ولاستونیت ۴ درصد، استایرن ۷۵ درصد، نانو ولاستونیت (۴ درصد) و سپس استایرن ۷۵ درصد (تیمار دو مرحله‌ای) و همچنین مخلوط نانو ولاستونیت/استایرن (تیمار تک مرحله‌ای) اشباع شدند. اشباع چوب با تک‌پار استایرن باعث افزایش وزن قابل توجه نمونه‌ها شد (بیش از ۵۰ درصد)، درحالی‌که مقدار افزایش وزن در تیمار با نانو ولاستونیت حدود ۱ درصد بود. واکنشیدگی حجمی و مقادیر جذب آب نمونه‌های تیمار شده با نانو ولاستونیت نسبت به نمونه شاهد کمتر بود. بیشترین کاهش در مقادیر جذب آب و واکنشیدگی حجمی در چوب بسپارهای استایرنی دیده شد. افزودن نانو ولاستونیت به استایرن اثر معنی‌داری بر روی این ویژگی‌ها نداشت. مقاومت به پوسیدگی سفید نمونه‌های تیمار شده با نانو ولاستونیت و استایرن افزایش معنی‌داری داشت. اما پس از آشنوبی دوام نمونه‌های تیمار شده با نانو ولاستونیت از دست رفت و کم‌وبیش همانند نتایج تیمار شاهد بود. افزودن ولاستونیت باعث افزایش معنی‌دار مقاومت به پوسیدگی چوب پلیمر استایرنی حتی پس از آشنوبی شد، اما مقادیر کاهش وزن نمونه‌ها کماکان قابل توجه بود. براساس نتایج این تحقیق استفاده از مواد دوست‌دار محیط زیست برای افزایش مقاومت به پوسیدگی چوب بسپارهای استایرنی توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: نانو ولاستونیت، استایرن، چوب صنوبر، مقاومت به پوسیدگی، آشنوبی، ثبات ابعاد.

سهیلا ایزدیار^۱
رقیه همزه زاده^۲
داود افهامی سیسی^{۳*}
علی نقی کریمی^۴

^۱ استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳ استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۴ استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:
efhami@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۲۹

مقدمه

یکی از روش‌های اصلاح چوب، اشباع آن با انواع تک-پارها (مونومرها) و تبدیل آنها به بسپار در داخل چوب به-

منظور تولید یک محصول جدید به نام چوب بسپار (چوب-پلیمر) است. تک‌پارهای وینیل از قبیل استایرن، ایزوسیانات و متیل متاکریلات از مهمترین ترکیباتی هستند که تاکنون در ساخت چوب بسپارها مورد استفاده

قرار می‌گیرد، ولی در حال حاضر در صنایع تولید مواد ساینده، فلزکاری، پرکننده رنگ‌ها، پلاستیک، تقویت بتن، ساخت استخوان و ریشه دندان مصنوعی کاربرد دارد [۱۰]. در ایران نیز تحقیقات زیادی برای تقویت بتن با استفاده از کانی ولاستونیت انجام شده است. اما در سال-های اخیر چند شرکت و شخص حقوقی اقدام به ساخت نانو ولاستونیت در داخل کشور نموده‌اند که تقویت بتن با آنها نسبت به ذرات در مقیاس میکرو نتایج بهتری داشته است [۱۱]. Efhamsisi و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که نانو ولاستونیت باعث افزایش مقاومت به پوسیدگی چوب می‌شود، اما به شدت دچار آبشویی شده و نمی‌تواند برای صنعت اشباع چوب در کاربردهای بیرون از ساختمان مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ایشان اعلام کردند که مقادیر گزارش شده برای جذب نانو ولاستونیت در چوب بسیار کمتر از مقدار واقعی آن بوده و اغلب نانو ماده جذب شده در سطح چوب باقی می‌ماند [۱۲].

هدف از این مطالعه اشباع چوب با ترکیب تک‌پار استایرن و نانو ولاستونیت به منظور بهبود عملکرد فیزیکی و دوام زیستی چوب‌بسیار ساخته شده با این روش بود. دو فرضیه اصلی برای ترکیب استایرن با نانو ولاستونیت وجود داشت: ۱- نانو ولاستونیت قابلیت بهبود مقاومت به پوسیدگی چوب پلیمر حفره‌ای ساخته شده با استایرن را خواهد داشت، ۲- بسیار استایرن تشکیل شده در ساختار چوب باعث جلوگیری از آبشویی ولاستونیت می‌شود.

مواد و روش‌ها

مواد استفاده شده

نمونه‌های آزمونی از چوب درختان صنوبر (*Populus deltoides*) واقع در جنگل خیرودکنار- شهرستان نوشهر تهیه شد. سه درخت با قطر برابر سینه 40 ± 5 سانتی‌متر و ۲۳ سال سن قطع و گرده‌بینه مربوط به ۲ متر اول هر درخت برای برش و تهیه الوار به آزمایشگاه انتقال یافت. از چوب راش نیز طبق استاندارد (۱۹۹۶) EN 113 به‌عنوان نمونه شاهد و جهت بررسی میزان حادپذیری واریته قارچ، استفاده شد [۱۳]. همه نمونه‌ها از بخش نزدیک پوست (برون چوب) تهیه شدند. تخته‌های تهیه شده با ابعاد اسمی (ضخامت) $4 \times$ (پهنای) 20 سانتی‌متر و به طول 2

قرار گرفته‌اند [۱]. بسیاری از معایب ذاتی چوب با استفاده از فناوری ساخت چوب بسیار، قابل برطرف شدن است. چوب‌بسیارها دارای مقاومت‌های مکانیکی بالاتر و ثبات ابعاد بیشتر بوده و دوام آنها نیز در برابر حمله عوامل زنده مخرب چوب (قارچ و حشرات) زیادتر از چوب معمولی است. تحقیقات نشان داده است چوب بسیار ساخته شده با تک‌پارهای وینیل اگرچه دارای مقاومت به پوسیدگی بهتری نسبت به چوب تیمار نشده است، اما مقادیر کاهش وزن بر اثر حمله قارچ‌ها همچنان زیاد است [۲-۵]. در واقع تک‌پارهای وینیل با گروه‌های عاملی موجود بر روی دیواره‌های سلولی واکنش نداده و تنها داخل حفرات سلول‌ها را پر می‌کند، بنابراین دیواره‌های سلولی در مقابل حمله قارچ‌ها بی‌دفاع می‌مانند [۵].

اخیراً تحقیقات زیادی به‌منظور بهبود ویژگی چوب-بسیارهای حفره‌ای از طریق تیمارهای ترکیبی (تک مرحله‌ای) و یا مضاعف (دو مرحله‌ای) با مواد مکمل حفاظتی انجام شده است. Yalinkilic و همکاران (۱۹۹۹) برون‌چوب کاج را به طور اولیه با اسید بوریک ۱ درصد اشباع نموده و سپس نمونه‌ها را با انواع تک‌پارهای وینیل تیمار کردند [۶]. نتایج نشان داد، استفاده از این روش نه تنها مقاومت به پوسیدگی چوب را افزایش می‌دهد، بلکه از آبشویی بورون نیز کاسته می‌شود. Dong و همکاران (۲۰۱۶) نیز مقاومت به پوسیدگی چوب پلیمر ساخته شده از گلیسیدیل متاکریلات و پلی‌اتیلن گلیکول را با استفاده از ترکیب با نانو اکسید روی بهبود بخشیدند [۷]. ایشان نمونه‌های چوبی را به طور ترکیبی با نانو ماده و تک‌پار اشباع کردند. همچنین در تحقیق دیگری افزایش مقاومت به پوسیدگی چوب پلیمر استایرنی با استفاده از نانو اکسید روی مطالعه شده است [۴].

نانو فناوری دروازه جدیدی را به روی صنعت حفاظت چوب گشوده است [۸]. در کشور ما نیز تحقیقاتی زیادی به‌منظور استفاده از نانو مواد در صنعت اشباع چوب انجام گرفته است. یکی از این مواد که اخیراً معرفی و مورد استفاده قرار گرفته است نانو ولاستونیت می‌باشد. ولاستونیت در حالت خالص خود از $48/28\%$ آهک و $51/72\%$ اکسید سیلیس تشکیل یافته است [۹]. ولاستونیت به طور اولیه در صنعت سرامیک مورد استفاده

فرآیند اشباع و شرح تیمارها

اشباع نمونه‌های چوبی با روش سلول پر انجام شد. ابتدا خلاء مقدماتی به میزان ۰/۷ بار به مدت ۲۰ دقیقه روی نمونه‌ها اعمال و سپس محلول حفاظتی با کمک خلاء مقدماتی به داخل سیلندر تزریق شد. پس از آن فشار ثابت ۴ بار به مدت ۲ ساعت اعمال شد. در پایان نیز پس از خروج ماده حفاظتی، خلاء نهایی به میزان ۰/۴ بار و به مدت ۱۰ دقیقه برای پاک‌سازی سطح نمونه‌ها انجام شد. در جدول ۱ شرح تیمارهای مختلف و کدهای مربوط به آنها آمده است.

در تیمار نانو ولاستونیت ۴ درصد (درصد وزنی) جهت یکنواخت‌سازی محلول از همزن مکانیکی با دور بالا استفاده شد. نمونه‌ها پس از اشباع به مدت ۲ هفته در اتاق کلیما (رطوبت نسبی ۶۵٪ و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) مشروط سازی شدند. سپس به آن با دمای 2 ± 10.3 درجه سانتی‌گراد انتقال داده شده و تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند.

متر پس از خشک شدن در هوای آزاد برای نمونه‌گیری استفاده شدند. نمونه‌ها پس از برش در داخل آون با دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شده و پس از آن حجم (V_0) و وزن خشک آون (m_0) آنها اندازه‌گیری شد.

مواد شیمیایی

تک‌پار استایرن از شرکت پتروشیمی صنایع ملی تهیه شد. بنزوئیل پروکساید به عنوان آغازگر واکنش و اتیلن گلیکول دی‌متاکریلات به عنوان اتصال‌دهنده عرضی از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. جهت رقیق‌سازی استایرن از اتانول استفاده شد که ساخت شرکت پتروشیمی صنایع ملی ایران بود. نانو ولاستونیت از شرکت تولیدات معدنی و صنعتی ورد خریداری شد که به صورت سوسپانسیون آبی با غلظت ۱۱ درصد بود. ابعاد نانو ولاستونیت این شرکت ۷۰-۱۰۰ نانومتر است [۱۲].

جدول ۱- شرح تیمارها و کدهای مربوط به آنها

کد مربوطه	شرح تیمار	ردیف
شاهد	تیمار شاهد	۱
NW	نانو ولاستونیت ۴ درصد	۲
St	استایرن اتانولی ۷۵ درصد (درصد وزنی)	۳
NW+St	تیمار دو مرحله‌ای با نانو ولاستونیت ۴ درصد و استایرن ۷۵ درصد	۴
NW/St	تیمار با ترکیب استایرن ۷۵ درصد و نانو ولاستونیت ۴ درصد	۵

اندازه‌گیری مقادیر جذب

پس از هر مرحله اشباع، درصد افزایش وزن (WPG)^۱ نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. اندازه‌گیری WPG بر روی نمونه‌هایی با ابعاد (مماسی×شعاعی×طولی) $15 \times 25 \times 50$ میلی‌متر انجام شد.

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

که در آن M_0 وزن خشک نمونه قبل از اشباع (g)، M_1 وزن خشک نمونه بعد از اشباع (g) است.

تیمار استایرن با محلول اتانولی ۷۵ درصد (درصد وزنی) انجام شد. همچنین بنزوئیل پروکساید به عنوان آغازگر واکنش‌های بسپارش به میزان ۰/۵ درصد وزنی تک‌پار و اتیلن گلیکول دی‌متاکریلات نیز برای ایجاد اتصال عرضی با چوب به میزان ۱/۵ درصد وزنی تک‌پار اضافه شد. بعد از اشباع، نمونه‌ها داخل فویل آلومینیومی پیچیده شده و به مدت ۸ ساعت در آون با دمای 5 ± 80 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا عمل بسپارش انجام شود. سپس نمونه‌ها از فویل خارج شده و در آون با دمای 2 ± 103 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا وزن خشک پس از اشباع اندازه‌گیری شود. در تیمار دو مرحله‌ای از روش یکسان برای اشباع نمونه‌ها استفاده شد.

^۱Weight Percentage Gain

آزمون‌های فیزیکی

ویژگی‌های فیزیکی شامل جذب آب و واکشیدگی ابعاد با استفاده از استاندارد اصلاح شده (۲۰۱۴) - ISO 13061-14 و با نمونه‌هایی در ابعاد (مماسی×شعاعی×طولی) ۲۰×۲۰×۳۰ میلی‌متر با ۱۰ تکرار برای هر تیمار انجام شد [۱۴]. پس از اندازه‌گیری وزن و ابعاد خشک، نمونه‌ها در داخل آب مقطر با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شده و در فواصل زمانی ۴، ۶، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعت از آب خارج و ابعاد و وزن آنها اندازه‌گیری شد. درصد جذب آب (WA) و درصد واکشیدگی ابعاد (S) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۲ و ۳ اندازه‌گیری شد.

$$WA\% = \left(\frac{M_t - M_1}{M_1} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

$$S\% = \left(\frac{V_t - V_1}{V_1} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن M_1 وزن خشک نمونه قبل از غوطه‌وری و M_t وزن تر بعد از هر مرحله غوطه‌وری در آب است. V_1 نیز حجم خشک اولیه نمونه‌ها قبل از غوطه‌وری در آب (mm^3) و V_t حجم نمونه‌ها پس از هر مرحله غوطه‌وری (mm^3) است.

آزمون مقاومت به پوسیدگی

آزمون کشت قارچ بر اساس استاندارد (۱۹۹۶) 113 EN انجام شد [۱۳]. برای هر تیمار ۶ نمونه با ابعاد mm^3 ۱۵×۲۵×۵۰ استفاده شد. قارچ رنگین‌کمان که مولد پوسیدگی سفید (*Trametes versicolor*) است و محیط کشت مالت-آگار برای انجام آزمون انتخاب شدند. درب ظروف کشت دارای سوراخی بود که با استفاده از پنبه پوشانده شده بود تا امکان تبادل هوا با محیط بیرون بدون آلوده شدن محیط کشت فراهم شود. پس از تلقیح، ظروف کشت تا رشد کامل قارچ و پوشیده شدن سطح محیط کشت در داخل انکوباتور با دمای 22 ± 2 درجه سانتی-گراد و رطوبت نسبی 75 ± 5 درصد قرار گرفتند. در داخل هر ظرف کشت، یک نمونه شاهد (نمونه پایه) و یک نمونه تیمار شده قرار گرفت. آزمون‌های شاهد نیز بر روی شش

نمونه تیمار نشده صنوبر و همین‌طور آزمون حادپذیری^۱ نیز بر روی شش نمونه چوب ماسیو راش (*Fagus orientalis*) انجام شد. وزن خشک نمونه‌ها قبل از آزمون اندازه‌گیری شده بود (M_1). زمان آزمون پس از انتقال نمونه‌ها به داخل ظروف کشت ۱۶ هفته بود. در پایان آزمون، ابتدا سطح نمونه‌ها از میسیلیوم پاک‌سازی و وزن تر آنها یادداشت شد (M_2). سپس در دمای 2 ± 10.3 درجه سانتی‌گراد خشک شده و دوباره وزن شدند (M_3) و درصد رطوبت آنها (MC%) با استفاده از وزن خشک قبل و بعد از کشت قارچ، طبق رابطه ۴ محاسبه شد. همچنین درصد کاهش وزن نمونه‌ها (WL%) در اثر پوسیدگی قارچی نیز با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد.

$$MC\% = \left(\frac{M_2 - M_3}{M_3} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

$$WL\% = \left(\frac{M_2 - M_3}{M_2} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آنها M_2 وزن خیس بعد از آزمون قارچ (g) و M_3 وزن خشک بعد از آزمون قارچ (g) است.

آزمون آبشویی

به‌منظور بررسی ماندگاری ماده حفاظتی در چوب و مقاومت آن به آبشویی، از هر تیمار ۶ نمونه انتخاب شده و طبق استاندارد EN 84 تحت آبشویی قرار گرفت [۱۵]. نمونه‌ها در آب مقطر به مقدار ۵ برابر حجم نمونه‌ها غوطه‌ور و به مدت ۲۰ دقیقه تحت خلاء (۰/۴- بار) قرار گرفتند. بعد از اعمال خلاء، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت قبل از اولین تعویض در آب باقی ماندند. سپس، نمونه‌ها به مدت ۱۴ روز در آب غوطه‌ور شده و ۹ مرتبه دیگر تعویض آب انجام شد. سپس نمونه‌ها به مدت دو هفته در محیط مشروط‌سازی قرار گرفته و در نهایت وزن خشک آنها پس از قرارگیری در آن اندازه‌گیری شد.

^۱ حداقل میزان کاهش وزن لازم برای تایید نتایج آزمون قارچ در نمونه چوب راش طبق استاندارد (۱۹۹۶) EN 113 باید ۲۰ درصد باشد.

نتایج و بحث

ویژگی های فیزیکی

-درصد افزایش وزن

میانگین درصد افزایش وزن نمونه‌ها در تیمارهای مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد نانو و لاستونیت مورد استفاده در این تحقیق بین ۱۰۰ - ۷۰ نانومتر بود. قطر آوندها در گونه صنوبر معمولاً بیش از ۵۰ میکرون است [۱۶] و یا قطر کلی منافذ بین آوندی در صنوبر ۵-۷ میکرون و اندازه حفرات ریز موجود در غشای منفذ حدود ۲۰۰ نانومتر است [۱۷]. بنابراین، از لحاظ ساختاری، نانو و لاستونیت به آسانی می‌تواند در بافت چوب صنوبر نفوذ کند. این در حالی است که نفوذ نانو و لاستونیت به داخل بافت چوب بسیار دشوار بوده و اغلب آن بر روی سطح چوب انباشته شده بود. Efhamsisi و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اشباع‌پذیری چوب با نانو و لاستونیت پرداخته و اعلام کردند که استفاده از آن در صنعت اشباع چوب خام به دلیل عدم نفوذ آن به بافت چوب مقدور نیست. اغلب نانو مواد هنگام نفوذ به داخل چوب کلوخه‌ای شده و عمق، پراکنش و میزان نفوذ آنها در بافت چوب به سختی صورت می‌گیرد. نتایج به دست آمده در مورد مقدار جذب نانو و لاستونیت در چوب با یافته‌های Soltani و همکاران (۲۰۱۶) [۱۸] و همچنین Efhamsisi و همکاران (۲۰۱۷) [۱۲] مطابقت داشت. این در حالی است که در برخی تحقیقات میزان جذب نانو و لاستونیت به دلیل عدم انتخاب معیارهای مناسب بسیار بیشتر از این مقادیر گزارش شده بود [۱۹]. مقادیر بارگذاری استایرن با تحقیقات دیگر در این رابطه هم‌خوانی داشت. میزان جذب استایرن در چوب و مقادیر WPG بستگی به مقدار غلظت محلول استایرن و اشباع‌پذیری چوب دارد. برای مثال Ermeydan و همکاران (۲۰۱۴) میزان WPG چوب نوئل اشباع شده با استایرن ۵۰ درصد را ۳۸/۸ درصد گزارش کردند [۲۰]. در تیمار دو مرحله‌ای (NW+St) مقدار WPG و ماندگاری مواد کمتر از سایر تیمارهای حاوی استایرن بود. جذب اولیه سطحی و لاستونیت

مسدود شدن منافذ چوب می‌تواند دلیل این موضوع باشد.

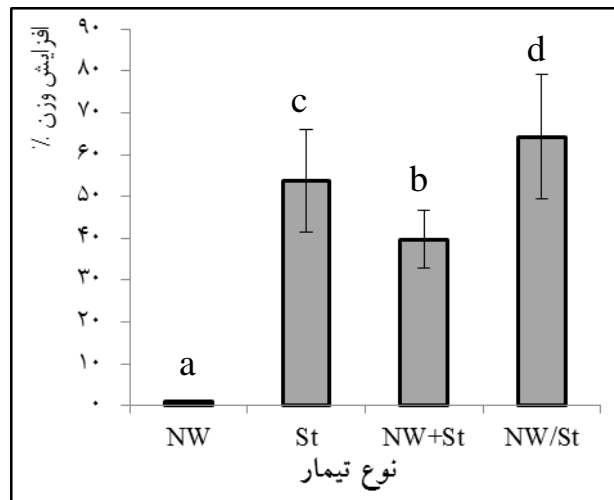
-جذب آب و واکنشیدگی حجمی

نتایج میزان جذب آب و واکنشیدگی حجمی نمونه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. مقادیر جذب آب نمونه‌های تیمار شده با نانو و لاستونیت در ساعت‌ها اولیه غوطه‌وری تفاوت چندانی با تیمار شاهد نداشت. پس از غوطه‌وری بلندمدت نمونه‌های تیمار شده با نانو و لاستونیت به طور معنی‌داری جذب آب کمتری داشتند. کمترین مقادیر جذب آب در نمونه‌های تیمار شده با استایرن دیده شد. جذب آب نمونه‌های تیمار شده با استایرن به طور قابل توجه‌ای نسبت به نمونه‌های شاهد یا تیمار شده با نانو و لاستونیت کمتر بود و با گذشت زمان غوطه‌وری تنها کمی افزایش یافت. آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مختلف حاوی استایرن نشان داد و در واقع استفاده از نانو و لاستونیت اثر چندانی بر روی جذب آب چوب پلیمرهای استایرنی نداشت. بر شدن حفرات سلولی با بسپار غیرقطبی و ممانعت از ورود آب دلیل جذب کمتر در چوب بسپارها است.

واکنشیدگی حجمی نمونه‌ها در ساعت‌های اولیه غوطه‌وری در آب زیاد بوده و در نهایت پس از ۴۸ ساعت روند خطی می‌یابد. واکنشیدگی حجمی مربوط به تیمارهای حاوی استایرن در حدود ۵۰ درصد کمتر از تیمار شاهد بود و آزمون دانکن همه آنها را در یک گروه قرار داد. با وجود WPG زیادی که در نمونه‌های تیمار شده با استایرن وجود داشت (بیش از ۵۰ درصد)، نسبت به روش‌های اصلاح دیواره‌ای مانند استیلاسیون (در WPG حدود ۲۰ درصد بیش از ۸۰ درصد کارایی ضدواکنشیدگی) مقادیر کاهش واکنشیدگی ابعاد چوب رضایت‌بخش نبود. دلیل این موضوع عدم واکنش و نفوذ تک‌پارهای غیرقطبی با دیواره‌های سلولی است [۱]. تیمار حاوی نانو و لاستونیت نسبت به تیمار شاهد دارای واکنشیدگی حجمی کمتری بود (۲۰ درصد کاهش). استفاده از نانو و لاستونیت اثر چندانی بر روی واکنشیدگی حجمی چوب بسپارهای استایرنی نداشت و آزمون دانکن همه آنها را در یک گروه قرار داد. Haghghi و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه مشابهی بر روی

کاهش حدود ۲۵ درصدی واکنشیدگی حجمی می‌شود [۱۹].

جذب آب و ثبات ابعاد چوب صنوبر اشباع شده با غلظت- های مختلفی از نانو ولاستونیت (۴، ۳/۶، ۱۰ و ۱۲ درصد) اعلام کردند که نانو ولاستونیت باعث افزایش جذب آب و

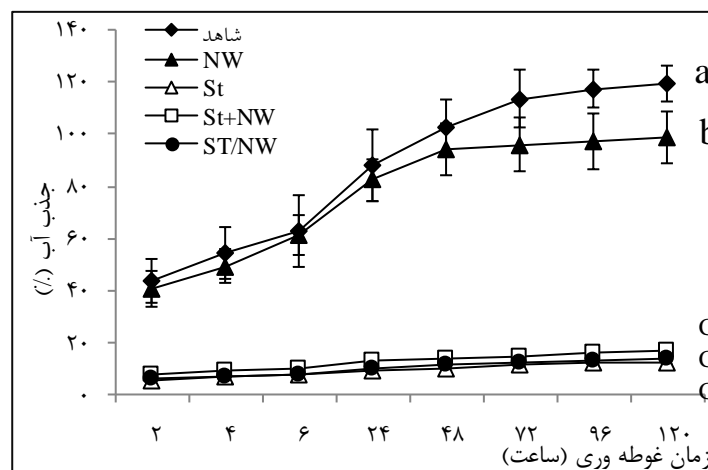


شکل ۱- درصد افزایش وزن نمونه‌ها در تیمارهای مختلف (حروف انگلیسی نشان‌دهنده گروه‌بندی دانکن است)

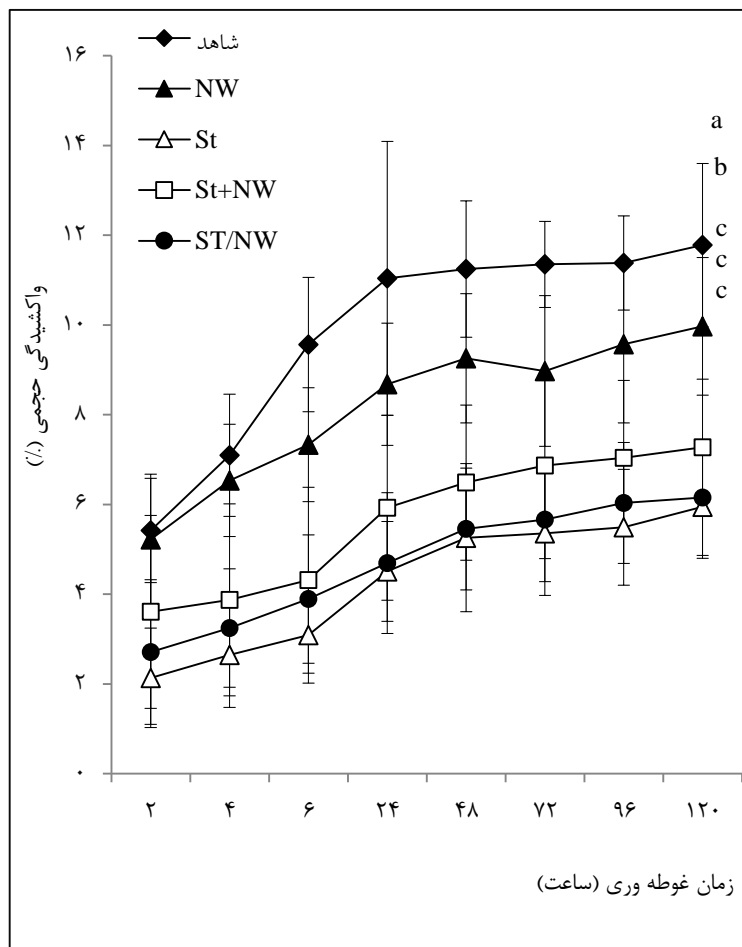
۳۴/۴۱ درصد بود. همچنین مقادیر کاهش وزن نمونه‌های شاهد موجود در هر ظرف (نمونه پایه) نیز نشان‌دهنده شرایط مناسب آزمون در این مطالعه بود. اثرگذاری نانو ولاستونیت در برابر پوسیدگی قارچی بعد از آبشویی از بین رفت. این نتایج با یافته‌های گزارش شده در تحقیق Efhamsisi و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی داشت [۹]. اگرچه در تحقیقات اولیه بر روی این نانو ماده عنوان شده بود این ماده اثرگذاری مناسبی دارد و حتی مورد آبشویی قرار نمی‌گیرد [۲۱].

مقاومت به پوسیدگی قارچی

مقادیر کاهش وزن نمونه‌ها در برابر قارچ مولد پوسیدگی سفید قبل و بعد از آزمون آبشویی در جدول ۲ خلاصه شده است. میانگین مقادیر کاهش وزن نمونه‌های حادپذیری چوب راش ۳۵/۹۵ درصد بود که بیشتر از حداقل کاهش وزن لازم (۲۰٪) برای تأیید نتایج آزمون قارچ بر اساس استاندارد EN 113 (۱۹۹۶) است. بنابراین درستی آزمون‌های قارچی انجام شده در این مطالعه تأیید شده و وارسته قارچ استفاده شده به اندازه کافی سالم و تهاجمی بود. میانگین کاهش وزن نمونه شاهد صنوبر



شکل ۲- میزان جذب آب نمونه‌ها در تیمارهای مختلف (حروف انگلیسی نشان‌دهنده گروه‌بندی دانکن است)



شکل ۳- میزان واکسیدگی حجمی نمونه‌ها در تیمارهای مختلف (حروف انگلیسی نشان‌دهنده گروه‌بندی دانکن است)

مقدار کاهش وزن نمونه‌ها بر اثر پوسیدگی قارچی نشد و مقادیر کاهش وزن نمونه‌ها کم و بیش مشابه حالت تیمار استایرن تنها بود. اما در تیمار تک مرحله‌ای وقتی نانو ولاستونیت در محلول حاوی استایرن مخلوط شده بود، نتایج بهتری به دست آمد و آبشویی نیز اثر معنی‌داری بر روی مقاومت به پوسیدگی نمونه‌ها نداشت. به نظر می‌رسد در تیمار تک مرحله‌ای مقدار نانو ولاستونیت جذب شده با کمک بسپار شکل یافته در چوب تا مقدار زیادی تثبیت شده است. از طرفی دیگر احتمالاً در تیمار تک مرحله‌ای، ولاستونیت جذب شده در سطح چوب با پلیمر استایرن تثبیت شده و اثرگذاری بیشتری دیده می‌شود. این در حالی است که در تیمار دو مرحله‌ای نانو مواد جذب شده در سطح نمونه‌ها شانس کمتری برای تثبیت دارند. به عنوان مثال مقدار زیادی از آنها حین فرآیند خشک کردن و اشباع ثانویه با تک‌پار استایرن از سطح چوب پاک می‌شوند. استفاده از نانو ولاستونیت اگرچه باعث بهبود

نتایج مربوط به چوب‌های تیمار شده با استایرن نشان داد که اگرچه این چوب‌ها دارای مقاومت به پوسیدگی بهتری نسبت به چوب تیمار نشده هستند، اما مقادیر کاهش وزن بر اثر حمله قارچ همچنان زیاد است. تک‌پار استایرن مانند سایر ترکیبات وینیل، معمولاً به داخل دیواره‌های سلولی وارد نشده و در نتیجه دیواره سلولی مستعد حمله عوامل زیستی باقی می‌ماند [۲-۴]. قارچ‌های پوسیدگی، چوب را بر اساس مکانیسم آنزیمی تخریب می‌کنند. این آنزیم‌ها به دیواره سلولی نفوذ می‌کنند و ترکیبات تشکیل دهنده دیواره سلولی را تجزیه می‌کنند. دلیل مقاومت به پوسیدگی نسبی چوب‌بسپارهای حفره‌ای وجود ماده پلیمری در داخل حفره‌های سلولی است [۱]. پر شدن گذرگاه‌های داخلی چوب باعث کند شدن حرکت آب و کاهش نم‌پذیری چوب می‌شود که به جلوگیری از رشد و گسترش قارچ می‌انجامد [۲۲]. تیمار دو مرحله‌ای نانو ولاستونیت و استایرن (NW+St) باعث تغییر زیادی در

مقاومت به حمله قارچی را به کمتر از ۳ درصد کاهش دهد.

نسبی مقاومت به پوسیدگی نمونه‌ها شد، اما اثر آن چندان قابل توجه نبود. طبق استاندارد EN 113 یک تیمار حفاظتی موثر باید مقدار کاهش وزن چوب بر اثر آزمون

جدول ۲ - مقادیر کاهش وزن و رطوبت نمونه‌ها پس از آزمون پوسیدگی

شرح تیمار	تیمارها	میانگین رطوبت در پایان آزمون %	کاهش وزن %	کاهش وزن نمونه‌های پایه %	نتایج آزمون دانکن
نمونه‌های حادپذیری چوب راش	-	۵۱/۹۱ (۳/۵۷)	۳۵/۵ (۴/۲۹)	-	-
نمونه‌های شاهد صنوبر	-	۵۳/۱۰ (۱۳/۸۹)	۳۴/۴۱ (۴/۹۴)	-	a
قبل از آبشویی	NW	۳۲/۱۹ (۳/۶۱)	۱۱/۷۳ (۱/۱۵)	۳۹/۳۷ (۳/۷۳)	bc
	St	۶۴/۰۹ (۱۷/۷۰)	۱۲/۵۲ (۱/۶۰)	۳۳/۱۳ (۷/۶۶)	b
	NW+St	۵۰/۷۳ (۶/۵۴)	۱۳/۷۰ (۱/۳۳)	۳۷/۵۱ (۲/۵۳)	b
	NW/ST	۵۸/۸۷ (۵/۶۵)	۸/۰۲ (۱/۸۱)	۳۴/۴۸ (۹/۰۲)	c
بعد از آبشویی	NW	۳۷/۳۱ (۲/۶)	۲۴/۱۶ (۱/۹۵)	۳۸/۶۳ (۵/۳۲)	a
	St	۵۳/۵۶ (۴/۳۴)	۱۴/۸۶ (۱/۵۸)	۳۷/۶۶ (۶/۶۹)	b
	NW+ST	۴۷/۴۹ (۶/۸۴)	۱۵/۱۳ (۱/۹۵)	۳۱/۲۵ (۳/۰۶)	b
	NW/ST	۵۲/۴۱ (۴/۲۲)	۹/۲۹ (۰/۸۵)	۳۹/۷۴ (۵/۵۳)	d

(اعداد داخل پرانتز معرف انحراف معیار و حروف انگلیسی نشان‌دهنده گروه‌بندی دانکن است)

نتیجه‌گیری

داده‌های درصد افزایش وزن نشان داد که نانو ولاستونیت به اندازه کافی به داخل بافت چوب نفوذ نمی‌کند، و در واقع چوب در مقابل آن به صورت فیلتر عمل می‌کند. کلوخه‌ای شدن و چسبیدن ذرات نانو ولاستونیت به یکدیگر می‌تواند دلیل اصلی این موضوع باشد. اثرگذاری نانو ولاستونیت بر روی جذب آب و واکنش‌دهی حجمی نمونه‌ها اگرچه به طور آماری معنی‌دار بود، اما اثر مثبت آن چندان قابل توجه و رضایت‌بخش نبود. مقاومت به پوسیدگی نمونه‌های تیمار شده با نانو ولاستونیت قبل از آبشویی به مقدار قابل توجهی نسبت به تیمار شاهد بهبود یافت، اما پس از آبشویی تفاوت چندان با نمونه شاهد نداشت. این نتایج نشان می‌دهد که نانو مواد جذب شده، طی آبشویی از چوب خارج شده است. کاهش وزن چوب-بسپار پلیمری در برابر پوسیدگی قارچی، با وجود بارگذاری زیاد پلیمر در داخل چوب (بیش از ۵۰ درصد)، کماکان قابل توجه بود. این موضوع نشان‌دهنده این حقیقت است

که چوب بسپارهای ساخته شده از تک‌پارهای حفره‌ای تا حد زیادی در مقابل پوسیدگی قارچی بی‌دفاع هستند. تیمار ترکیبی نانو ولاستونیت و استایرن به‌ویژه تیمار همزمان (NW/ST)، باعث بهبود نسبی مقاومت به پوسیدگی چوب‌بسپار استایرنی حتی پس از آبشویی شد. تیمار ترکیبی استایرن و نانو ولاستونیت قابلیت چندان در بهبود ثبات ابعاد و جذب آب چوب بسپار استایرنی را نداشت. اضافه نمودن نانو ولاستونیت به محلول استایرن باعث بهبود مقاومت به پوسیدگی چوب بسپار شد، اما کماکان از نظر استاندارد اروپایی EN 113 چوب‌بسپار ساخته شده با ترکیب استایرن و نانو ولاستونیت به عنوان یک تیمار موثر (با کاهش وزن کمتر از ۳ درصد) در نظر گرفته نمی‌شود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که حتی بارگذاری مقدار زیادی از بسپارهای حفره‌ای در داخل فضاهای متخلخل چوب قابلیت تضمین موثر مقاومت به پوسیدگی قارچی چوب را ندارد.

- [1] Hill, C.A.S., 2006. Wood Modification Chemical , Thermal and Other Processes. Wiley Press, 262 pages.
- [2] Li, Y., Liu, Y., Wang, X., Wu, Q., Yu, H. and Li, J., 2011. Wood-Polymer Composites Prepared by In-situ Polymerization of Monomers within Wood. Journal of Applied Polymer Science, 119(6): 3207–3216
- [3] Dong, X., Li, Y., Fu, Y., Gao, J. and Liu, Y., 2012. Characterization and durability of wood-polymer composite prepared by in-situ polymerization of methyl methacrylate and styrene. Scientific Research and Essays, 7(24): 2143–2149.
- [4] Habibzadeh, S., Omidvar, A., Farahani, M. R. and Mashkour, M., 2014. Effect of nano-Zno on decay resistance and artificial weathering of wood polymer composite. Journal of Nanomaterials & Molecular Nanotechnology, 3(3): doi:10.4172/2324-8777.1000146.
- [5] Yildiz, Ü. C., Yildiz, S. and 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.
- [6] 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. Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood, 52(6): 667-672.
- [7] Dong, X., Zhuo, X., Liu, C., Wei, J., Zhang, G., Pan, R. and Li, Y., 2016. Improvement of decay resistance of wood by in-situ hybridization of reactive monomers and nano-SiO₂ within wood. Applied Environmental Biotechnology, 1(2): 56-62.
- [8] Clausen, C. A., 2007. Nanotechnology: Implications for the wood preservation industry. In: Proceedings of International Reserach group/wood preservation (IRG/WP); 07-30415. Stockholm, Sweden. 10 Pages.
- [9] Harabi, A. and Chehlatt, S., 2013. Preparation process of a highly resistant wollastonite bioceramics using local raw materials. Journal of thermal analysis and calorimetry, 111(1): 203–211.
- [10] Meng, M. R. and Dou, Q., 2008. Effect of pimelic acid on the crystallization, morphology and mechanical properties of polypropylene/wollastonite composites. Materials Science and Engineering: A, 492(1-2): 177-184.
- [11] Miri, M., Beheshti nezhad, H. and Jafari, M., 2014. Experimental investigation on mechanical properties of concrete containing nano wollastonite and modeling with gmdh-type neural networks. Amirkabir Journal of Scientific and Research (Civil & Environmental Engineering), 46: 143–156. (In Persian).
- [12] Efhamisisi, D., Ghazan, M., Oladi, R., N. and Karimi, A.N., 2017. Penetrability of nano-wollastonite into the poplar wood and its effect on wood durability and dimensional stability. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 8(2): 267-282. (In Persian).
- [13] EN 113., 1996. Wood preservatives—Test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes—Determination of the toxic values.
- [14] ISO 13061-14., 2016. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens -Part 14: Determination of volumetric shrinkage.
- [15] EN 84., 1997. Wood preservatives—accelerated ageing of treated wood prior to biological testing. Leaching procedure.
- [16] Efhamisisi, D., Karimi, A., Pourtahmasi, K., Taghiyari, H. R. and Asadi, F., 2010. The effects of agroforestry practices on vessel properties in *Populus nigra* var. *betulifolia*. IAWA journal, 31(4): 481-487.

- [17] Jansen, S., Choat, B. and Pletsers, A., 2009. Morphological variation of intervessel pit membranes and implications to xylem function in angiosperms. *American journal of botany*, 96(2): 409-419.
- [18] Soltani, A., Hosseinpourpia, R., Adamopoulos, S., Taghiyari, H. R. and Ghaffari, E. ,2016. Effects of heat-treatment and nano-wollastonite impregnation on fire properties of solid wood. *Bioresource*, 11: 8953–8967.
- [19] Haghighi, A., Karimi, A., Taghiyari, H. R., Hamzeh, Y. and Enayati, A. A., 2014. Study on the potential use of nano-wollastonite to improve the fire resistance and dimensional stability of poplar wood (*Populus nigra*). *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 4(2): 1–10. (In Persian).
- [20] Ermeydan, M. A., Cabane, E., Gierlinger, N., Koetz, J. and Burgert, I., 2014. Improvement of wood material properties via in situ polymerization of styrene into tosylated cell walls. *Rsc Advances*, 4(25): 12981-12988.
- [21] Karimi, A., Taghiyari, H. R., Fattahi, A., Karimi, S., Ebrahimi, G. and Tarmian, A. ,2013. Effects of wollastonite nanofibers on biological durability of poplar wood (*Populus nigra*) against *Trametes versicolor*. *BioResources*, 8: 4134–4141.
- [22] Omidvar, A., 2009. *Wood-Polymer Composite*. Gorgan University of agricultural sciences and natural resources, University of Gorgan Press, Gorgan, 127pp. (In Persian).

The evaluation of decay resistance and dimensional stability of poplar wood treated with Styrene/Nano wollastonite

Abstract

Wood polymers made of vinyl monomers (such as styrene), due to the lack of penetration into the cell walls, have a slight decay resistance and requires supportive treatment. In this study, decay resistance and dimensional stability of poplar wood (*Populus deltoids*) treated with styrene and nano wollastonite was investigated. The vacuum-pressure method was used to impregnation of wood samples. The samples were treated with four different formulations including 4% nano wollastonite, 75% styrene, 4% nano wollastonite+75% styrene (double treatment), as well as mix of 4% nano wollastonite/75% styrene (single treatment). The impregnation of wood with styrene monomer caused significant weight percent gain (more than 50%), while it was about 1% with nano-wollastonite. The volumetric swelling and the water absorption values of nano-wollastonite treated samples decreased compared to the controls. However, the maximum decrease in the volumetric swelling and the water absorption were observed with the styrenic wood polymer. The combination of nano-wollastonite with the styrene had no effect on these properties. Before leaching, the decay resistance of treated samples with nano-wollastonite and the styrene significantly increased. However, the effectiveness of treated samples with the nano-wollastonite was lost after leaching and their fungal resistance was similar to the control samples. The nano-wollastonite caused significant increase in the fungal resistance of styrenic wood polymers even after leaching, but the weight loss values were still significant. According to the results of this study, the use of eco-friendly products is recommended to increase the rotting resistance of styrenic wood polymers.

Keywords: nano wollastonite, styrene, poplar wood, decay resistance, leaching, dimensional stability.

S. Izadyar¹
R. Hamzehzadeh²
D. Efhamisi^{3*}
A.N. Karimi⁴

¹ Assistant Prof., Department of wood and paper sciences and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

² M.Sc., Department of wood and paper sciences and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

³ Assistant Prof., Department of wood and paper sciences and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

⁴ Professor, Department of wood and paper sciences and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Corresponding author:
efhami@ut.ac.ir

Received: 2019/05/04
Accepted: 2019/07/20