



University of Tehran

Decay resistance of poplar (*Populus deltoides*) wood impregnated with melamine formaldehyde resin

Peyman Ahmadi^{1*} | Davood Efhamisisi² | Kambiz Pourtahmasi³ |
Soheila Izadyar²

1. Corresponding author, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ahmadi.p@ut.ac.ir
2. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: efhami@ut.ac.ir
3. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: pourtahmasi@ut.ac.ir
4. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: sizadyar@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 02 November 2023
Revised: 23 January 2024
Accepted: 29 January 2024
Published online: 10 March 2024

Keywords:
Anti-shrinkage efficiency,
Formaldehyde,
Free formaldehyde,
Fungal decay test,
Leaching.

ABSTRACT

The utilization of wood is limited due to its vulnerability to moisture, dimensional changes, and susceptibility to both living organisms and environmental factors. One method of wood enhancement involves impregnating the wood with various aminic resin monomers and subsequently converting them into polymers within the wood structure. This study aims to enhance the physical properties of poplar (*Populus deltoides*) wood by employing MF resin for saturation. Additionally, a 5% boric acid solution is utilized during saturation to enhance resistance against fungal decay. The first part of the study involved saturating wood samples with different concentrations (7%, 15%, 27%, and 35%) of MF resin, using the vacuum/pressure technique, and examining the properties of the treated wood. In the second part, samples were treated with resins made at different molar ratios to investigate the impact of free formaldehyde and other additives on decay resistance. Results revealed a substantial increase in weight gain percentage as resin concentration increased during wood saturation. The impregnation of wood with MF resin and subsequent polymer formation within the wood structure, even after leaching procedure in accordance with EN 84 standard, significantly improved the samples' resistance against white rot decay. Treatment with different resin concentrations considerably enhanced pine wood's resistance to decay. Resins with higher formaldehyde ratios and the inclusion of boric acid as an additional protective measure did not significantly impact the decay resistance of the treated samples. The findings of this study underscore the considerable potential of using MF resin to boost wood's resistance against decay.

Cite this article: Ahmadi, P., Efhamisisi, D., Pourtahmasi, K., Izadyar, S. (2024). Decay resistance of poplar (*Populus deltoides*) wood impregnated with melamine formaldehyde resin. *Journal of Forest and Wood Products*, 76 (4), 393-406. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.367374.1266>



© The Author(s) **Publisher:** The University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.367374.1266>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

مقاومت به پوسیدگی چوب صنوبر (*Populus deltoides*) اشباع شده با رزین ملامین فرمالدهید

پیمان احمدی^{۱*} | داوود افهامی سیسی^۲ | کامبیز پورطهماسی^۳ | سهیلا ایزدیاری^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ahmadi.p@ut.ac.ir

۲. گروه علوم و صنایع چوب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: efhami@ut.ac.ir

۳. گروه علوم و صنایع چوب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: pourtahmasi@ut.ac.ir

۴. گروه علوم و صنایع چوب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: sizadyar@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

استفاده از چوب به علت جذب رطوبت و تغییر ابعاد و همچنین امکان تخریب با عوامل زنده و غیر زنده محدودیت‌هایی دارد. اشباع چوب با انواع مونومر رزین‌های آمینی و سپس تبدیل آن‌ها به پلیمر در داخل چوب یکی روش‌های اصلاح چوب است. هدف این تحقیق استفاده از رزین ملامین-فرمالدهید برای اشباع چوب صنوبر (*Populus deltoides*) به منظور بهبود ویژگی‌های فیزیکی و همچنین استفاده از ۵٪ درصد اسید بوریک در محلول اشباع برای بهبود مقاومت در برابر پوسیدگی قارچی است. در بخش اول این تحقیق، نمونه‌های چوبی با غلظت‌های مختلفی (۷، ۱۵، ۲۷ و ۳۵ درصد) از رزین ملامین-فرمالدهید با نسبت مولی فرمالدهید ۱/۵ به ملامین ۱ با روش خلاء/فشار اشباع شده و ویژگی‌های چوب‌های تیمار شده بررسی شد. در بخش دوم، نمونه‌های چوبی با رزین‌های ساخته شده در نسبت‌های مولی مختلف اشباع گردید و مقاومت به پوسیدگی آن بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش غلظت رزین، مقادیر درصد افزایش وزن ناشی از اشباع چوب به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. اشباع چوب با رزین ملامین-فرمالدهید و تشکیل پلیمر در چوب، حتی بعد از آبلشویی (طبق استاندارد EN 84)، باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر پوسیدگی سفید می‌شود. تیمار با غلظت‌های مختلف رزین به طور معنی‌داری موجب بهبود مقاومت به پوسیدگی چوب صنوبر شد. رزین‌های با نسبت بالاتری از فرمالدهید و همچنین افزودن اسید بوریک به عنوان ماده حفاظتی مکمل، اثر معنی‌داری روی مقاومت به پوسیدگی نمونه‌های تیمار شده نداشتند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از رزین ملامین-فرمالدهید پتانسیل بالایی برای افزایش مقاومت به پوسیدگی چوب دارد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

کلیدواژه:

آبلشویی،

آزمون مقاومت به پوسیدگی،

فرمالدهید آزاد،

کارایی ضد واکنشیدگی،

ملامین فرمالدهید.

استناد: احمدی، پیمان؛ افهامی سیسی، داوود؛ پورطهماسی، کامبیز؛ ایزدیاری، سهیلا (۱۴۰۲). مقاومت به پوسیدگی چوب صنوبر (*Populus deltoides*) اشباع شده با رزین ملامین

فرمالدهید. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۶ (۴)، ۴۰۶-۳۹۳. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.367374.1266>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسنده‌گان.



DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.367374.1266>

۱. مقدمه

چوب ماده‌ای طبیعی و تجدیدپذیر است که برخلاف اغلب مصالح ساختمانی، ذخیره‌گاه کربن است. امروزه در ارتباط با اصطلاح ساختمان سبز استفاده از چوب و محصولات چوبی یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. با این وجود، از آنجا که چوب یک محصول کاملاً طبیعی است، استفاده از آن با محدودیت‌هایی همراه است به‌ویژه زمانی که در معرض رطوبت و عوامل زنده قرار می‌گیرد. این امر باعث شده است، تلاش‌های فراوانی برای بهبود خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دوام زیستی چوب با تکیه بر انواع روش‌های اصلاح چوب صورت گیرد. اصلاح چوب، فرآیندی دوستدار محیط‌زیست است که برای بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی، زیستی یا زیباشناختی چوب و فرآورده‌های چوبی استفاده می‌شود [۱]. اصلاح چوب با روش‌های مختلفی اعم از تیمار حرارتی، شیمیایی، اشباع و غیره صورت می‌گیرد [۲]. تاکنون چندین فناوری جدید اصلاح چوب شامل تیمار حرارتی، استیلایسیون، فورفوریلایسیون و دیگر فرآیندهای آغشتگی (برای مثال با مونومرهای وینیل)، با موفقیت به بازار معرفی شده‌اند. در فرآیند اصلاح آغشتگی چوب از انواع تک‌پار (مونومرها) مانند نیل [۳]، فورفورال [۴]، رزین‌های سنتزی گرماسخت [۵]، ترکیبات سیلیکونی [۶] برای تولید چوب بسپار (چوب پلیمر) استفاده می‌شود [۷]. ساخت چوب بسپارها بسته به نوع مونومر استفاده شده می‌تواند اصلاح غیرفعال و یا گاهی فعال تلقی شود [۸]. اگر مونومرهای دیواره‌ای و حفره‌ای باهم تلفیق شوند، چوب بسپار حاصل، خواص هر دو را دارا خواهد داشت. استفاده از برخی مواد شیمیایی مانند رزین‌های فنل فرمالدهید^۱ (PF) و ملامین فرمالدهید^۲ (MF) یا اوره فرمالدهید^۳ (UF) و یا حتی الکل فورفوریل می‌تواند به ساخت چوب‌پلیمرهای حفره‌ای-دیواره‌ای منجر شود. اولین آزمایشات برای اصلاح چوب با استفاده از رزین‌های آمینی توسط Stamm و همکارانش (۱۹۴۰) در آزمایشگاه محصولات جنگلی ایالات متحده در دهه ۱۹۴۰ انجام شد [۹]. اصلاح چوب سوزنی‌برگان با رزین‌های PF، MF و UF، موجب بهبود ثبات ابعاد و ویژگی‌های خمشی چوب مانند مدول الاستیسیته و گسیختگی می‌شود [۱۰]. در اشباع چوب با رزین‌های آمینی یا فنلی بسته به میزان بسپارش اولیه رزین در زمان سنتز (پیش از اشباع چوب)، میزان نفوذ آن به داخل دیواره‌های سلولی تعیین می‌شود. برای مثال، رزینی با میزان بسپارش و تراکم بالا امکان نفوذ به دیواره سلول‌های چوبی را ندارد [۱۱]. اصلاح چوب با رزین‌های MF دارای وزن ملکولی پایین منجر به اصلاح فعال چوب می‌شود، زیرا به راحتی وارد دیواره سلول‌های چوبی شده و با توجه به ماهیت قطبی، با پلیمرهای دیواره‌ای چوب واکنش می‌دهد. تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های چوب تحت تأثیر مقادیر بارگذاری مواد در چوب است. این موضوع در مطالعه Ahmadi و همکاران (۲۰۱۹) به همراه اثر نسبت مولی ملامین به فرمالدهید و اثرگذاری آن روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲]. در جدول یک خلاصه‌ای از نتایج تحقیقات انجام شده روی اصلاح چوب با رزین‌های MF اشاره شده است.

اگر چه مطالعات بسیاری در مورد اصلاح چوب با رزین‌های گرماسخت به‌ویژه در اروپا انجام شده است و به نتایج مثبتی در رابطه با قابلیت نفوذ رزین به دیواره‌های سلولی، بهبود ثبات ابعادی و مقاومت‌های مکانیکی دست یافته‌اند (جدول ۱)، اما همچنان میزان انتشار فرمالدهید از چوب‌های تیمار شده و قابلیت بهبود دوام زیستی آن کمتر مورد بحث قرار گرفته است. هدف اصلی در این پژوهش، اصلاح چوب صنوبر با استفاده از رزین MF با هدف بهبود مقاومت به پوسیدگی قارچی چوب صنوبر (*Populus deltoides*) است. در این راستا، اثر نسبت مولی ملامین به فرمالدهید، مقدار بارگذاری رزین در چوب و همچنین استفاده از اسید بوریک به عنوان قارچ کش مکمل روی رفتار مقاومت چوب در برابر قارچ عامل پوسیدگی سفید مورد بررسی قرار گرفت.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد

برای اجرای این پژوهش چوب درخت صنوبر با قطر ۳۵ سانتی‌متر دارای ۳۲ حلقه سالیانه (در ارتفاع برابر سینه) از جنگل‌های خیرود نوشهر قطع و گرده‌بینه آن‌ها به طول دو متر، به کارگاه فرآورده‌های مرکب انتقال داده شد. پس از خشک کردن الوارهای

^۱Phenol formaldehyde

^۲Melamine formaldehyde

^۳Urea formaldehyde

چوبی، از قسمت‌های سالم و بدون گره برای نمونه‌گیری‌ها استفاده شد.

جدول ۱. تعدادی از تحقیقات اخیر انجام شده بر روی اصلاح چوب با رزین‌های MF و سایر رزین‌های گرماسخت

منبع	نتایج	نوع رزین	گونه چوب	خواص بررسی شده
[۱۳]	کارایی ضد واکنش‌دهی در چوب کاج و صنوبر اصلاح شده با رزین MF به ترتیب ۵۷ و ۷۴ درصد بود. هر دو رزین اثر مثبتی روی خواص فیزیکی و مکانیکی داشتند.	MUF* MF*	کاج جنگلی و صنوبر	فیزیکی مکانیکی
[۱۴]	غلظت رزین مورد استفاده و درصد مواد استخراجی گونه چوب از عوامل مؤثر در جذب رزین داخل دیواره‌ها هستند. سختی سطح نمونه‌های تیمار شده بهبود پیدا کرده و مقاومت به هوازگی زیاد شده بود.	MF	گونه سوزنی‌برگ	هوازگی مکانیکی
[۱۵]	مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های شاهد ۸۲ درصد بیشتر بود. چگالی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده به ترتیب 0.44 g/cm^3 و 0.65 g/cm^3 بود.	MF	نوئل	مکانیکی فیزیکی
[۱۶]	چوب اصلاح شده با MF رنگ اصلی خود را حفظ کرده و ثبات ابعاد و همچنین خواص مکانیکی بالاتری داشت. مدول یانگ از $16/1 \text{ GPa}$ به $21/4 \text{ GPa}$ و مقاومت به سختی از 0.24 GPa به 0.52 GPa افزایش پیدا کرد.	MF	صنوبر	مکانیکی فیزیکی
[۱۷]	مقاومت چوب اصلاح‌شده با رزین MF در برابر هوازگی طبیعی و مصنوعی افزایش یافت. سختی سطح نیز افزایش قابل توجهی داشته و همچنین مقاومت بالایی در برابر پوسیدگی قارچی مشاهده شد.	MF	نوئل و صنوبر	هوازگی (سختی)
[۱۸]	نمونه‌ها به مدت ۳ روز در محلول رزین MF غوطه‌ور شده و رزین به عمق ۴ میلی‌متری چوب نفوذ کرد. پس از پلیمریزاسیون رزین، سختی چوب به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. مقاومت به سختی نمونه‌های صنوبر اصلاح شده با این رزین قابل مقایسه با چوب راش بود.	MF	صنوبر	مکانیکی فیزیکی
[۱۹]	در سطح افزایش وزن $22/9$ درصد، ثبات ابعاد و سختی سطح نمونه‌ها به ترتیب $17/5$ درصد و $12/3$ درصد بیش از نمونه‌های شاهد بود.	MF	صنوبر	سختی سطح ثبات ابعاد

برای ساخت رزین‌های مختلف MF، پودر ملامین با درصد خلوص $99/8$ از شرکت تیران شیمی تهیه شد. هیدروکسید سدیم 99 درصد نیز برای کنترل شرایط اسیدی محیط رزین از شرکت اطلس شیمی تهیه گردید و در محیط آزمایشگاه با غلظت 20 درصد برای تنظیم شرایط اسیدی، رقیق‌سازی شد. رزین صنعتی استفاده شده در این تحقیق نیز با ویژگی‌های ذکر شده در جدول ۲ از شرکت تیران شیمی تأمین شد.

جدول ۲. ویژگی رزین ملامین فرمالدهید صنعتی

مقدار	ویژگی
۱۳/۱۰	ویسکوزیته (ثانیه)
۵۱	درصد مواد جامد (درصد)
۰/۷۵	درصد فرمالدهید آزاد (درصد)
۹/۳۸	اسیدیته

۲-۲. روش ساخت رزین

تولید آزمایشگاهی رزین ملامین فرمالدهید با نسبت مولی فرمالدهید $1/5$ به ملامین 1 در این پژوهش طبق روش Ahmadi و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد [۱۲]. پس از تهیه رزین، ویژگی‌های آن شامل ویسکوزیته (مطابق با استاندارد ASTM D1084)، اسیدیته، درصد مواد جامد (مطابق استاندارد ASTM D4426) اندازه‌گیری شد [۲۰، ۲۱]. در ادامه، رزین‌هایی با نسبت‌های مولی بالاتری از فرمالدهید (۲ و ۳ برابر ملامین) ساخته شد. رزین ساخته شده برای اشیاع نمونه‌ها و بررسی مقاومت به پوسیدگی آن‌ها، مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳. اشباع نمونه‌های چوبی

ابعاد نمونه‌های چوبی مطابق با استاندارد (۱۹۹۷) EN 113 به‌طور اسمی به ابعاد $۱۵ \times ۲۵ \times ۵۰$ میلی‌متر مکعب (مماسی \times شعاعی \times طولی) تهیه شد [۲۲]، سپس برای تعیین وزن خشک به آون ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت انتقال داده شدند. پس از اطمینان از خشک شدن نمونه‌ها، وزن خشک آن‌ها (m_0) با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت $۰/۰۱$ گرم اندازه‌گیری شد. بعد از رقیق‌سازی رزین‌ها به شرح جدول ۳، اشباع نمونه‌های چوبی با روش خلاء-فشار انجام شد.

جدول ۳. شرح تیمار با رزین ملامین فرمالدهید در غلظت‌های مختلف

ردیف	شرح تیمار	غلظت (درصد وزنی)	افزایش وزن هدف (درصد)
۱	شاهد	-	-
۲	تیمار با MF آزمایشگاهی	۷	۱۰
۳	تیمار با MF آزمایشگاهی	۱۵	۳۰
۴	تیمار با MF آزمایشگاهی	۲۷	۴۰
۵	تیمار با MF آزمایشگاهی	۳۵	۶۰
۷	تیمار با MF تجاری	۲۷	۴۰
*۸	تیمار با MF آزمایشگاهی + ۰/۵ درصد BA	۳۵	۶۰

* فقط نمونه‌های مربوط به مقاومت زیستی با تیمار MF آزمایشگاهی + ۰/۵ درصد BA اشباع شدند.

ابتدا نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه تحت خلاء $۰/۴$ - بار قرار گرفتند. در مرحله بعد محلول رقیق شده رزین ملامین فرمالدهید داخل سیلندر تزریق شد. سپس به مدت ۲ ساعت فشار ۵ بار روی محلول اشباع اعمال شد. بعد از فرآیند اشباع، نمونه‌ها از سیلندر خارج و وزن مرطوب بعد از تیمار آن‌ها (m_1) اندازه‌گیری شد. در ادامه، نمونه‌های چوبی برای پخت رزین داخل فویل آلومینیومی پیچیده شده و به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون قرار داده شدند. بعد از مرحله پخت رزین، پوشش آلومینیومی اطراف نمونه‌ها برداشته شد. جهت جلوگیری از ترک برداشتن نمونه‌ها، فرآیند خشک کردن به ترتیب در دماهای ۴۵ ، ۶۰ ، ۸۰ و ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد (هرکدام به مدت ۱۲ ساعت) داخل آون صورت گرفت. بعد از اطمینان از خشک شدن نمونه‌ها و رسیدن آن‌ها به وزن ثابت، وزن (m_2) و ابعاد خشک (v_2) آن‌ها اندازه‌گیری شد.

۲-۴. بررسی درصد افزایش وزن

برای محاسبه درصد افزایش وزن (WPG) و مقدار ماندگاری تجربی (بر مبنای وزن خشک) به ترتیب از رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده شد.

$$WPG (\%) = \left(\frac{m_2 - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$R\% = \frac{m_2 - m_0}{v} \times 1000 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، m_0 : وزن خشک قبل از اشباع، m_2 : وزن خشک بعد از اشباع و v : حجم اسمی نمونه‌ها است.

۲-۵. مطالعات میکروسکوپی

از دستگاه میکروسکوپ نوری مدل BA410 Epi برای بررسی چگونگی نفوذ رزین MF در بافت چوب استفاده شد. کریستال‌های پلیمریزه شده رزین در داخل بافت چوب توسط میکروسکوپ قطبی شده بررسی شدند. ابتدا نمونه‌های کوچکی از نمونه‌های شاهد و یا تیمار شده به ابعاد $۱۰ \times ۱۰ \times ۱۰$ میلی‌متر مکعب تهیه گردید و به منظور نرم شدن بافت برای چند روز در آب غوطه‌ور شدند. برش‌هایی با ضخامت ۱۰ میکرومتر با میکروتوم لغزشی از مقاطع مختلف نمونه‌ها تهیه گردیدند و پس از رنگبری با آب ژاول

توسط رنگ سافرانین/آسترابلو رنگ‌آمیزی شدند. سپس میزان نفوذ ماده اصلاحی به داخل بافت چوب با استفاده از میکروسکوپ نوری و مجهز به نور قطبی شده مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۶. آزمون آبشویی

به‌منظور بررسی ماندگاری ماده حفاظتی در چوب و مقاومت آن به آبشویی، آزمون آبشویی بلندمدت طبق استاندارد EN 84 به‌مدت ۱۴ روز انجام شد [۲۳]. برای اجرای آزمون، نمونه‌ها به‌صورت کامل در آب غوطه‌ور شدند، سپس به‌مدت ۲۰ دقیقه تحت خلاء ۴ کیلوپاسکال قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها به‌مدت ۲ ساعت در فشار اتمسفر داخل آب رها شده و بعد از آن، آب ظرف برای بار اول تعویض شد. سپس، نمونه‌ها برای ۱۴ روز دیگر در آب قرار گرفتند و نه مرتبه دیگر آب ظرف تعویض شد. بعد از آزمون آبشویی، نمونه‌ها در آن ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین شدند. مقدار کاهش وزن نمونه‌ها بر اثر آبشویی (WL%) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$WL\% = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100 \quad \text{(رابطه ۳)}$$

که در آن، m_2 : وزن خشک نمونه‌ها پس از اشباع (g) و m_3 : وزن خشک نمونه‌ها پس از آبشویی (g) است.

۲-۷. آزمون مقاومت به پوسیدگی قارچی

در این مطالعه آزمون مقاومت به پوسیدگی بر روی دو سری از نمونه‌ها انجام شد: الف) نمونه‌های تیمار شده با غلظت‌های مختلفی از رزین MF با نسبت مولی ۱:۱/۵ (فرمالدهید:مالمین) (طبق جدول ۲). ب) نمونه‌های تیمار شده با یک غلظت مشخص (غلظت ۲۷ درصد)، از رزین MF با نسبت‌های مولی مختلف (۱:۱/۵، ۱:۲، ۱:۳).

آزمون مقاومت به پوسیدگی بر اساس استاندارد (۱۹۹۶) EN 113 انجام شد. قارچ مورد استفاده طبق این استاندارد برای گونه‌های چوبی پهن برگ، قارچ مولد پوسیدگی سفید (*Trametes versicolor*) بود. قارچ مورد نظر بر روی محیط کشت مالت اکستراکت آگار، کشت داده شد. محلول ۴۸ گرم در لیتر مالت اکستراکت آگار در آب مقطر به‌عنوان محیط کشت تهیه و در داخل اتوکلاو با بخار آب در فشار ۱/۲ بار و به‌مدت ۲۰ دقیقه استریل شد. سپس مقدار ۷۵ میلی‌لیتر از آن در داخل هر ظرف کشت ریخته شد. ظروف کشت جهت استریل مجدد در اتوکلاو قرار گرفتند. پس از گیرا شدن محیط کشت در دمای آزمایشگاه، تلقیح آن با استفاده از قارچ خالص‌سازی شده انجام گرفت. پس از انتقال قارچ به محیط کشت، ظروف کشت در شرایط 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 75 ± 5 درصد قرار گرفتند تا قارچ به‌صورت کامل سطح محیط کشت را بپوشاند. استریل نمونه‌های چوبی نیز با استفاده از اتوکلاو انجام شد. در داخل هر ظرف کشت، یک نمونه شاهد و یک نمونه تیمار شده (خواه قبل از آبشویی خواه بعد از آبشویی) قرار گرفت. آزمون‌های شاهد نیز بر روی شش نمونه تیمار نشده صنوبر با ابعاد استاندارد انجام شد. نمونه‌های راش نیز به‌عنوان نمونه‌های پذیرنده در معرض قارچ قرار گرفتند. زمان آزمون پس از انتقال نمونه‌ها به داخل ظروف کشت ۱۶ هفته بود. پس از آن، نمونه‌ها از داخل ظروف خارج شده و پس از پاک کردن سطح نمونه‌ها از هر گونه میسیلیوم قارچی، توزین شدند. وزن خشک نمونه‌ها نیز با قرار دادن آن‌ها در داخل آن ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. محاسبه درصد رطوبت (MC%) و کاهش وزن نمونه‌ها بر اثر حمله قارچ (ML%) با استفاده از روابط ۴ و ۵ انجام شد.

$$MC\% = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که در آن، W_1 : وزن مرطوب بعد از آزمون قارچ (g) و W_2 : وزن خشک بعد از آزمون قارچ (g) می‌باشد.

$$ML\% = \left(\frac{W_0 - W_2}{W_0} \right) \times 100 \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن، W_0 : وزن خشک قبل از آزمون قارچ (g) و W_2 : وزن خشک بعد از آزمون قارچ (g) می‌باشد.

۲-۸. تجزیه و تحلیل داده‌ها

گزاره‌های توصیفی (میانگین و انحراف معیار) در نرم‌افزار اکسل - نسخه ۲۶ و آزمون‌های آماری شامل تجزیه واریانس و آزمون گروه‌بندی دانکن، با استفاده از نرم‌افزار SPSS 26 در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. ویژگی‌های رزین صنعتی و آزمایشگاهی

در جدول ۴ ویژگی‌های رزین آزمایشگاهی ساخته شده و رزین صنعتی ارائه شده است. میزان فرمالدهید آزاد در رزین آزمایشگاهی به دلیل نسبت پایین فرمالدهید استفاده شده در ساخت آن بسیار پایین‌تر از رزین صنعتی بود.

جدول ۴. ویژگی‌های رزین صنعتی و آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

ویسکوزیته ثانیه	مواد جامد (درصد)	فرمالدهید آزاد (درصد)	pH	نسبت ملامین به فرمالدهید
۱۳/۱۰	۵۱	۰/۷۵	۹/۳۸	۱:۳
۱۳/۶۰	۵۳/۱	۰/۴۷	۹/۳	۱:۱/۵

۳-۲. درصد افزایش وزن و ماندگاری

میانگین درصد افزایش وزن (WPG) به دست آمده در نمونه‌های تیمار شده با رزین MF با غلظت‌های گوناگون در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد با افزایش غلظت رزین، مقادیر WPG به طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد ($\text{sig.} = ۰/۰۰۰$). آزمون دانکن نیز میانگین داده‌ها را در چهار گروه مختلف قرار داد. بیشترین و کمترین مقدار WPG به ترتیب ۵۸ و ۹/۶۴ درصد بود که مربوط به تیمارهای انجام شده با رزین MF در غلظت‌های ۳۵ درصد و ۷ درصد بود. Suat Altun و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که مقادیر درصد افزایش وزن چوب‌های صنوبر و کاج اسکاتلندی اشباع شده با رزین MF در غلظت ۳۰ و ۶۰ درصد، به ترتیب برای گونه صنوبر (*Populus deltoides*) ۶۱ و ۷۳ درصد و برای گونه کاج اسکاتلندی (*Pinus sylvestris*) برابر ۳۶ و ۵۳ درصد بود، مقدار درصد افزایش وزن در چوب صنوبر بالاتر از گونه کاج اسکاتلندی است که به دلیل تخلخل بیشتر صنوبر و حفرات سلولی بزرگتر آن است [۱۳]. با افزایش غلظت رزین در محلول‌های اشباع مقادیر ماندگاری نیز به صورت معنی‌داری افزایش یافت.

جدول ۵. مقادیر ماندگاری و درصد افزایش وزن چوب صنوبر تیمار شده با رزین ملامین فرمالدهید با غلظت‌های مختلف

مقادیر ماندگاری (کیلوگرم بر متر مکعب)	درصد افزایش وزن (درصد)	تیمارها	
		غلظت رزین اشباع	شاهد
-	-	-	شاهد
۴۲/۹۱ (۶/۷۴) a	۹/۶۴ (۰/۵۰) a	۷	تیمار با رزین MF
۱۱۰/۵۷ (۲۷/۴۵) bc	۲۷/۸۰ (۲/۵۱) bc	۱۵	
۱۴۱/۴۰ (۲۴/۸۳) c	۳۴/۳۰ (۲/۸۳) cd	۲۷	
۲۲۹/۳۱ (۴۳/۳۵) d	۵۳/۱۴ (۹/۰۱) e	۳۵	رزین MF صنعتی
۱۴۳/۶۱ (۲۷/۵۱) c	۳۱/۲۵ (۶/۳۰) bc	۲۷	

*حروف لاتین نشان‌دهنده نتایج آزمون گروه‌بندی دانکن است.

۳-۳. مطالعات میکروسکوپ

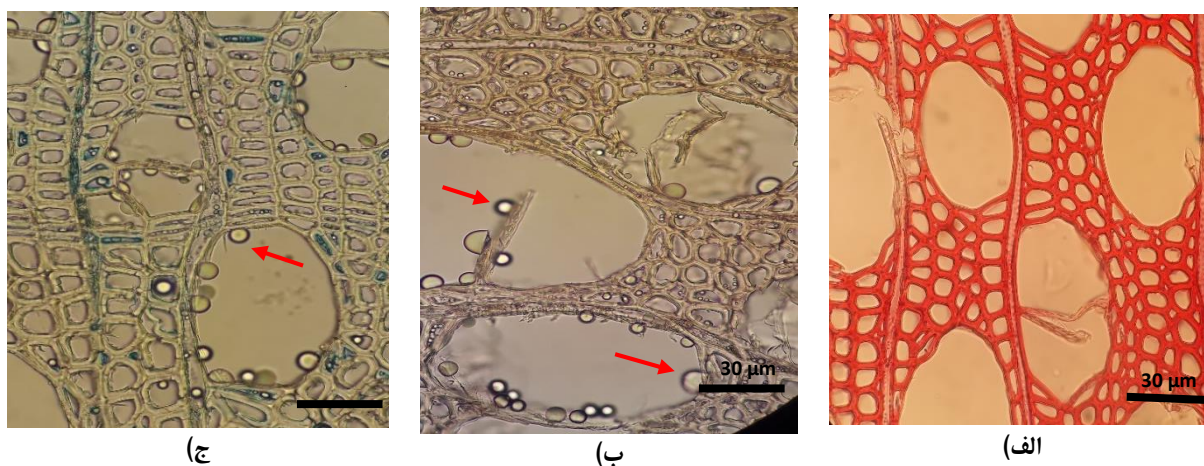
شکل ۱ نتایج مربوط به تصاویر میکروسکوپ نوری مقطع عرضی نمونه‌های شاهد، تیمار شده با رزین MF ساخته شده در آزمایشگاه و نمونه‌های تیمار شده با MF صنعتی را نشان می‌دهد. در نمونه‌های تیمار شده با رزین MF در حفرات سلولی

کریستال‌هایی از رزین پخته شده مشاهده می‌شود. در مطالعه Altgen و همکاران (۲۰۲۰) که به منظور بررسی شرایط پخت رزین MF داخل چوب کاج انجام شد، مشخص شد که رزین MF پخته شده در شرایط مرطوب داخل حفرات سلولی بر روی دیواره‌های داخلی حفرات رسوب کرده و تشکیل کریستال می‌دهد [۲۴]. در تصاویر میکروسکوپ قطبی شده در شکل ۲ تصاویر به دست آمده با میکروسکوپ پلاریزه نمایش داده شده است. دیواره‌های سلولی نمونه‌های اشباع شده با رزین MF و نمونه‌های اشباع شده با رزین MF صنعتی نسبت به چوب تیمار نشده به صورت روشن‌تر (براق) قابل مشاهده است. این امر به دلیل وجود رزین پلیمر شده داخل دیواره سلول‌های چوبی است که بعد از پخت رزین به کریستال‌های ملامین تبدیل شده‌اند. یافته‌های مطالعه Gindl و همکاران (۲۰۰۳) نیز نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌کند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که بخش قابل توجهی از رزین MF محلول در آب، پتانسیل نفوذ به دیواره سلولی و لایه میانی سوزنی را دارند [۵]. در نمونه‌های تیمار شده با رزین MF، با توجه به وجود کریستال‌های ملامین، مقطع برداری به سختی انجام شد. همچنین وجود پلیمر پخته شده رزین MF مانع از رنگ‌آمیزی مقاطع به هنگام آماده‌سازی آن‌ها شد. در مقاطع مماسی، کریستال‌ها بر روی دیواره آوندها قابل مشاهده است (شکل ۳).

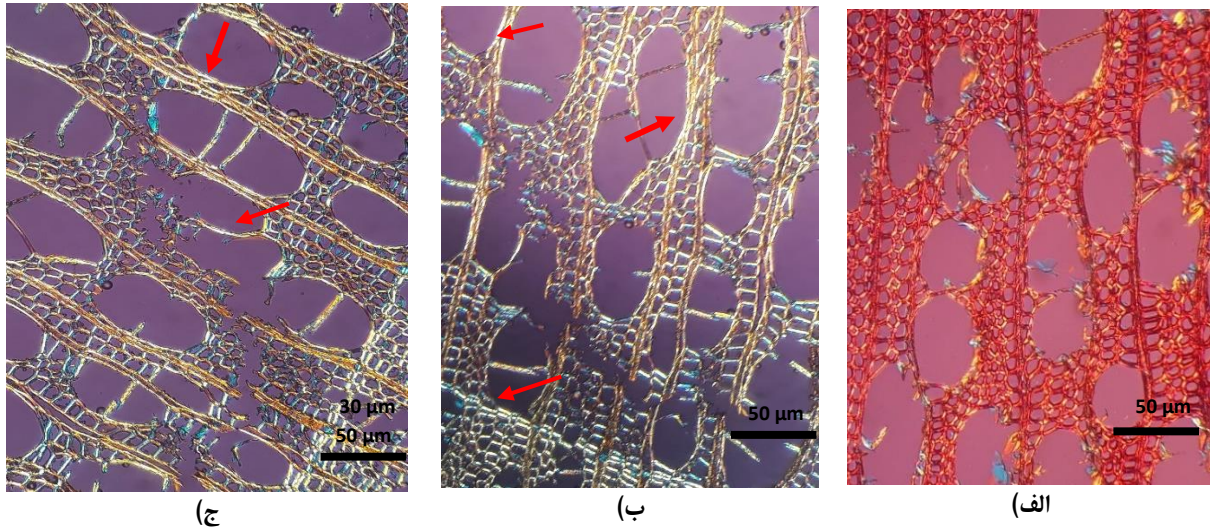
۳-۴. مقاومت به پوسیدگی فارچی

۳-۴-۱. مقاومت به پوسیدگی نمونه‌های تیمار شده با غلظت‌های متفاوت رزین MF

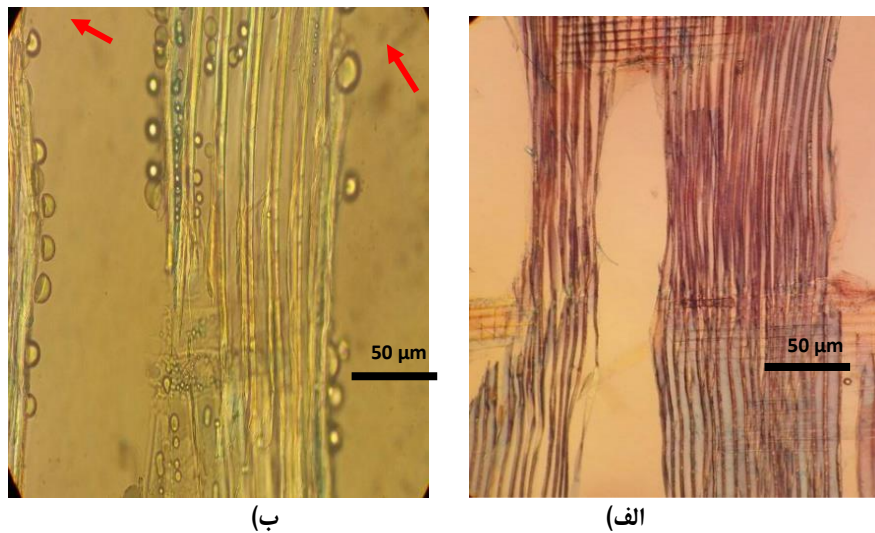
در جدول ۶ نتایج آزمون آبشویی ۱۴ روزه طبق استاندارد EN 84 ارائه شده است. براساس نتایج، نمونه‌های تیمار شده نسبت به نمونه شاهد مقدار آبشویی بالاتری داشتند. مقدار بیشتر کاهش وزن نمونه‌های تیمار شده می‌تواند به دلیل آبشویی رزین‌های پلیمر نشده و یا الیگومرهای آن باشد. به طور کلی، با توجه به مقادیر WPG، میزان کاهش وزن بعد از آبشویی ناچیز بود که نشان‌دهنده پخت مناسب رزین در مرحله گیرایی آن می‌باشد. بالاترین مقدار کاهش وزن مربوط به تیمار چوب با غلظت رزین ۲۷ درصد همراه با اسید بوریک بود که می‌تواند دو دلیل محتمل برای آن عنوان کرد: ۱- عدم تثبیت کامل اسید بوریک در رزین و ۲- اثر منفی اسید بوریک بر روی پخت رزین.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ نوری مقطع عرضی نمونه شاهد (الف)، نمونه اشباع شده با رزین MF (ب) و نمونه‌های تیمار شده با رزین MF صنعتی (ج).



شکل ۲. میکروسکوپ قطبی شده برای نمونه شاهد (الف)، نمونه اشباع شده با رزین MF (ب) و نمونه‌های تیمار شده با رزین MF صنعتی (ج).



شکل ۳. تصاویر مقطع شعاعی نمونه شاهد (الف) و نمونه اشباع شده با رزین MF (ب)

جدول ۶. مقادیر کاهش وزن نمونه‌ها بعد از آبشویی برای تیمارهای با غلظت‌های مختلف رزین

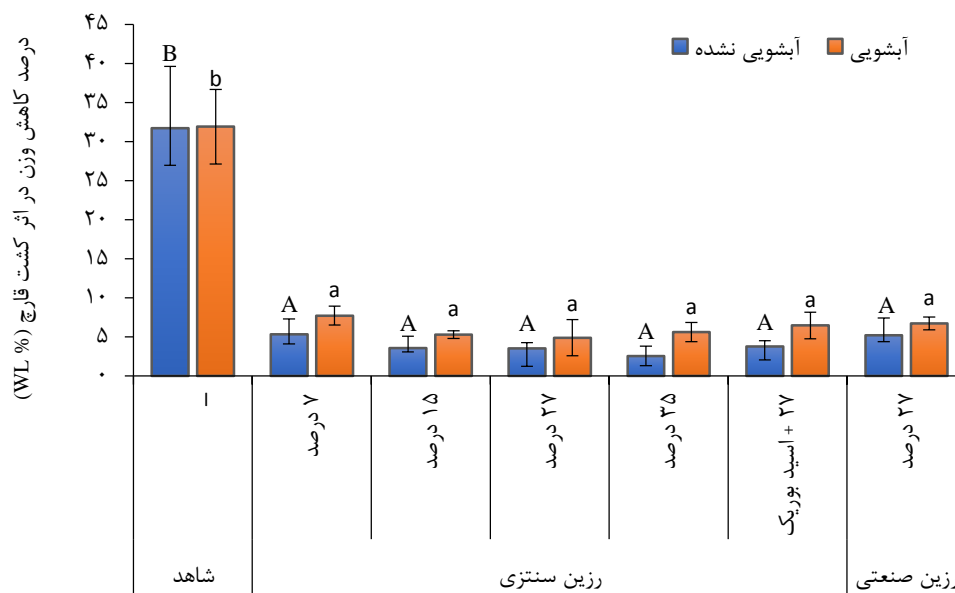
رزین صنعتی	رزین سنتز شده در آزمایشگاه					شاهد	
۲۷	۲۷ + اسید بوریک	۳۵	۲۷	۱۵	۷	-	غلظت رزین (درصد)
۱/۳۵	۲/۹۲	۱/۶۴	۲/۰۶	۱/۵۸	۱/۸۵	۰/۸۴	میانگین کاهش وزن بر اثر
(۰/۳۵)	(۰/۴۱)	(۰/۴۱)	(۰/۸۳)	(۰/۳۶)	(۰/۸۷)	(۰/۳۵)	آبشویی (درصد)

*مقادیر داخل پرانتز انحراف معیار است.

کاهش وزن ناشی از پوسیدگی قارچی در شکل ۴ گزارش شده است. نتایج نشان داد اصلاح چوب با رزین MF به‌طور معنی‌داری مقاومت چوب در برابر قارچ مولد پوسیدگی سفید (قارچ رنگین‌کمان) را افزایش می‌دهد. مقادیر کاهش وزن نمونه‌های شاهد چوب صنوبر و نمونه‌های حادپذیر چوب راش به‌ترتیب ۳۱/۷۴ درصد و ۲۸/۹۸ درصد (بیش از ۲۰ درصد) اندازه‌گیری شد، این موضوع نشان‌دهنده سالم بودن محیط آزمون قارچ می‌باشد. طبق استاندارد EN 113، تیمارهایی که موجب کاهش وزن کمتر

از ۳ درصد در برابر پوسیدگی قارچی می‌شوند را می‌توان تیمارهای مؤثر قلمداد نمود. طبق همین دسته‌بندی، تیمار نمونه‌ها با رزین MF در غلظت ۲۷ درصد را می‌توان تیمار مؤثر عنوان کرد. البته باید یادآور شد، تفاوت زیادی بین غلظت‌های مختلف وجود ندارد و آزمون دانکن همه آن‌ها را در یک گروه قرار داده است. اگر چه طبق نتایج تجزیه واریانس، اختلاف معنی‌داری بین میانگین‌ها وجود داشت، اما آزمون دانکن نشان داد که این اختلاف معنی‌دار، بین نمونه شاهد با سایر تیمارها است. این نشان می‌دهد رزین MF در غلظت‌های پایین نیز توانایی بهبود مؤثر مقاومت به پوسیدگی را دارد. سه عامل می‌تواند باعث مقاومت بالاتر چوب‌های تیمار شده با رزین MF و رزین‌های آمینی در برابر قارچ‌های عامل پوسیدگی باشد. آب‌گریزی بیشتر چوب به دلیل تشکیل پلیمر MF در داخل چوب و مسدود شدن گروه‌های هیدروکسیل، مسدود شدن فیزیکی حفرات چوب و جلوگیری از ورود میسیلیوم قارچ و وجود فرمالدهید آزاد در رزین که برای قارچ‌ها سمی می‌باشد [۲۵، ۲۶ و ۲۷]. اضافه نمودن اسید بوریک ۰/۵ درصد نیز اثر چندانی بر روی تقویت مقاومت به پوسیدگی نمونه‌های تیمار شده نداشت.

با توجه به رده‌بندی دوام طبیعی طبق استاندارد EN 350 (۲۰۱۶)، نمونه‌های تیمار نشده صنوبر در رده بی‌دوام قرار می‌گیرند (رده پنجم)، این در حالی است که نمونه‌های تیمار شده در رده‌های اول و دوم جای می‌گیرند. Furuno و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که اصلاح چوب با رزین PF، مقاومت چوب را در برابر قارچ مولد پوسیدگی قهوه‌ای (*Tyromyces chioneus*) و سفید (*Coriolus Versicolor*) افزایش می‌دهد. ایشان دلایل این موضوع را کاهش گروه‌های قطبی در چوب، پراکنش مناسب رزین بین دیواره‌های سلولی و حفرات چوب و در نتیجه پر شدن حفرات و ایجاد مانع در برابر نفوذ قارچ ذکر کرده‌اند [۲۷]. نکته قابل توجه، عدم کاهش چشم‌گیر مقاومت نمونه‌ها در برابر پوسیدگی قارچی پس از آزمون آبشویی است. این امر می‌تواند به دلیل عدم انحلال کریستال‌های MF در محیط‌های آبی بعد از پخت مناسب رزین باشد. رزین ترموست با الیاف چوب واکنش می‌دهد و پلیمرهای شبکه تولید می‌کند، قارچ‌ها به دلیل اتصال متقاطع رزین و چوب نمی‌توانند به راحتی به زیرلایه نفوذ کنند.



شکل ۴. مقادیر کاهش وزن نمونه‌های شاهد و تیمار شده در برابر پوسیدگی قارچی در غلظت‌های مختلف

مقادیر درصد رطوبت نمونه‌های آزمونی بعد از بررسی مقاومت به پوسیدگی در جدول ۷ خلاصه شده است. مقادیر رطوبت نمونه‌ها در پایان آزمون الزامات استاندارد (۱۹۹۶) EN113 را رعایت می‌کند. طبق این استاندارد، رطوبت نمونه‌ها در پایان آزمون برای نمونه‌های دارای کاهش وزن کمتر از ۳ درصد، باید بین ۲۰ تا ۸۰ درصد باشد. به‌طور کلی در این آزمون هیچ نمونه‌ای با رطوبت کمتر از ۲۰ درصد و بالاتر از ۸۰ درصد وجود نداشت.

جدول ۷. درصد رطوبت پایان دوره تست قارچ در تیمارهای انجام شده با غلظت‌های مختلف رزین

شاگرد	رزین سنتز شده در آزمایشگاه					رزین صنعتی
غلظت رزین (درصد)	۷	۱۵	۲۷	۳۵	۲۷ + اسید بوریک	۲۷
آبشویی نشده	۳۰/۹۸	۶۰/۱۳	۴۹/۰۷	۵۳/۴۵	۴۹/۶۰	۴۵/۰۶
آبشویی شده	۵۱/۴۸	۴۵/۷۳	۵۳/۰۹	۳۷/۳۷	۷۰/۶۰	۴۴/۸۲

۳-۴-۲. مقاومت به پوسیدگی نمونه‌های تیمار شده با رزین‌های تولید شده در نسبت‌های مولی مختلف

در این بخش، اثر تیمار نمونه‌های چوبی با رزین MF با نسبت‌های مولی متفاوت (ملازمین: فرمالدهید) و اضافه نمودن اسید بوریک روی مقاومت به پوسیدگی نمونه‌ها در غلظت ۲۷ درصد بررسی شد. نتایج کاهش وزن ناشی از آبشویی در جدول ۸ ارائه شده است. کاهش وزن ناشی از آبشویی به‌طور میانگین، ۲ تا ۳/۵ درصد بود. با افزایش نسبت فرمالدهید به ملازمین، میزان آبشویی افزایش پیدا کرد، اما اختلاف‌ها معنی‌دار نبود. بیشترین درصد آبشویی برابر ۳/۳ درصد در تیمار انجام شده با رزین MF با نسبت ۱:۲ به‌همراه اسید بوریک و کمترین درصد آبشویی برابر با ۲/۰۳ درصد در تیمار انجام شده با رزین MF با نسبت ۱:۵ بود.

جدول ۸. مقادیر کاهش وزن نمونه‌ها بر اثر آبشویی برای تیمارهای مربوط به رزین‌های با نسبت‌های مولی مختلف

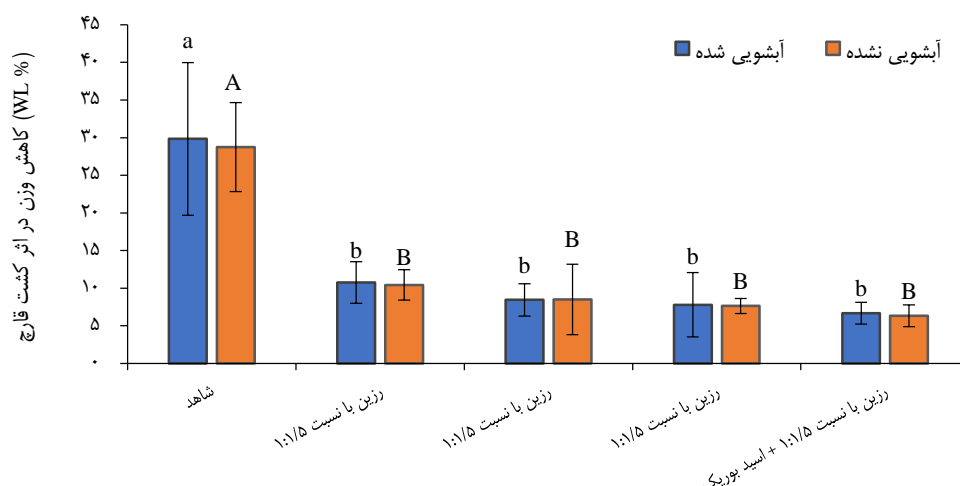
شرح تیمار	نسبت مولی مختلف (فرمالدهید : ملازمین)			
نسبت ملازمین به فرمالدهید	۱:۱/۵	۱:۲	۱:۳	۱:۲ + بوریک اسید
میانگین کاهش وزن بر اثر آبشویی (درصد)	۲/۰۳ (۰/۶۱)	۲/۵ (۰/۸۹)	۳/۲ (۰/۵۳)	۳/۳ (۰/۶۹)

رطوبت پایان دوره این دسته از نمونه‌ها بعد از آزمون مقاومت به پوسیدگی در جدول ۹ ارائه شده است. رطوبت نهایی نمونه‌های مورد بررسی در محدوده الزامات استاندارد EN 113 بود.

جدول ۹. درصد رطوبت پایان دوره نمونه‌ها قبل و بعد از آبشویی برای تیمارهای مربوط به رزین‌های با نسبت‌های مولی مختلف

شرح تیمار	نسبت مولی مختلف (فرمالدهید : ملازمین)				شاگرد
نسبت ملازمین به فرمالدهید	۱:۱/۵	۱:۲	۱:۳	۱:۲ + بوریک اسید	
آبشویی نشده	۳۹/۴۵ ± ۲/۸۴	۳۷/۴۹ ± ۶/۲۹	۳۰/۷۶ ± ۷/۷۰	۴۱/۶۱ ± ۷/۵	۲۷/۷۹ ± ۷/۴۰
آبشویی شده	۴۰/۳۹ ± ۶/۲۲	۳۷/۰۹ ± ۲/۸۰	۴۰/۲۷ ± ۸/۳۰	۴۱/۸۷ ± ۴/۲۷	۳۳/۰۷ ± ۶/۰۷

استفاده از رزین‌های MF با نسبت‌های مولی مختلف و همچنین افزودن اسید بوریک (به‌عنوان آفت‌کش مکمل) اثر معنی‌داری روی مقاومت به پوسیدگی نمونه‌ها داشت (شکل ۵). همان‌طور که ملاحظه می‌شود کمترین مقدار کاهش وزن در تیمار با نسبت مولی ۱:۳ و یا تیمار با نسبت مولی ۱:۲ حاوی اسید بوریک (۲ درصد وزن جامد چسب) دیده شد. طبق نتایج تجزیه واریانس، اختلاف معنی‌داری بین تیمار شاهد با سایر تیمارها وجود داشت ($\text{sig} = 0/000$). اسیدبوریک یک قارچ‌کش و حشره‌کش مؤثر است و در مقادیر جذب کم نیز بسیار اثرگذار است، اما به‌دلیل آبشویی برای مصارف بیرونی استفاده نمی‌شود [۲۸]. استفاده ترکیبی از رزین MF و اسید بوریک سبب شد تا دوره آبشویی اثری بر روی مقاومت به پوسیدگی نمونه‌ها نداشته باشد. در واقع رزین MF باعث جلوگیری از آبشویی اسید بوریک شده است، البته قضاوت در این مورد به‌دلیل هم‌پوشانی اثر رزین کمی دشوار است و نیاز به تحقیقات تکمیلی دارد. Bridaux و همکاران (۲۰۰۱) در مطالعه‌ای عنوان کردند که استفاده از خط چسب MUF باعث جلوگیری از آبشویی بورات‌ها از لایه‌های تیمار شده در ساخت تخته‌لایه می‌شود [۲۹]. Lukowsky (۲۰۰۲) یکی از دلایل مقاومت به پوسیدگی چوب‌های تیمار شده با رزین‌های آمینی را کاهش فعالیت آنزیمی قارچ‌ها به‌علت انتشار فرمالدهید از رزین‌ها عنوان کرده‌اند که تا حدودی سمی بودن آن برای قارچ و تا حدودی نیز به‌دلیل واکنش آن با آنزیم‌های قارچ است [۳۰].



شکل ۵. مقادیر کاهش وزن نمونه‌های شاهد و تیمار شده در برابر پوسیدگی قارچی در نسبت‌های مختلف

۴. نتیجه‌گیری

در تیمار چوب صنوبر با رزین MF، با افزایش غلظت رزین، مقدار WPG به صورت معنی‌داری افزایش می‌یابد. تیمار با غلظت‌های ۷، ۱۵، ۲۷ و ۳۵ درصد MF به ترتیب باعث بارگذاری تقریبی ۱۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درصد رزین در چوب شد. مطالعه با میکروسکوپی نوری و میکروسکوپ مجهز به نور قطبی شده، حضور کریستال‌های ناشی از پخت رزین در دیواره و حفرات سلولی را نشان داد. نتایج آزمون مقاومت به پوسیدگی نشان داد که اصلاح چوب صنوبر با رزین MF به طور معنی‌داری مقاومت آن را در برابر پوسیدگی سفید حتی بعد از آیشویی افزایش می‌دهد. افزایش غلظت رزین از ۷ به ۳۵ درصد، باعث تفاوت معنی‌دار در مقاومت به پوسیدگی نمونه‌ها نشد. بیشترین مقدار کاهش وزن در نمونه‌های شاهد چوب صنوبر مشاهده شد که برابر با ۳۱/۷۴ درصد بود (طبقه بی دوام)، کمترین مقدار کاهش وزن نیز در نمونه‌های اصلاح شده با رزین MF در غلظت ۳۵ درصد مشاهده شد (طبقه خیلی بادوام). نتایج نشان داد که غلظت‌های پایین رزین، مقاومت به پوسیدگی قابل قبولی را ایجاد می‌کند که با افزایش غلظت رزین تفاوت معنی‌داری ایجاد نمی‌شود. بنابراین برای صنعت اصلاح چوب ضروری نیست از غلظت‌های بالا برای بهبود مقاومت بیولوژیک استفاده شود. نتایج آزمون مقاومت به پوسیدگی روی نمونه‌های تیمار شده با رزین‌های حاوی نسبت‌های مولی متفاوت نشان داد، اگر چه تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مختلف وجود ندارد اما افزایش نسبت فرمالدهید، موجب بهبود دوام نمونه‌ها در برابر قارچ عامل پوسیدگی (به ویژه نسبت به نمونه‌های کنترل) می‌شود. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت، رزین MF پتانسیل نفوذ به دیواره سلولی و حفرات آوندی چوب را دارد. اصلاح چوب با رزین MF با حفظ رنگ اولیه چوب، نپذیری، جذب آب و واکنش‌دهی آن را کاهش می‌دهد. همچنین پتانسیل بالایی در بهبود مقاومت به پوسیدگی چوب در برابر قارچ‌های عامل پوسیدگی دارد.

۵. منابع

- [1] Sandberg, D., Kutnar, A., Karlsson, O., & Jones, D. (2021). Wood modification technologies: principles, sustainability, and the need for innovation. CRC Press. 10(6): 895.
- [2] Hill, C.A. (2007). Wood modification: chemical, thermal and other processes (Vol. 5). John Wiley & Sons.
- [3] Yongfeng, L. (2011). Wood-Polymer Composites, Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials, Dr. Pavla Tesinova (Ed.), ISBN: 978-953-307-449-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-composite-materials-analysis-of-natural-and-man-made-materials/wood-polymer-composites>
- [4] Buchelt, B., Dietrich, T., & Wagenführ, A. (2012). Macroscopic and microscopic monitoring of swelling of beech wood after impregnation with furfuryl alcohol. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(6): 865-869.

- [5] Gindl, W., Zargar-Yaghubi, F., & Wimmer, R. (2003). Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin. *Bioresource Technology*, 87(3): 325-330.
- [6] Mai, C., & Militz, H. (2004). Modification of wood with silicon compounds. Inorganic silicon compounds and sol-gel systems: a review. *Wood Science and Technology*, 37(5): 339-348.
- [7] Reinprecht, L. (2016). Wood deterioration, protection and maintenance. John Wiley & Sons.
- [8] Habibzadeh, S., Hoping, U., Maestro Farahani, M. (2003). Introduction of Wood Polymer Composites and its use as a single-use tool. SADHE02_694, The 2nd National Conference on Sustainable Agriculture and Environment. 278, 123968.
- [9] Sandberg, D., Kutnar, A., & Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies-a review. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 10(6): 895.
- [10] Schneider, M.H., & Brebner, K.I. (1985). Wood-polymer combinations: The chemical modification of wood by alkoxysilane coupling agents. *Wood Science and Technology*, 19(1): 67-73.
- [11] Jeong, B., Park, B. D., & Causin, V. (2019). Influence of synthesis method and melamine content of urea-melamine-formaldehyde resins to their features in cohesion, interphase, and adhesion performance. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 79: 87-96.
- [12] Ahmadi, P., Efhamisizi, D., Pourtahmasi, K., & Izadyar, S. (2019). The investigation of physico-mechanical characteristics of poplar wood impregnated with melamine formaldehyde resin. *Forest and Wood Products*, 72(3): 249-261.
- [13] Altun, S., & Tokdemir, V. (2016). Modification with melamine formaldehyde and melamine-urea formaldehyde resin to improve the physical and mechanical properties of wood. *BioResources*, 12(1): 586-596.
- [14] Gindl, W., Zargar-Yaghubi, F., & Wimmer, R. (2003). Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin. *Bioresource Technology*, 87(3): 325-330.
- [15] Gindl, W., Müller, U., & Teischinger, A. (2007). Transverse compression strength and fracture of spruce wood modified by melamine-formaldehyde impregnation of cell walls. *Wood and Fiber Science*, 35(2): 239-246.
- [16] Gindl, W., & Gupta, H.S. (2002). Cell-wall hardness and Young's modulus of melamine-modified spruce wood by nano-indentation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(8): 1141-1145.
- [17] Hansmann, C., Deka, M., Wimmer, R., & Gindl, W. (2006). Artificial weathering of wood surfaces modified by melamine formaldehyde resins. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 64(3): 198-204.
- [18] Gindl, W., Hansmann, C., Gierlinger, N., Schwanninger, M., Hinterstoisser, B., & Jeronimidis, G. (2004). Using a water-soluble melamine-formaldehyde resin to improve the hardness of Norway spruce wood. *Journal of Applied Polymer Science*, 93(4): 1900-1907.
- [19] Deka, M., Gindl, W., Wimmer, R., & Christian, H. (2007). Chemical modification of Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst) wood with melamine formaldehyde resin. *Indian Journal of Chemical Technology*, 14: 134-138.
- [20] ASTM D1084-16, Standard Test Methods for Viscosity of Adhesives, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.
- [21] ASTM D4426-01(2013). Standard Test Method for Determination of Percent Nonvolatile Content of Liquid Phenolic Resins Used for Wood Laminating, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org.
- [22] EN 113., 1996. Wood preservatives—Test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes—Determination of the toxic values.
- [23] EN 84., 1997. Wood preservatives—accelerated ageing of treated wood prior to biological testing. Leaching procedure
- [24] Altgen, M., Altgen, D., Klüppel, A., & Rautkari, L. (2020). Effect of curing conditions on the water vapor sorption behavior of melamine formaldehyde resin and resin-modified wood. *Journal of Materials Science*, 55(3): 11253-11266.

- [25] Georg, B., Susanne, B., Antje, G., & Holger, M. (2018) Improvement of mechanical properties of thermally modified hardwood through melamine treatment. *Wood Material Science and Engineering*, 13(5): 262-270.
- [26] Kielmann, B.C., Adamopoulos, S., Militz, H., & Mai, C. (2014). Decay resistance of ash, beech and maple wood modified with N-methylol melamine and a metal complex dye. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 89: 110-114.
- [27] Furuno, T., Imamura, Y., & Kajita, H. (2004). The modification of wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin and resin penetration into wood cell walls. *Wood Science and Technology*, 37(5): 349-361.
- [28] Obanda, D. N., Shupe, T. F., & Barnes, H. M. (2008). Reducing leaching of boron-based wood preservatives—A review of research. *Bioresource Technology*, 99(15): 7312-7322.
- [29] Bridaux, V., Charrier, B., Fauroux, N., Charrier, F., & Goncalvez, J. (2001). Addition of boron based compound in the LVL glue-line: effect on the mechanical properties and the leaching of boron. *Holzforschung*, 55(5): 559-562.
- [30] Lukowsky, D. (2002). Influence of the formaldehyde content of waterbased melamine formaldehyde resins on physical properties of Scots pine impregnated therewith. *European Journal of Wood and Wood Products*, 60(5): 349-355.