

## قابلیت نفوذ نانو و لاستونیت در چوب صنوبر و اثر آن بر مقاومت زیستی و ثبات ابعاد چوب

### چکیده

در سال‌های اخیر توجه زیادی به استفاده از نانو فناوری برای بهبود معایب چوب شده است. ولاستونیت به‌عنوان یک سنگ معدنی معمولاً در تولید پلاستیک، سرامیک و بتن استفاده می‌شود. تولید نانو ولاستونیت گرایش به استفاده از آن را افزایش داده است. اخیراً تحقیقات زیادی برای بهبود دوام، ثبات ابعاد و احتراق‌پذیری چوب با استفاده از نانو ولاستونیت در کشور انجام شده است. نتایج جالب‌توجه به‌دست‌آمده باعث شد تا در این تحقیق به‌طور تکمیلی قابلیت نفوذ نانو ولاستونیت به داخل بافت چوب و اثرگذاری آن در برابر تخریب قارچی و ثبات ابعاد چوب صنوبر بررسی شود. نتایج نشان داد نانو ولاستونیت قابلیت نفوذ به داخل چوب را نداشته و بافت چوب به صوت فیلتر در مقابل آن عمل می‌کند. اگرچه دوام زیستی نمونه‌های تیمار شده با نانو ولاستونیت در برابر قارچ پوسیدگی سفید افزایش یافت اما این تأثیر ماندگار نبوده و پس از آیشویی کوتاه‌مدت از دست رفت. همچنین تیمار چوب با نانو ولاستونیت اثری بر روی مقادیر جذب آب و واکنش‌دهی ابعاد چوب نداشت. در مجموع، بر پایه نتایج این تحقیق، نانو ولاستونیت برای صنعت اشباع چوب -درجایی که چوب خام مورد استفاده است- توصیه نمی‌شود.

**واژگان کلیدی:** افزایش وزن، پوسیدگی قارچی، ثبات ابعاد، ماندگاری، نانو ولاستونیت.

داوود افهامی سیسی<sup>۱\*</sup>

مژگان غازان<sup>۲</sup>

رضا اولادی<sup>۳</sup>

علی‌نقی کریمی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

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

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

<sup>۴</sup> استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:

[efhami@ut.ac.ir](mailto:efhami@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۵

### مقدمه

برای افزایش دوام چوب در برابر تخریب زیستی، هوازدگی و آتش، روش‌ها و مواد حفاظتی متنوعی ابداع و گزارش شده است. امروزه یک نگرانی عمومی در مورد اثرات سوء مواد حفاظتی قدیمی از قبیل آرسنیک مس کرومی شده، کروزوت و پنتاکلروفنل بر روی انسان و محیط‌زیست وجود دارد [۱]. از سال ۲۰۰۴ استفاده از آرسنیک مس کرومی شده از بسیاری کاربردها از قبیل

ساختمان‌های مسکونی، زمین‌بازی کودکان و سازه‌های دریایی کنار گذاشته شده است [۲]. امروزه پژوهشگران به دنبال استفاده از مواد حفاظتی دوستدار محیط‌زیست هستند تا میزان آلودگی ناشی از مواد حفاظتی را کاهش دهند. انواع مواد معدنی [۱]، مواد طبیعی با ریشه گیاهی و حیوانی [۳] و نانو مواد [۴] توجه زیادی را در این زمینه به خود جلب کرده‌اند. استفاده از ترکیبات سیلیسی از قبیل سیلیکات سدیم [۵] و یا ترکیبات بورات معدنی [۶] به‌عنوان آفت‌کش یا ماده کندسوز کننده کاربرد وسیع و

پژوهشگران ایرانی بر روی امکان استفاده از این ماده در صنعت اشباع چوب صورت گرفته است. نتایج جالب توجه به دست آمده در این پژوهش‌ها باعث شد تا در این مقاله قابلیت این ماده برای کاربرد در صنعت اشباع چوب به طور تکمیلی بررسی شود.

در نخستین پژوهش انجام شده بر روی این ماده، تأثیر نانو و لاستونیت بر روی مقاومت به آتش گونه صنوبر بررسی و گزارش شده است [۱۶]. محلول‌های نانو و لاستونیت با غلظت‌های متفاوت و با روش سلول پر برای اشباع چوب مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر ماندگاری ماده خشک نانو و لاستونیت در این پژوهش در جدول ۱ گزارش شده است. این مقادیر بسیار قابل توجه بوده و در نگاه اول نشان از نفوذ بالای این ماده به داخل چوب دارد. اشباع چوب با محلول آبی ۱۲٪ نانو و لاستونیت باعث افزایش مقاومت در برابر آتش شد. همچنین چوب تیمار شده با این ماده ثبات ابعاد بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشت. برای محاسبه درصد جذب نانو و لاستونیت در این پژوهش از رابطه معمولاً برای بیان درصد افزایش وزن مواد پس از اشباع چوب مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ با این تفاوت که از وزن خشک اجاقی نمونه قبل و بعد از اشباع استفاده می‌شود.

$$WPG \% = \left( \frac{W_2 - W_1}{W_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن، WPG (٪) افزایش وزن نمونه بعد از اشباع، W<sub>1</sub> وزن نمونه در رطوبت تعادل آزمایشگاه و W<sub>2</sub> وزن نمونه بعد از اشباع در رطوبت تعادل محیط آزمایشگاه اعلام شده است [۱۶].

در تحقیق دیگری نتایج مشابهی با چوب نراد به دست آمد. محققین اشاره کردند که استفاده از نانو و لاستونیت و اشباع چوب (روش سلول پر) با آن باعث کندسوز شوندگی چوب می‌شود. مقادیر جذب نانو و لاستونیت برای غلظت‌های مختلف در جدول ۱ آمده است [۱۷]. در مطالعه دیگری، نانو و لاستونیت با غلظت ۶/۳ درصد برای بررسی دوام زیستی چوب صنوبر مورد تحقیق قرار گرفت [۱۸]. نتایج نشان داد که در این غلظت مقدار ماندگاری نانو ماده ۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود که باعث افزایش مقاومت در

تجاری یافته است. همچنین قابلیت استفاده از مواد طبیعی از قبیل عصاره‌های گیاهی به عنوان آفت‌کش موضوع تحقیقات زیادی بوده و موفقیت‌های چشم‌گیری به دست آمده است [۷].

نانو فناوری دروازه جدیدی را به روی صنعت حفاظت چوب گشوده است. تاکنون قابلیت نانو ذرات فراوانی از قبیل اکسید روی [۸]، نانو بورات روی [۹]، نانو مس و نانو نقره [۱۰ و ۱۱]، نانو دی‌اکسید تیتانیوم و نانو سیلیس [۱۲] برای کاربرد در حفاظت چوب به منظور افزایش مقاومت آن در برابر عوامل مخرب زنده و هوازدهی و یا مقابله با آتش مورد بررسی قرار گرفته و نتایج امیدبخشی حاصل آمده است.

در کشور ما نیز پژوهش‌های زیادی برای 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 و لاستونیت است. کانی و لاستونیت یک متاسیلیکات کلسیم است که به طور شیمیایی از کلسیم، سیلکون و اکسیژن تشکیل یافته است. و لاستونیت در حالت خالص خود از ۴۸/۲٪ آهک و ۵۱/۸٪ اکسید سیلیس تشکیل یافته است؛ البته در عمل همواره مقدار کمی آلومینیوم، آهن، منیزیم، منگنز، پتاسیم و سدیم نیز در ساختار آن وجود دارد [۱۳]. و لاستونیت مصارف زیادی در صنعت داشته که این مسئله به خاطر سفیدی، روشنی، جذب رطوبت و ثابت دی‌الکتریک پایین و حداقل مواد فرار در آن است. و لاستونیت اساساً در صنعت سرامیک مورد استفاده قرار می‌گرفته است ولی در حال حاضر در صنایع تولید مواد ساینده، فلزکاری، پرکننده رنگ‌ها، پلاستیک، تقویت بتن، ساخت استخوان و ریشه دندان مصنوعی نیز کاربرد دارد [۱۴]. علاوه بر این، در کشور پژوهش‌های زیادی برای تقویت بتن با استفاده از کانی و لاستونیت انجام شده است. در سال‌های اخیر چند شرکت و شخص حقوقی مدعی ساخت نانو و لاستونیت در داخل بوده‌اند که تقویت بتن با آن‌ها نسبت به ذرات در مقیاس میکرو نتایج بهتری داشته است [۱۵].

با اینکه تاکنون مطالعه‌ای بر روی امکان استفاده از نانو و لاستونیت برای اشباع و حفاظت چوب توسط پژوهشگران غیرایرانی انجام نشده است اما پژوهش‌های زیادی توسط

روی سه گونه نراد، راش و صنوبر انجام شد [۲۰]. نتیجه این تحقیق نیز حاکی از افزایش قابل توجه مقاومت به آتش نمونه‌های اشباع شده بود. در تحقیق مشابه دیگری اثرات متقابل اشباع با نانو و لاستونیت و همچنین تیمار حرارتی بر روی کندسوز شوندگی سه گونه راش، صنوبر و نراد مورد مطالعه قرار گرفت [۲۱]. مقادیر جذب سوسپانسیون نانو و لاستونیت در این تحقیق نیز در جدول ۱ گزارش شده است. غلظت محلول نانو و لاستونیت مورد استفاده در این تحقیق ۱۰٪ بود. نتایج این تحقیق نیز حاکی از بهبود مقاومت چوب در برابر آتش بود که به هدایت حرارتی بالای نانو و لاستونیت ارتباط داده شده است.

برابر حمله قارچی شد. میزان کاهش وزن از حدود ۴۷ درصد در تیمار شاهد به ۳/۶ درصد کاهش پیدا کرد. همچنین در این مطالعه گزارش شد که نانو و لاستونیت به مقدار خیلی کمی آبشویی می‌شود و از این رو می‌توان آن را در کاربردهای فضای باز نیز استفاده کرد.

غلظت بهینه نانو و لاستونیت برای اشباع چوب صنوبر نیز با هدف افزایش مقاومت در برابر آتش بررسی شده است [۱۹]. غلظت‌های متنوع نانو و لاستونیت باعث تغییر چندانی در مقدار جذب سوسپانسیون نانو و لاستونیت نشد (جدول ۱). در تکمیل این تحقیقات، مطالعه دیگری بر روی قابلیت نانو و لاستونیت به عنوان یک کندسوز کننده بر

جدول ۱- مقادیر جذب و ماندگاری نانو و لاستونیت که در پژوهش‌های گذشته گزارش شده‌اند

Soltani و همکاران (۲۰۱۶) [۲۱]		Haghighi و همکاران* (۲۰۱۴) [۲۰]		Haghighi و همکاران (۲۰۱۳) [۱۹]		Haghighi و همکاران (۱۳۹۲) [۱۷]		Haghighi و همکاران (۲۰۱۴) [۱۶]	
نراد	صنوبر	نراد	صنوبر	صنوبر	نراد	صنوبر	نراد	صنوبر	
جذب و لاستونیت خشک (%)		جذب سوسپانسیون و لاستونیت (kg/m <sup>3</sup> )		جذب سوسپانسیون و لاستونیت (kg/m <sup>3</sup> )		ماندگار و لاستونیت خشک (kg/m <sup>3</sup> )		جذب نانو و لاستونیت (%)	
				۵۹۷	۱۶	۱۲۴	۴		
				۵۸۴	۲۰	۱۳۴	۶/۳		
۱/۱۵	۱/۷	۰/۵	۳۸۲	۵۶۵	۵۸۵	۵۷۱	۱۰	۱۳۱	
				۵۹۸	۳۸	۱۲۹	۱۲		

\* بدون اشاره به غلظت مورد استفاده برای تعیین مقدار جذب سوسپانسیون نانو و لاستونیت

در جدول ۲ آمده است. در تمام این تحقیقات، نانو و لاستونیت به شکل پودر و در حین فرایند ساخت چندسازه و یا به صورت اسپری بر روی سطح محصول تمام شده به آن اضافه شده بود.

همه تحقیقات انجام شده بر روی امکان کاربرد نانو و لاستونیت در حفاظت چوب و فرآورده‌های آن به طور جالب توجه ای تنها مختص پژوهشگران ایرانی بوده است. جستجوهای انجام شده در بین گزارش‌های منتشر شده حاکی از عدم توجه محققین غیر ایرانی به قابلیت‌های این ماده جهت استفاده برای صنعت حفاظت چوب بوده است. این در حالی است که مطالعات زیادی توسط پژوهشگران خارجی بر روی روش‌های مختلف تولید نانو و لاستونیت به منظور استفاده در صنایع پلاستیک و سرامیک سازی انجام شده است [۱۳]. ابهامات موجود در خصوص مقدار نفوذ

نحوه محاسبه مقادیر جذب و ماندگاری گزارش شده در جدول ۱ به استثنای تحقیق مربوط به ستون اول [۱۶] گزارش نشده است. از طرفی روش‌های اشباع به کاررفته نیز در هر تحقیق متفاوت بود. از این رو مقایسه داده‌های گزارش شده در این جدول کار دشواری است. نتایج تحقیقات انجام شده بر روی اشباع چوب فراوری نشده با نانو و لاستونیت بسیار امیدوارکننده بود. نتایج این تحقیقات حاکی از یافتن ماده‌ای معدنی و بسیار کارآمد بود که می‌شود آن را برای کاربردهای مختلف حفاظتی به عنوان کندسوز کننده، قارچ کش یا افزایش دهنده ثبات ابعاد چوب با حداقل مسائل زیست محیطی استفاده کرد. در کنار این مطالعات، پژوهش‌های فراوان دیگری بر روی امکان استفاده از این ماده در چندسازه‌های چوبی و کاغذ با اهداف مختلف صورت گرفته است که خلاصه‌ای از آن‌ها

این ماده در داخل چوب و مقادیر متفاوت جذب و ماندگاری گزارش شده، باعث شد تا در این تحقیق به طور تکمیلی مقدار واقعی جذب و ماندگاری نانو ماده در چوب اندازه‌گیری شود. در بخش دوم این تحقیق نیز ثبات ابعاد، دوام زیستی و کندسوز شونده‌گی چوب تیمار شده با نانو ولاستونیت مورد مطالعه دوباره قرار گرفت.

جدول ۲- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده بر روی قابلیت استفاده از نانو ولاستونیت در کاغذ و چندسازه‌های چوبی

ردیف	نوع چندسازه	نتایج	منبع
۱	تخته خرده چوب	نانو ولاستونیت به صورت پودری و مخلوط در چسب، به مقدار ۱۰ درصد وزن چوب اضافه شد که باعث افزایش مقاومت به آتش نمونه‌ها شد.	[۲۲]
۲	تخته خرده چوب	نانو ولاستونیت به دو شکل در ساخته تخته اعمال شد: (۱) به صورت پودر و در حین تولید، (۲) به صورت اسپری محلول آبی بر روی محصول تمام شده. نتایج نشان داد نانو ولاستونیت تا یک غلظت معین باعث بهبود خواص فیزیکی-مکانیکی تخته‌ها می‌شود.	[۲۳]
۳	تخته خرده چوب	جذب آب و واکنشیدگی ضخامت تخته خرده چوب‌ها با اضافه کردن نانو ولاستونیت کاهش یافت. نانو ماده باعث کمک به اتصال بیشتر الیاف به هم شده بود. استفاده از اسپری نانو بر روی سطح چوب تأثیر بیشتری داشت.	[۲۴]
۴	تخته خرده چوب	استفاده از پر مرغ و نانو ولاستونیت باعث بهبود دوام تخته شد. نانو ولاستونیت به عنوان یک پرکننده مناسب برای ساخت چندسازه‌های چوبی توصیه شد.	[۲۵]
۵	الیاف چوب-سیمان	مقاومت فشاری، چسبندگی داخلی و دانسیته تخته‌ها افزایش یافت. با افزایش نانو ولاستونیت، ثبات ابعادی تخته‌ها در مقایسه با نمونه بدون نانو افزایش داشت. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی بهبود ریزساختاری تخته‌ها با افزودن نانو ولاستونیت مشاهده شد.	[۲۶]
۶	الیاف چوب-سیمان	مقاومت به آتش نمونه‌ها و دوام آن‌ها در برابر تخریب قارچی افزایش یافت.	[۲۷]
۷	چوب پلاستیک	خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه تا سطح اختلاف ۵ درصد نانو ولاستونیت افزایش یافت.	[۲۸]
۸	چوب پلاستیک	با افزایش ماده نانو ولاستونیت مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مدت زمان شعله‌وری افزایش، ولی کاهش جرم، مدت زمان دوام شعله و مدت زمان گدازش کاهش یافت.	[۲۹]
۹	کاغذ	تیمار کاغذهای تاریخی با محلول‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد نانو ولاستونیت باعث افزایش مقاومت در برابر تخریب توسط قارچ عامل کپک شد. در این تحقیق از ۵٪ چسب پلی ونیل استات جهت تثبیت نانو ماده بر روی سطح کاغذ استفاده شده بود	[۳۰]
۱۰	تخته فیبر دانسیته متوسط	بهبود هدایت حرارتی تخته‌ها با استفاده از ۱۰ درصد نانو ولاستونیت بر مبنای وزن خشک الیاف باعث افزایش هدایت حرارتی شده و زمان پرس لازم را کاهش داد.	[۳۱]
۱۱	تخته فیبر دانسیته متوسط	استفاده از نانو ذرات ولاستونیت تا ۱۰ درصد وزن تخته به صورت مخلوط با چسب، باعث بهبود اغلب خواص فیزیکی-مکانیکی شد.	[۳۲]
۱۲	تخته فیبر دانسیته متوسط	نانو ولاستونیت به دو صورت پودری (در حین تولید تخته) و یا به صورت اسپری محلول آبی بر روی تخته ساخته شده استفاده شد. نتایج نشان داد مقاومت به آتش تخته‌ها بهبود قابل توجهی می‌یابد. پس از یک سطح معین، مقاومت‌های مکانیکی تخته‌ها به علت جذب چسب توسط نانو ماده و همچنین کاهش مقدار الیاف تقلیل یافت.	[۳۳]
۱۳	تخته فیبر دانسیته متوسط	استفاده از نانو ولاستونیت باعث بهبود هدایت حرارتی تخته شده و گیرایی رزین را تسریع نموده بود. مقاومت‌های مکانیکی تخته با اضافه نمودن نانو ولاستونیت افزایش یافته بود. استفاده از ۶ گرم نانو به ازای یک کیلو الیاف برای کاربردهای صنعتی توصیه شد.	[۳۴]
۱۴	تخته فیبر دانسیته متوسط	کلیه ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی تخته‌ها با استعمال نانو بهبود یافت. نانو به دو صورت پودری در حین فرایند تولید و یا به صورت اسپری پس از ساخت تخته اعمال شده بود.	[۳۵]
۱۵	تخته فیبر دانسیته متوسط	جذب نانو ولاستونیت بر روی الیاف لیگنوسولولزی با استفاده از نظریه تابعی چگالی مطالعه شد. این مدل نشان‌دهنده تشکیل پیوندهای قوی بین الیاف سلولزی و نانو ولاستونیت بود.	[۳۶]
۱۶	تخته فیبر دانسیته متوسط	اضافه نمودن نانو ولاستونیت و پر مرغ به تخته‌ها باعث کاهش نفوذپذیری گاز و مایع شد.	[۳۷]

## مواد و روش‌ها

## نمونه‌گیری

برای انجام این پژوهش، از چوب درختان صنوبر (*Populus deltoides*) قطع شده در منطقه خیرودکنار واقع در شهرستان نوشهر استان مازندران استفاده شد. تعداد سه اصله درخت قطع و گرده‌بینه اول از هر درخت به آزمایشگاه منتقل و نمونه‌گیری انجام شد. درختان قطع شده دارای قطر برابر سینه  $3 \pm 40$  سانتیمتر بودند و تعداد ۲۳ حلقه سالانه بر روی مقطع عرضی آن‌ها شمارش شد. ابعاد نمونه‌های استفاده شده برای آزمون‌های مختلف در جدول ۳ گزارش شده است. نانو و لاستونیت مورد استفاده در این تحقیق نیز از شرکت تولیدات معدنی و صنعتی ورد خریداری شد.

نمونه‌ها پس از برش در داخل آون  $103$  درجه سانتی-گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شده و پس از آن حجم ( $v_0$ ) و وزن خشک اجاقی ( $m_0$ ) آن‌ها اندازه‌گیری شد. وزن خشک اجاقی زمانی تعیین شد که کاهش وزن دو اندازه‌گیری متوالی در فاصله زمانی ۴ ساعت کمتر از  $0.05$  گرم بود. برای اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها از کولیس  $0.01$  میلی‌متر و برای اندازه‌گیری وزن از ترازوی دیجیتالی  $0.01$  گرم استفاده شد.

## تیمارها و روش اشباع چوب

اشباع نمونه‌های ردیف یک و دو جدول ۳ برای انجام آزمون‌های فیزیکی و دوام زیستی با محلول‌های آبی نانو و لاستونیت ۴ و ۶/۳ درصد انجام شد؛ اما برای اشباع نمونه‌های کوچک که متعلق به آزمون غربال‌گری بودند از محلول‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد نانوولاستونیت استفاده شد (ردیف سوم جدول ۳). نانوولاستونیت از شرکت ورد خریداری شده بود که به صورت سوسپانسیون آبی با غلظت ۱۱ درصد بود.

برای اشباع نمونه‌ها از روش خلأ/فشار استفاده شد. شایان‌ذکر است تحقیقات انجام شده بر روی اشباع چوب فرآوری نشده (ماسیو) با نانوولاستونیت با انواع روش‌های سلول پر [۱۷] (خلأ اولیه/فشار/خلأ ثانویه) سلول خالی [۲۰] (فشار اولیه/فشار ثانویه/خلأ نهائی) و یا لوری [۲۱] (فشار/خلأ) انجام گرفته است. در این تحقیق، خلأ ثانویه برای حذف اثر آن در خروج ثانویه مواد از داخل چوب

انجام نشد و در واقع شیوه اصلاح شده استاندارد (۱۹۹۶) EN 113 به کار رفت [۳۸]. طبق این استاندارد، اشباع چوب در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های کوچک باید با فرآیند خلأ/فشار اتمسفری انجام شود.

نمونه‌ها در داخل مخزن اشباع قرار گرفته و خلأ اولیه به میزان  $0.5$  بار و به مدت ۳۰ دقیقه بر روی نمونه‌ها اعمال شد. پس از آن محلول نانو و لاستونیت با کمک خلأ داخل سیلندر بر روی نمونه‌ها ریخته شد. پس از اطمینان از غوطه‌ور شدن کامل نمونه‌ها در محلول، فشار به مدت ۲ ساعت تا میزان ۴ بار افزایش داده شد. نمونه‌ها پس از اتمام دوره اشباع از سیلندر خارج شده و پس از اندازه‌گیری وزن ( $m_1$ ) و حجم ( $v_1$ ) به اتاق کلیما انتقال داده شدند. پس از مشروط شدن نمونه‌ها، حجم ( $v_2$ ) و وزن خشک اجاقی ( $m_2$ ) آن‌ها با قرار دادن در آون  $103$  درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری مقادیر بارگذاری نانو ماده در داخل چوب از دو ویژگی تعریف شده در استاندارد (۱۹۹۶) EN 113 استفاده شد. با استفاده از روابط ۲ و ۳ به ترتیب مقادیر ماندگاری ( $\text{kg/m}^3$ ) و افزایش وزن نمونه (٪) محاسبه شد. در این روابط برای حجم نمونه از واحد  $\text{mm}^3$  و برای وزن نمونه‌ها از واحد g (گرم) استفاده شد.

$$\text{Retention (kg/m}^3) = \left( \frac{m_2 - m_0}{V_2} \right) \times 10^6 \quad (2)$$

$$\text{Weight gain (\%)} = \left( \frac{m_2 - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad (3)$$

روابط گفته شده در استاندارد برای محاسبه جذب و ماندگاری متفاوت از روابط ۲ و ۳ است. روابط گفته شده در استاندارد برای مواد حفاظتی محلول در آب و بر اساس وزن خیس پس از اشباع در نظر گرفته شده است که به صورت روابط ۴ و ۵ می‌باشند. در این روابط C غلظت محلول حفاظتی (٪) است.

$$\text{Retention (kg/m}^3) = \left[ \frac{\{(m_1 - m_0) \times C / 100\}}{V_2} \right] \quad (4)$$

$$\text{Weight gain (\%)} = \left( \frac{\{(m_1 - m_0) \times C / 100\}}{m_0} \right) \times 100 \quad (5)$$

جدول ۳- ابعاد و آزمون‌های استفاده‌شده با استانداردهای مربوطه

ردیف	ابعاد نمونه مماسی × شعاعی × طول mm <sup>3</sup>	شرح آزمون	استاندارد یا روش مربوطه
۱	۵۰ × ۲۵ × ۱۵	آزمون دوام زیستی و اندازه‌گیری مقادیر جذب و ماندگاری	EN 113 (۱۹۹۶)
۲	۳۰ × ۲۰ × ۲۰	مقادیر جذب آب و واکنش‌دهی ابعاد	ISO 13061(۲۰۱۴)
۳	۳۵ × ۱۵ × ۵	آزمون دوام زیستی و اندازه‌گیری مقادیر جذب و ماندگاری	آزمون غربال‌گری

### آزمون‌های فیزیکی

تعداد ۱۰ نمونه از هر تیمار (ردیف دوم جدول ۳) برای اندازه‌گیری مقادیر جذب آب و واکنش‌دهی ابعاد مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها تا رسیدن به وزن ثابت در داخل اتاق کلیما مشروط شده و سپس وزن و ابعاد خشک اجاقی آن‌ها در آن ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شدند. از استاندارد اصلاح‌شده (۲۰۱۴) ISO 13061-14 و روش گفته‌شده در آنجا برای اندازه‌گیری این دو ویژگی استفاده شد [۳۹]. نمونه‌ها در داخل آب مقطر با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شده و در فواصل زمانی ۴، ۶، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴ و ۱۶۸ ساعت از آب خارج و ابعاد و وزن آن‌ها اندازه‌گیری شدند. جذب آب (W.A. %) و واکنش‌دهی ابعاد (S%) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۶ و ۷ اندازه‌گیری شد. که در آن  $m_2$  وزن نمونه بعد از غوطه‌وری در آب در زمان مشخص (g) و  $m_1$  وزن خشک اجاقی نمونه قبل از غوطه‌وری در آب (g) است.

$$W.A. (\%) = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100 \quad (6)$$

$$S (\%) = \left( \frac{v_2 - v_1}{v_1} \right) \times 100 \quad (7)$$

که در آن  $v_2$  حجم نمونه بعد از غوطه‌وری در آب در زمان مشخص (mm<sup>3</sup>) و  $v_1$  حجم خشک اجاقی نمونه قبل از غوطه‌وری در آب (mm<sup>3</sup>) است.

### آزمون آبشویی کوتاه‌مدت

پیش از آزمون کشت قارچ، آزمون آبشویی به مدت پنج روز متوالی طبق روش انجام‌شده توسط Thevenon و همکاران (۲۰۰۹) و Tondi و همکاران (۲۰۱۲) انجام شد [۴۰ و ۴۱]. این آزمون برای موادی که برای بار اول مورد

آزمون آبشویی قرار می‌گیرند، اطلاعات مفیدی در مورد مقاومت به آبشویی ماده در اختیار می‌گذارد. برای اجرای این آزمون ۶ نمونه تیمار شده (۱۵ × ۲۵ × ۵۰ میلی‌متر مکعب) در ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. آب مقطر هرروز تعویض شده و نمونه‌ها دوباره در آب غوطه‌ور می‌شدند. در پایان روز پنجم نمونه‌ها از آب خارج شده و به داخل اتاق کلیما انتقال داده شدند تا مشروط شده و وزن آن‌ها ثابت شود. پس از مشروط سازی، وزن خشک اجاقی نمونه‌ها در آن ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد.

### آزمون قارچ

آزمون قارچ در این مقاله با دو روش انجام شد. روش اول بر اساس استاندارد EN 113(۱۹۹۶) انجام شد [۳۸]. اما روش دوم با استفاده از نمونه‌های کوچک و طبق آزمون غربالگری بود. آزمون غربالگری معمولاً وقتی انجام می‌شود که برای بار اول فعالیت ضد قارچی ماده‌ای اندازه‌گیری می‌شود. این آزمون می‌تواند در گردآوری اطلاعات اولیه مفید باشد که با استفاده از نمونه‌های کوچک (ردیف سوم جدول ۳) و در زمان کوتاه‌تر انجام می‌شود. در هر دو روش از قارچ *Trametes versicolor* (پوسیدگی سفید) که بر روی محیط مالت-آگار (۴۸ گرم در لیتر) رشد کرده بود استفاده شد. پنج نمونه برای هر تیمار مورد استفاده قرار گرفت. آزمون حادپذیری<sup>۱</sup> قارچ بر روی ۶ نمونه چوب خام تیمار نشده راش (*Fagus orientalis*) با ابعاد استاندارد ۱۵ × ۲۵ × ۵۰ mm<sup>3</sup> (مماسی×شعاعی×طول) انجام شد. نمونه‌های شاهد نیز شامل چوب خام صنوبر (*Populus deltoides*) با ابعاد استاندارد بود. پیش از آزمون، وزن خشک اولیه ( $M_1$ ) نمونه‌ها در آن ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد.

<sup>1</sup> Virulence

استفاده می‌شود. در این مطالعه یک‌لایه از ذرات ولاستونیت با استفاده از انبرک تماسی مورد بررسی قرار گرفت.

### آزمون تعیین خاکستر نانو ولاستونیت

برای اندازه‌گیری درصد خاکستر نانو ولاستونیت از روش گفته‌شده در استاندارد (۲۰۰۲) T211-om استفاده شد [۴۲]. بدین منظور مقدار ۳ گرم از نانو ولاستونیت خشک اجاقی در داخل بوته چینی ریخته شد و در داخل کوره ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت قرار داده شد. درصد خاکستر بر مبنای وزن اولیه نمونه محاسبه شد.

### نتایج و بحث

#### جذب و ماندگاری

مقادیر افزایش وزن و ماندگاری نانولاستونیت در نمونه‌های استاندارد و غربالگری در جدول ۴ خلاصه شده است. میزان بارگذاری نانولاستونیت در این تحقیق بسیار کمتر از مقادیری است که قبلاً گزارش شده است (جدول ۱). محاسبات نشان داد که نمونه‌ها به‌طور نظری کاملاً با حلال مورد استفاده در این تحقیق (آب) اشباع شدند، اما نانو ولاستونیت به داخل بافت چوب نفوذ نکرد. در شکل ۱ تصویری از نمونه‌های تازه اشباع‌شده با محلول ۴٪ نانولاستونیت نمایش داده شده است. با توجه به اینکه قطر آوندها در گونه صنوبر معمولاً بیش از ۵۰ میکرون است [۴۳] و قطر کلی منافذ بین آوندی در صنوبر ۵-۷ میکرون و اندازه ریز حفرات موجود در غشای منفذ حدود ۲۰۰ نانومتر است [۴۴]، عدم نفوذ نانو ماده به داخل بافت چوب جای تعجب است. میزان ماندگاری و افزایش وزن به‌دست‌آمده در نمونه‌های غربالگری بیشتر از نمونه‌های با ابعاد استاندارد بود. نمونه‌های غربالگری دارای ابعاد کوچک‌تری هستند که می‌تواند به نفوذ بیشتر ماده حفاظتی کمک کرده باشد. در مقیاس صنعتی، تخته‌های مورد استفاده برای اشباع چوب بسیار بزرگ‌تر از ابعاد استفاده‌شده در این تحقیق هستند؛ لذا به نظر می‌رسد در نمونه‌های بزرگ‌تر مقدار جذب نانو ولاستونیت بسیار کمتر باشد. نکته دوم قابل‌تأمل کاهش مقادیر بارگذاری مواد با افزایش غلظت آن‌ها پس از ۴ درصد است.

همه نمونه‌ها قبل از قرار گرفتن در معرض قارچ، با استفاده از اتوکلاو در فشار ۱/۲ بار و به مدت ۲۰ دقیقه استریل شدند. در هر ظرف (فلاسک) یک نمونه شاهد (نمونه پایه) و یک نمونه تیمار شده قرار گرفت. طبق استاندارد در داخل هر ظرف باید یک نمونه تیمار شده و یک نمونه تیمار نشده از همان‌گونه چوبی قرار گیرد که نمونه مرجع<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. ظروف مورد استفاده دارای کلاهک فلزی ضد نشت بودند. وسط درب فلزی هر ظرف یک سوراخ به قطر ۱۵ میلی‌متر ایجاد و با استفاده از پنبه‌ی فشرده‌شده مسدود شد تا امکان تهویه هوا بدون آلودگی محیط کشت فراهم شود.

نمونه‌های با ابعاد استاندارد و ابعاد آزمون غربالگری به ترتیب به مدت ۱۶ و ۸ هفته در دمای ۲۲ درجه سانتی-گراد و رطوبت نسبی ۷۰٪ در مجاورت قارچ قرار گرفتند. بعد از آزمون، میسیلیوم‌ها از روی نمونه‌ها پاک شده و جهت اندازه‌گیری درصد رطوبت (MC%) با استفاده از رابطه ۸ توزین شدند ( $M_2$ ). وزن نهائی نمونه‌ها ( $M_3$ ) نیز بعد از خشک شدن در آون ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. سپس درصد کاهش وزن نمونه‌ها (WL%) بر مبنای وزن خشک اولیه با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شد. از درصد کاهش وزن به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری شدت حمله قارچ و تخریب چوب استفاده شد.

$$MC \% = \frac{M_2 - M_3}{M_3} \times 100 \quad (8)$$

در پایان آزمون

$$WL \% = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (9)$$

### آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی بر روی ذرات ولاستونیت

برای اطمینان از اینکه ابعاد ذرات نانولاستونیت مورد استفاده واقعاً در محدود نانومتر قرار دارند، اندازه‌گیری ابعاد ذرات ولاستونیت با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۲</sup> انجام شد. این میکروسکوپ، با استفاده از انبرک و نوکی که از یک تک اتم الماس ساخته‌شده است اطلاعاتی از نمونه‌ها به شیوه‌ی غیرمستقیم به دست می‌دهد. از این میکروسکوپ در واقع برای مطالعه توپوگرافی سطح نمونه

<sup>۱</sup> Reference control

<sup>۲</sup> Atomic Force microscope

جدول ۴- مقادیر افزایش وزن و ماندگاری نانو ولاستونیت در نمونه‌های استاندارد و غربالگری

ماندگاری (kg/m <sup>3</sup> )	جذب (%)	غلظت نانو ولاستونیت (%)	نوع نمونه
۳/۴	۰/۷	۴	نمونه‌های با ابعاد استاندارد
۲/۴	۰/۴	۶/۳	۵۰ × ۲۵ × ۱۵ mm <sup>3</sup>
۴/۳±۱/۳	۱/۱±۰/۴	۲	نمونه‌های غربالگری
۹/۳±۱/۹	۱/۹±۰/۶	۴	
۵/۳±۱/۹	۱/۱±۰/۴	۶	
۴/۹±۱/۷	۰/۹±۰/۳	۸	

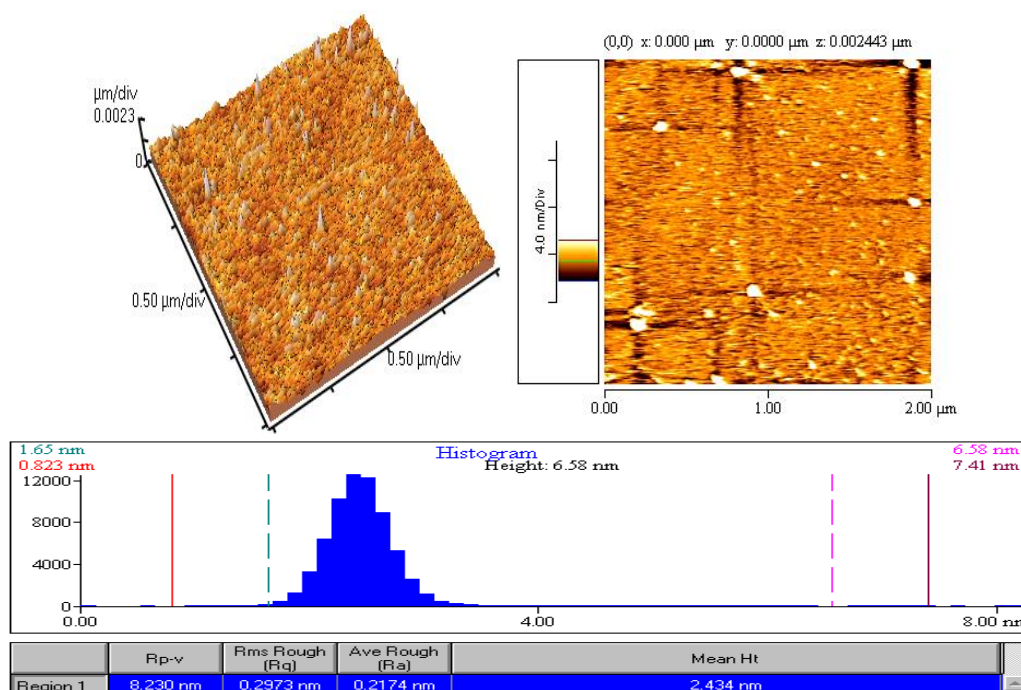


شکل ۱- نمونه‌های اشباع‌شده با نانو ولاستونیت، نانو ولاستونیت به رنگ سفید بر روی سطح نمونه‌ها مشاهده می‌شود

مواد اولیه با میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲ نتایج آمایش میکروسکوپ نیروی اتمی انجام‌شده بر روی ولاستونیت مورد استفاده در این تحقیق نمایش داده شده است. ارتفاع نانو ذرات مورد استفاده در این تحقیق از ۰/۸۲ نانومتر تا ۷/۴۱ نانومتر متغیر و میانگین آن ۲/۴۳ نانومتر بود. ابعاد این نانو ذرات در مقطع بسیار کمتر از ارتفاع آنان بود. Karimi و همکاران (۲۰۱۳) ابعاد نانو ولاستونیت این شرکت را ۳۰-۱۰۰ نانومتر اعلام نموده‌اند [۱۳]. طبق نتایج این آزمون مشخص شد که ذرات استفاده‌شده در ابعاد نانو مواد متداول بوده‌اند.

مقادیر افزایش وزن به دست آمده در این تحقیق را تنها می‌توان با آنچه Soltani و همکاران (۲۰۱۶) برای گونه صنوبر گزارش کرده‌اند [۱۶] مقایسه نمود (جدول ۱). با این حال، دلیل کمتر بودن مقادیر بارگذاری نانو ولاستونیت در این تحقیق نسبت به سایر تحقیقات گزارش شده همچنان جای پرسش است که البته می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد. اولین دلیل احتمالی، تردید در ابعاد نانو ذرات مورد استفاده بود که ممکن بود ابعاد نانو ولاستونیت مورد استفاده برخلاف ادعای شرکت سازنده در حد میکرومتر یا بزرگ‌تر بوده باشد و در نتیجه مواد قادر به عبور از منافذ بین سلولی نباشند. برای بررسی این مسئله،



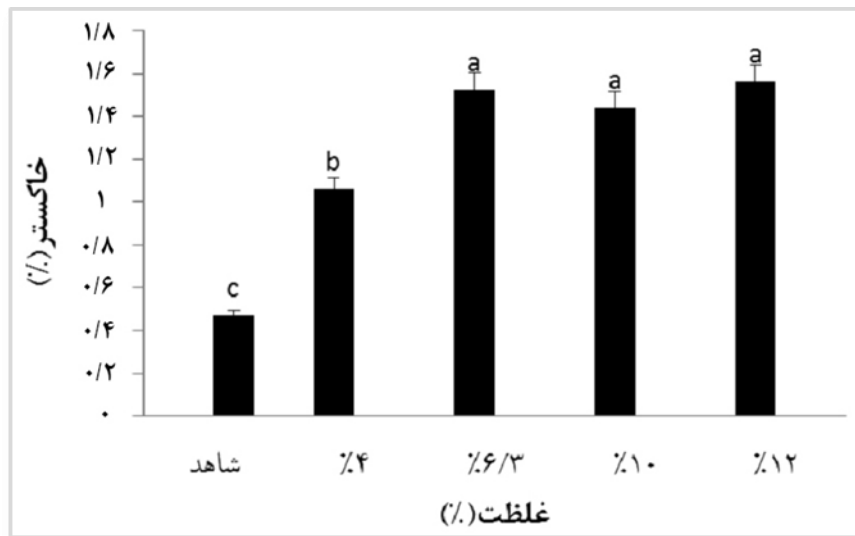


شکل ۲- نتایج عکس برداری با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی بر روی ولاستونیت (ذرات ولاستونیت سفید رنگ دیده می‌شوند)

مقادیر درصد افزایش وزن بر اساس وزن خیس بعد از اشباع محاسبه شده است که تقریباً این افزایش وزن بر اثر جذب آب در طی فرایند اشباع بوده است [۱۶]. ایشان در تحقیق خود مقادیر خاکستر چوب‌های تیمار شده را نیز گزارش کرده‌اند که در شکل ۳ آمده است. با وجود اینکه درصد افزایش وزن ۱۲۴-۱۳۱ درصد گزارش شده است اما درصد خاکستر چوب‌های تیمار شده (۱/۵٪) نسبت به چوب شاهد (۰/۴٪) تنها ۱٪ بیشتر بوده است. نتایج اندازه‌گیری درصد خاکستر نانو ولاستونیت نشان داد که میزان خاکستر این ماده در حدود ۰/۹۹٪ است. این نتیجه با توجه به ماهیت معدنی و سیلیسی این ماده کاملاً طبیعی است. از این رو، به نظر می‌رسد درصد واقعی افزایش وزن به دست آمده توسط Haghghi و همکاران (۲۰۱۳) نیز مقدار ۱ درصدی بوده باشد که خود را در اندازه‌گیری مقدار خاکستر چوب تیمار شده نشان داده است. با توجه به دانسیته چوب صنوبر، ۱٪ افزایش وزن بر اثر تیمار برابر است با ماندگاری در حدود ۴ کیلوگرم بر مترمکعب که با نتایج تحقیق حاضر مشابه است.

دلیل دوم ممکن است کلوخه‌ای شدن ولاستونیت در حین نفوذ به داخل چوب باشد. کاهش جذب و ماندگاری نانولواستونیت با افزایش غلظت آن در محلول آبی می‌تواند تأییدی بر این فرضیه باشد چراکه افزایش غلظت، میزان کلوخه‌ای شدن را افزایش داده است (جدول ۴). اغلب در تولید نانو مواد از پایدارکننده‌های درشت مولکول برای ممانعت از به هم چسبیدن ذرات استفاده می‌شود که این مولکول‌ها با ساختن حائل اطراف ذرات، مانع از چسبیدن ذرات و کلوخه شدن آن‌ها می‌شود [۴۵ و ۴۶]. مولکول‌های پایدارکننده نیز با داشتن ساختارهای درشت یا برهمکنش با ترکیبات چوب (سلولز، لیگنین، همی سلولز)، مانع از نفوذ مناسب نانو ذرات به داخل بافت‌های چوب می‌شود.

با این حال، دلیل اصلی اختلاف بین نتایج این پژوهش با پژوهش‌های پیشین در نحوه اندازه‌گیری و گزارش میزان جذب و ماندگاری نانولواستونیت است. با کمی دقت در داده‌های گزارش شده در جدول ۱ می‌توان دریافت که محققین در واقع مقادیر بارگذاری آب را گزارش کرده‌اند. به عنوان مثال در مطالعه Haghghi و همکاران (۲۰۱۴)



شکل ۳- تأثیر اشباع با غلظت‌های متفاوتی از نانو ولاستونیت بر درصد خاکستر چوب (Haghighi و همکاران، ۲۰۱۴)

استاندارد (۲۰۰۶) XP Cen TS 15083-1 کاهش وزن نمونه‌های شاهد چوب صنوبر نشان‌دهنده دوام طبیعی کم این‌گونه است [۴۷]. مقادیر رطوبت نمونه‌ها در پایان آزمون نیز الزامات استاندارد را رعایت کرد. طبق استاندارد EN 113 رطوبت نمونه‌ها در پایان آزمون برای مواردی که کاهش وزن زیر ۳٪ است باید بین ۲۰ تا ۸۰ درصد باشد. در این مطالعه هیچ کاهش وزنی در این محدود قرار نداشت و رطوبت نمونه‌ها نیز بین مقادیر گفته‌شده در استاندارد بود.

### آزمون قارچ قبل و بعد از آبشویی

نتایج آزمون قارچ، قبل و بعد از آبشویی برای نمونه‌های با ابعاد استاندارد در جدول ۵ خلاصه شده است. میانگین مقادیر کاهش وزن نمونه‌های حادپذیری چوب راش حداقل کاهش وزن لازم (۲۰٪) برای تأیید نتایج آزمون قارچ بر اساس استاندارد (۱۹۹۶) EN 113 را دارا بود؛ بنابراین درستی آزمون‌های قارچی انجام‌شده در این مطالعه تأییدشده و وارسته قارچ استفاده‌شده به اندازه کافی سالم و تهاجمی بود. بر اساس طبقه‌بندی موجود در

جدول ۵- مقادیر کاهش وزن و رطوبت نمونه‌ها در پایان آزمون قارچ

کاهش وزن نمونه‌های پایه %	کاهش وزن %	میانگین رطوبت در پایان آزمون %	شرح تیمار
-	۳۵/۶±۶/۹	۴۰/۶±۴/۱	نمونه‌های حادپذیری چوب راش
-	۲۷/۷±۱/۱ a	۴۹/۵±۳/۶	نمونه‌های شاهد
۲۵/۸	۱۲/۸±۲/۲ c	۳۷/۹±۲/۶	نانو ولاستونیت ۴٪ قبل از آبشویی
۳۴/۳	۱۹/۲±۰/۶ b	۴۲/۲±۱/۳	نانو ولاستونیت ۶/۳٪ بعد از آبشویی
۲۴/۴	۲۲/۴±۲/۶	۴۰/۸±۰/۴	نانو ولاستونیت ۴٪ بعد از آبشویی
۲۹/۱	۲۱/۴±۶/۳	۴۵/۷±۱۰/۸	نانو ولاستونیت ۶/۳٪

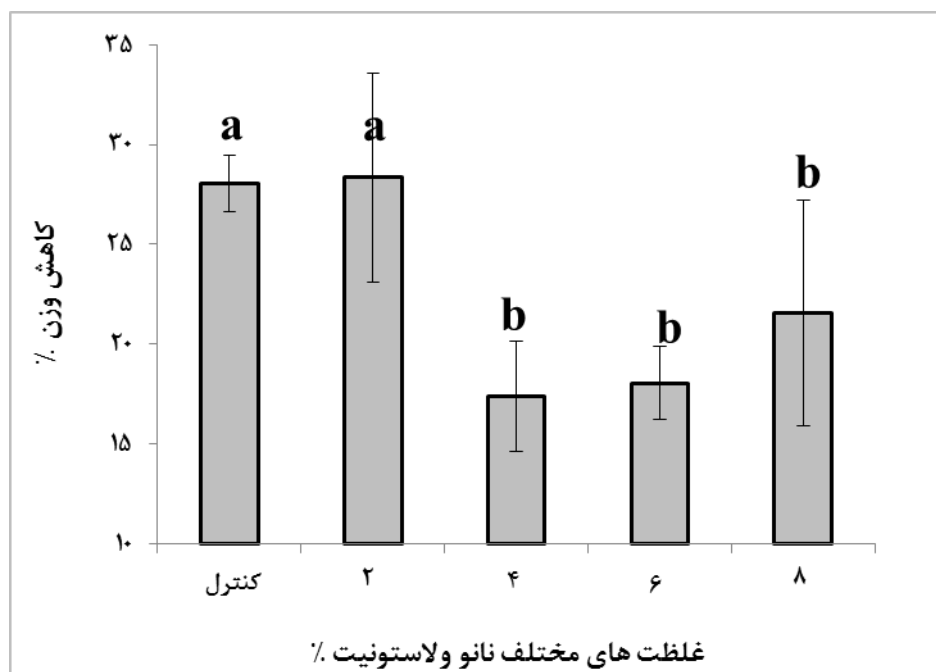
حروف لاتین نشان‌دهنده نتایج آزمون دانکن است.

نانو ولاستونیت کاهش قابل توجهی یافته و نشان‌دهنده شسته شدن این ماده از چوب است. در مطالعه‌ای که Karimi و همکاران (۲۰۱۳) بر روی دوام چوب‌های تیمار شده با نانو ولاستونیت انجام داده بودند مقادیر تأثیرگذاری

قبل از آبشویی، نمونه‌های تیمار شده با نانو ولاستونیت ۴٪ کاهش وزن کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند، اما کاهش وزن به دست آمده در غلظت ۶/۳٪ تفاوت چندانی با نمونه شاهد نداشت. پس از آبشویی، اثرگذاری

نتایج آزمون قارچ برای نمونه‌های غربالگری در شکل ۴ نمایش داده شده است. برای این دسته از نمونه‌ها آزمون آبشویی انجام نشد و هدف از اجرای این آزمون بررسی آستانه سمیت نانو ولاستونیت در برابر قارچ پوسیدگی سفید و ایجاد بارگذاری بیشتر نانو ماده در چوب بود. در نمونه‌های غربالگری نیز حداقل کاهش وزن به دست آمده در برابر تخریب قارچی در حدود ۱۵٪ بود که در غلظت‌های ۴ و ۶/۳ درصد به دست آمد. اشباع با نانو ماده در غلظت ۲٪ تقریباً تأثیری در مقادیر کاهش وزن نسبت به تیمار شاهد نداشت. طبق استاندارد EN 113 یک تیمار مؤثر باید کاهش وزن چوب تیمار شده را به زیر ۳٪ کاهش دهد تا به‌عنوان یک تیمار مؤثر قلمداد شود.

گزارش شده بسیار بیشتر از مقدار به دست آمده در این مطالعه بود [۱۸]. از طرف دیگر ایشان اعلام کرده بودند آبشویی شدید ۱۴ روزه طبق استاندارد (۱۹۹۷) EN 84 تنها باعث خروج ۴٪ نانو ولاستونیت اولیه می‌شود (  $1/3 \text{ kg/m}^3$  از  $32 \text{ kg/m}^3$  ماندگاری اولیه). مشاهدات و نتایج تحقیقات حاضر نشان داد نانو ولاستونیت تنها در سطح چوب قرار می‌گیرد (شکل ۱) و حتی با لمس کردن نیز ریخته می‌شود. اثرگذاری بیشتر نانو ولاستونیت در غلظت ۴٪ نسبت به ۶/۳٪ به‌طور اولیه ممکن است به خاطر بارگذاری بیشتر نانو در این غلظت باشد. از سوی دیگر هرچه غلظت ماده کمتر باشد احتمال کلوخه‌ای شدن و فیلتر شدن آن توسط چوب کمتر خواهد بود و می‌تواند نفوذ یکنواخت‌تری داشته باشد که در ایجاد مقاومت در برابر قارچ مهم است.

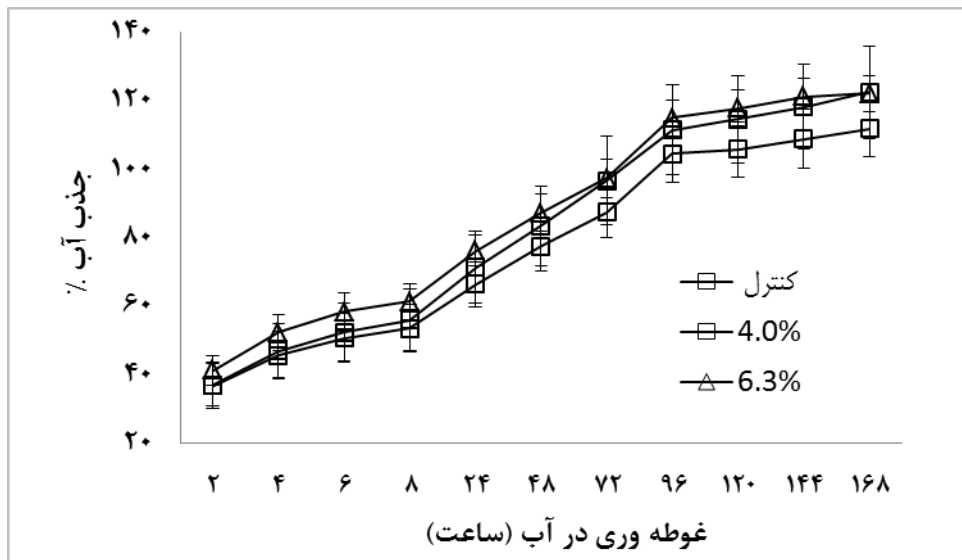


شکل ۴- مقادیر کاهش وزن نمونه‌های کوچک در برابر تخریب قارچی در غلظت‌های متفاوتی از نانو ولاستونیت

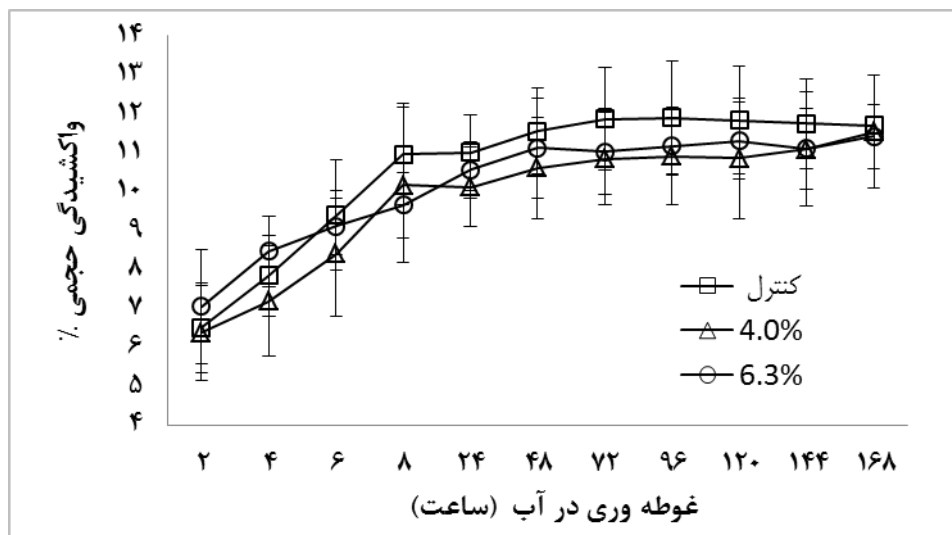
شده است اما هیچ‌کدام از این تغییرات از نظر آماری معنی دار نبودند. این در حالی است که قبلاً به اثر مثبت آن در ثبات ابعاد چوب و کاهش جذب آب اشاره شده بود [۱۶].

#### ویژگی‌های فیزیکی

نتایج میزان جذب آب و واکنشیدگی حجمی نمونه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است. اگرچه تیمار با نانو ولاستونیت باعث کاهش واکنشیدگی حجمی و جذب آب



شکل ۵- مقادیر جذب آب در تیمارهای مختلف



شکل ۶- مقادیر واکنشیدگی حجمی در تیمارهای مختلف

در داخل بافت چوب اغلب وابسته به جایابی آن از طریق حفرات ریز موجود در غشای منفذ است که با ابعاد طیف مختلف نانو مواد برابری می‌کند. از آنجاکه نانو ولاستونیت تنها در غشایی نازک در اطراف نمونه چوبی نفوذ کرده بود، اثرگذاری قابل توجهی در برابر پوسیدگی قارچ و کاهش واکنشیدگی ابعاد نمونه نداشت. بر اساس نتایج این تحقیق، استفاده از نانو ولاستونیت برای صنعت اشباع چوب، دستکم درجایی که چوب فرآوری نشده مدنظر است توصیه نمی‌شود. با این حال، برآورد اثرگذاری این ماده در بهبود ویژگی‌های فرآورده‌های چندسازه چوبی نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.

### نتیجه‌گیری

هدف استفاده از نانو مواد برای بهبود معایب چوب، اثر گذاری بیشتر و همچنین توزیع یکنواخت و همگن آن‌ها در داخل بافت است. نتایج این تحقیق نشان داد که نانو ولاستونیت قابلیت نفوذ به داخل بافت چوب را ندارد. مرور منابع انجام شده در این تحقیق نشان داد که محققین در اندازه‌گیری مقادیر جذب و ماندگاری نانو ماده در داخل بافت چوب از روابطی استفاده کرده‌اند که برای سوسپانسیون‌ها مناسب نیست. عدم نفوذ نانو ولاستونیت به داخل بافت چوب می‌تواند به دلیل کلوئیدی شدن ذرات و فیلتر شدن آن‌ها توسط بافت چوب باشد. انتقال سیال

## منابع

- [1] Freeman, M. H., Shupe, T. F., Vlosky, R. P. and Barnes, H. M., 2003 , Present , and Future of the Wood Preservation Industry. *Forest Product Journal*, 53(10): 8–15.
- [2] Reinprecht, L., 2016. *Wood Deterioration, Protection and Maintenance*. John Wiley & Sons. New Delhi, India, 339 p.
- [3] Singh, T. and Singh, A. P., 2012. A review on natural products as wood protectant. *Wood Science Technology*. 46(5): 851–870.
- [4] Clausen, C. A., 2012. *Enhancing Durability of Wood-Based Composites with Nanotechnology*. General Technical Report FPL–GTR-218, p 8–12.
- [5] Chen, G. C., 2009. Treatment of wood with polysilicic acid derived from sodium silicate for fungal decay protection. *Wood and Fiber Science*, 41(3): 220–228.
- [6] Freeman, M. H., McIntyre, C. R. and Jackson, D., 2009. A critical and comprehensive review of boron in wood preservation, in *Proceedings of the American Wood Protection Assoc.-AWPA*, 105:279–294.
- [7] Hassana, E. B., El-Giarb, E. M. and Steelea, P., 2016. Evaluation of the antioxidant activities of different bio-oils and their phenolic distilled fractions for wood preservation. *International Biodeterioration and Biodegradation* 110: 121-128.
- [8] Afra, E., Narchin, P., 2017. study of antibacterial effects and physical characters of paper coated with nanoclay and homogenized nanoclay. *Iranian journal of wood and paper industries*,7(4): 561-572. (In Persian).
- [9] Lykidis, C., Bak, M., Mantanis, G. and Nemeth, R., 2016. Biological resistance of pine wood treated with nano-sized zinc oxide and zinc borate against brown-rot fungi. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74 (6): 909–911.
- [10] Akhtari, M., Ghorbani Kokandeh, M. and Taghiyari, H. R., 2015. Study on the physical and mechanical properties of paulownia wood impregnated with nanosilver and nanocopper. *Wood Science and Technology*, 21 (4), 147–160.
- [11] Miri, S. M. M., Masteri Farahani, M. R. and Rasouli, D., 2015. The surface properties of poplar (*Populus deltoids*) wood treated with nano copper oxide. *Wood Science and Technology*, 22(3): 207–220.
- [12] Fufa, S. M. and Hovde, P. J., 2010. Nano-based modifications of wood and their environmental impact : review, in *World Conference on Timber Engineering (WCTE)* (Ceccott, A., Ed.), Riva del Garda, Italy, pp 24–26.
- [13] 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.
- [14] 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), 177–184.
- [15] 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 Science & Research*, 46(2):143–156. (In Persian).
- [16] Haghghi1, 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).

- [17] Haghghi, 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): 258–265. (In Persian).
- [18] 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(1): 4134–4141.
- [19] Jonoobi, M., Rahamin, H., Rafieyan, F., 2015. Cellulose nanocrystal properties and their applications. *Iranian journal of wood and paper industries*, 6(1): 167-192. (In Persian).
- [20] Haghghi Poshtiri, A., Taghiyari, H. R. and Karimi, A. N., 2014. Fire-retarding properties of nano-wollastonite in solid wood. *Philippine agricultural scientist*, 97(1): 52–59.
- [21] 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. *BioResources*, 11(1): 8953–8967.
- [22] Rangavar, H. and Alavi Seresht, S. A., 2015. Effect of nano-wollastonite, poly vinyl chloride and high density polyethylene polymers and board structure on fire resistance of particleboard made of pepper stalk and industrial wood. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*. 30(3): 503–512. (In Persian).
- [23] Taghiyari, H. R., Karimi, A.-N. and Paridah, M. D. T., 2013. Nano-wollastonite in particleboard: physical and mechanical properties. *BioResources* 8 (1): 5721–5732.
- [24] Karimi, S., Taghiyari, H. R., Karimi, A., Tahir, P. M. and Halip, J. A., 2014. Effect of nano-wollastonite on water absorption in particleboard, In: *Proceedings of International Research Group on Wood Protection (IRG)*, IRG/WP 14-40662, May 11-15, Utah, USA.
- [25] Taghiyari, H. R., Bari, E., Schmidt, O., Ghanbary, M. A. T., Karimi, A.-N. and Tahir, P. M., 2014. Effects of nanowollastonite on biological resistance of particleboard made from wood chips and chicken feather against *Antrodia vaillantii*. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 90(1): 93–98.
- [26] Hassanpoortichi, A., Bazyar, B., Khademieslam, H., Rangavar, H. and Talaiepour, M., 2015. Effect of nano-wollastonite on microscopic, mechanical and physical properties of cement-wood fibers composite. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*. 3(4): 567–577. (In Persian).
- [27] Hassanpoortichi, A., Bazyar, B., Khademieslam, H., Rangavar, H. and Talaiepour, 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(35): 1466–1479.
- [28] Rangavar, H., Norbakhsh, A. and Haji hatamlou, S., 2016. The effect of nano-wollastonite on physical and mechanical properties of wood plastic composites made with sunflower stem waste and alder. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*. 31 (4): 684-695.
- [29] Tazakor Rezaie, V., Najafi, A. and Sinaie, A., 2016. The effect of Nano-wollastonite on bending properties and fire resistance characteristics of wood flour/polypropylene composite. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*. 31(3): 362–492.
- [30] Taghiyari, H. R., Kalantari, A. and Langroudi, A.-E., 2014. Effects of wollastonite nanofibers on biological resistance of historical paper against *Aspergillus niger*. *Lignocellulose* 3(2): 111–118.
- [31] Taghiyari, H. R., Mobini, K., Samadi, Y. S., Doosti, Z. and Nouri, P., 2013. Effects of nano-wollastonite on thermal conductivity coefficient of medium-density fiberboard. *Journal of Nanomaterials & Molecular Nanotechnology*, 2(1): 1–5.

- [32] Taghiyari, H. R., Mohammad-Panah, B. and Morrell, J. J., 2016. Effects of wollastonite on the properties of medium-density fiberboard (MDF) made from wood fibers and camel-thorn. *Maderas. Ciencia y Tecnologia*, 18(181): 157–166.
- [33] Taghiyari, H. R., Rangavar, H. and Nouri, P., 2013. Fire-retarding properties of nanowollastonite in MDF. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(5): 573–581.
- [34] Taghiyari, H. R., Ghorbanali, M. and Tahir, P. M. D., 2014. Effects of the improvement in thermal conductivity coefficient by nano-wollastonite on physical and mechanical properties in medium-density fiberboard (MDF). *BioResources*, 9 (3): 4138–4149.
- [35] Taghiyari, H. R. and Nouri, P., 2015. Effects of nano-wollastonite on physical and mechanical properties of medium-density fiberboard. *Maderas. Ciencia y Tecnologia*, 17 (4): 833–842.
- [36] Taghiyari, H. R., Majidi, R. and Asghar, J., 2016. Adsorption of nano wollastonite on cellulose surface: effects on physical and mechanical properties of medium-density fiberboard (MDF). *CERNE*, 22(2): 215–222.
- [37] Taghiyari, H. R. and Samadi, Y. S., 2016. Effects of wollastonite nanofibers on fluid flow in medium-density fiberboard. *Journal of Forestry Research*, 27(1): 209–217.
- [38] EN 113., 1996. Wood preservatives—Test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes—Determination of the toxic values 3.
- [39] ISO 13061-14., 2016. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens -Part 14: Determination of volumetric shrinkage.
- [40] Thevenon, M. F., Tondi, G. and Pizzi, A., 2009. High performance tannin resin-boron wood preservatives for outdoor end-uses. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(1): 89–93.
- [41] Tondi, G., Wieland, S., Lemenager, N., Petutschnigg, A., Pizzi, A. and Thevenon, M.-F., 2012. Efficacy of tannin in fixing boron in wood fungal and termite resistance. *BioResources* 7(1): 1238–1252.
- [42] TAPPI test methods: T 211 om-02., 2002. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C 5.
- [43] Eshamisi, D., Karimi, A.-N., Pourtahmasi, K., Asadi, F. and Taghiyari, H. R., 2010. The effects of agroforestry practices on vessel properties in. *International Association of Wood Anatomists*, 31(4): 481–487.
- [44] 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(1): 409–419.
- [45] Sharma, D., Sharma, S., Kaith, B. S., Rajput, J. and Kaur, M., 2011. Synthesis of ZnO nanoparticles using surfactant free in-air and microwave method. *Applied Surface Science*, 257(22): 9661–9672.
- [46] Zhang, Y. L., Yang, Y., Zhao, J. H., Tan, R. Q., Cui, P. and Song, W. J., 2009. Preparation of ZnO nanoparticles by a surfactant-assisted complex sol-gel method using zinc nitrate. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 51(2):198–203.
- [47] XP CEN/TS 15083-1., 2006. Durability of wood and wood based products. Determination of solid wood durability against wood destroying fungi Test methods. Part 1: Basidiomycetes.
- [48] EN 84., 1997. Wood preservatives—accelerated ageing of treated wood prior to biological testing. Leaching procedure.

## Penetrability of nano-wollastonite into the poplar wood and its effect on wood durability and dimensional stability

### Abstract

In recent years, much attention has been paid to nanotechnology for improving wood defects. Wollastonite as a mineral is commonly used in the production of plastic, ceramic and concrete. Wollastonite production in nanoscale has increased interest in using it. Recently, a large number of studies have been carried out in Iran aiming to improve durability, dimensional stability, and flammability of wood and wood products using nano-wollastonite. Based on the promising results obtained in these researches, this study was conducted as a complementary investigation to verify nano-wollastonite penetrability into the wood as well as its effects on biological durability and dimensional stability. The results showed that nano-wollastonite could not penetrate into the xylem since wood texture serves as a filter against it. The treated samples with nano-wollastonite showed partly resistance against white rotting fungus, but this was lost after a short-time leaching. Nano-wollastonite had no effect on the water absorption and volumetric shrinkage of treated samples. Base on the results of this study, nano-wollastonite is not recommended for wood impregnation industry, at least when raw wood is concerned.

**Keywords:** dimensional stability, fungal decay, retention, nano-wollastonite, weight gain.

**D. Efhamisisi<sup>1\*</sup>**

**M. Ghazan<sup>2</sup>**

**R. Oladi<sup>3</sup>**

**A. N. Karimi<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Assistant prof., Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

<sup>2</sup> MSc, Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

<sup>3</sup> Assistant prof., Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

<sup>4</sup> professor, Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Corresponding author:

[efhami@ut.ac.ir](mailto:efhami@ut.ac.ir)

Received: 2016/12/07

Accepted: 2016/01/14