



University of Tehran

Performance of beech wood modified with dimethylol dihydroxyethylene urea (DMDHEU) against accelerated weathering

Zahra Rezaei¹ | Asghar Tarmian^{2*} | Aisona Talaei³

1. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: zahrarezaei@ut.ac.ir

2. Corresponding author, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: tarmian@ut.ac.ir

3. Department of Wood Science Engineering, Faculty of Materials Engineering and Interdisciplinary Science, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: talaei.srttu@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received: 20 August 2024

Revised: 27 October 2024

Accepted: 30 October 2024

Published online: 15 December 2024

Keywords:

FTIR spectroscopy,

mDMDHEU,

Water repellency,

Weathering,

Wood modification.

ABSTRACT

The performance of beech wood modified with methylolated dimethylol dihydroxyethylene urea (mDMDHEU), with low formaldehyde emission, against weathering was investigated. Methylolated dimethylol dihydroxyethylene urea, at a concentration of 30%, and $MgCl_2$ as a catalyst at 5% by weight were used. After impregnation of the wood samples via the vacuum-pressure process, the samples were cured under superheated steam conditions (100°C for 36 hours) and in an oven (120°C for 24 hours). The weathering resistance of the samples was evaluated under accelerated weathering conditions for 750 hours. The results showed that the weight percent gain (%WPG) was higher in the oven curing method due to the higher treatment temperature; however, the superheated steam curing method showed better performance against weathering. The highest water absorption and swelling occurred in the control sample, while the lowest was observed in the oven-cured sample. The results indicated that the higher treatment temperature led to a further decrease in water absorption and an increase in dimensional stability. FTIR spectroscopy after weathering showed a reduction in the peak of aromatic rings in the modified samples, indicating that lignin was not effectively protected against weathering in any of the treatments. Compared to oven curing, curing with superheated steam resulted in greater water repellency of the surface and reduced changes in color and surface morphology caused by weathering.

Cite this article: Rezaei, Z., Tarmian, A., Talaei, A. (2024). Performance of beech wood modified with dimethylol dihydroxyethylene urea (DMDHEU) against accelerated weathering. *Journal of Forest and Wood Products*, 77 (3), 313-326. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.381075.1309>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.381075.1309>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

بررسی عملکرد چوب راش اصلاح‌شده با دی‌متیلول دی‌هیدروکسی اتیلن اوره (DMDHEU) در مقابل هوازگی تسریع‌شده

زهرا رضائی^۱ | اصغر طارمیان^{۲*} | آیسونا طلایی^۳

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: zahrarezaei@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: tarmian@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی صنایع چوب، دانشکده مهندسی مواد و علوم میان‌رشته‌ای، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران. ایران. رایانامه: talaei.srttu@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

عملکرد چوب راش اصلاح‌شده با دی‌متیلول دی‌هیدروکسی اتیلن اوره اصلاح‌شده (mDMDHEU) در مقابل هوازگی بررسی شد. از رزین دی‌متیلول دی‌هیدروکسی اتیلن اوره اصلاح‌شده با غلظت ۳۰ درصد و منیزیم کلراید به‌عنوان کاتالیزور به‌میزان ۵ درصد وزنی استفاده شد. پس از اشباع نمونه‌ها به روش خلاء-فشار، پخت رزین در شرایط بخار فوق داغ (دمای ۱۰۰ درجه به‌مدت ۳۶ ساعت) و آون (دمای ۱۲۰ درجه به‌مدت ۲۴ ساعت) انجام شد. مقاومت به هوازگی نمونه‌ها تحت شرایط هوازگی تسریع‌شده به‌مدت ۷۵۰ ساعت اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد درصد افزایش وزن در شرایط پخت در آون به‌دلیل دمای بالای تیمار بیشتر بود ولی پخت به روش بخار فوق داغ عملکرد مطلوب‌تری در مقابل هوازگی نشان داد. بیشترین میزان جذب آب و واکنشیدگی برای نمونه شاهد و کمترین آن برای تیمار پخت در آون بود. نتایج حاکی از آن است که دمای بالاتر تیمار منجر به کاهش بیشتر جذب آب و افزایش ثبات ابعادی شده است. بررسی طیف‌سنجی مادون قرمز پس از هوازگی نشان داد که ارتفاع پیک مربوط به حلقه‌های آروماتیک در نمونه‌های اصلاح‌شده نسبت به نمونه‌های اصلاح‌نشده به یک میزان کاهش یافته که نشان‌دهنده عدم حفاظت از لیگنین در هیچ یک از تیمارها، در برابر هوازگی است. در مقایسه با پخت به روش آون، پخت با بخار فوق داغ موجب آب‌گریزی بیشتر سطح و کاهش تغییرات رنگی و مورفولوژی سطح ناشی از هوازگی شد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵

کلیدواژه:

آب‌گریزی،

اصلاح چوب،

دی‌متیلول دی‌هیدروکسی اتیلن اوره اصلاح‌شده،

طیف‌سنجی مادون قرمز،

هوازگی.

استناد: رضائی؛ زهرا، طارمیان؛ اصغر، طلایی؛ آیسونا (۱۴۰۳). بررسی عملکرد چوب راش اصلاح‌شده با دی‌متیلول دی‌هیدروکسی اتیلن اوره (DMDHEU) در مقابل هوازگی

تسریع‌شده. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۷ (۳)، ۳۲۶-۳۱۳. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.381075.1309>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

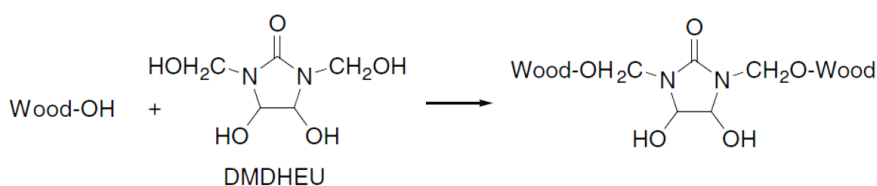
© نویسندگان.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.381075.1309>



۱. مقدمه

چوب یک پلیمر طبیعی تجزیه پذیر است و هنگامی که بدون هیچ گونه حفاظتی در فضای باز قرار می گیرد، در اثر عوامل زیستی و هوازدگی تخریب می شود [۱، ۲]. همچنین به دلیل حضور گروه های هیدروکسیل، قابلیت جذب و دفع رطوبت داشته که موجب تغییرات ابعادی در آن شده و کاربرد گسترده آن را محدود می کند [۳]. علاوه بر این، تنش ها و کرنش های غیریکنواخت ناشی از تغییرات رطوبت در چوب باعث ایجاد ترک و در نتیجه تنزل خواص مکانیکی و فیزیکی آن می شود [۴]. اگرچه پژوهش های بسیاری برای یافتن راه حل مناسب برای افزایش دوام چوب انجام شده و این پژوهش ها به نتایج خوبی نیز منجر شده اند، اما بسیاری از مواد حفاظتی پیشنهادی از لحاظ محیط زیست و سلامت انسان مورد تأیید نیستند. در نتیجه، ضروری است برای اجتناب از آثار سوء مواد و روش های حفاظتی، روند تحقیقات همسو با مسائل محیط زیستی باشد [۵]. روش های مختلفی از قبیل اصلاح حرارتی، شیمیایی و یا استفاده از مونومر و پلیمرهای مختلف برای اصلاح چوب پیشنهاد شده است [۶]. یکی از روش های اصلاح شیمیایی چوب، آغشته کردن با ترکیبات N-methylol است [۷]. ترکیبات N-methylol مانند دی‌متیلول دی‌هیدروکسی-اتیلن اوره به عنوان یک پوشش مقاوم در برابر چین و چروک در صنعت نساجی استفاده می شود. منسوجات سلولزی با توجه به ساختار شیمیایی آن ها (مؤلفه اصلی: سلولز) و الزامات مربوط به دوام، با چوب شباهت دارند. بنابراین انتظار می رود که این نوع ترکیبات مقاومت چوب را در برابر هوازدگی افزایش دهند، چون قادرند با اصلاح دیوار سلولی، چوب را از نظر ابعادی تثبیت کنند [۸، ۹]. در فرآیند اصلاح با این رزین، چوب تحت فشار زیاد با رزین اشباع شده و به دنبال آن عملیات خشک کردن و پخت رزین طی برنامه مشخصی در دمای بیشتر از ۱۰۰ درجه سانتی گراد انجام می شود که موجب شبکه ای شدن رزین می شود [۱۰]. گروه های عاملی واکنش دهنده در این مونومر همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، دو گروه هیدروکسی متیل (-CH₂-OH) هستند که با برقراری اتصالات عرضی با گروه های هیدروکسیل (-OH) سلولز و همی سلولز با چوب واکنش می دهند [۹].



شکل ۱. اتصال عرضی مونومرهای دی‌متیلول دی‌هیدروکسی اتیلن اوره با پلیمرهای دیوار سلولی [۹]

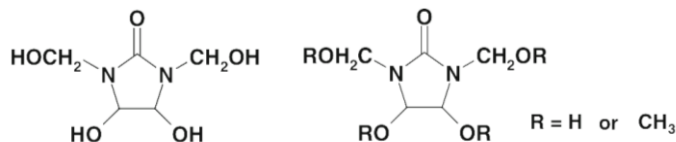
بهبود ویژگی ها، از جمله ثبات ابعادی، عمدتاً در اثر پر شدن میکروتخلخل دیوار سلول و مسدود شدن گروه های هیدروکسیل توسط ماده اصلاح کننده اتفاق می افتد. بدین ترتیب که متعاقب نفوذ رزین به داخل ساختار چوب، با دیوار سلول واکنش داده و تثبیت می شود [۶، ۷]. مرحله پخت رزین گامی مهم در فرآیند اصلاح چوب با این رزین به شمار می آید و عامل اصلی تعیین کننده کیفیت نهایی چوب اصلاح شده است [۸]. اخیراً پخت رزین تحت بخار فوق داغ در فشار اتمسفر و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد به عنوان یک راهکار برای پخت رزین در تخته های با ابعاد صنعتی پیشنهاد شده است [۸]. تحت شرایط بخار فوق داغ، قبل از اینکه عملیات خشک کردن شروع شود، دمای چوب به دمای پخت رزین رسیده و در نتیجه از توزیع غیریکنواخت ماده اصلاح کننده ممانعت می شود [۱۰]. در این پژوهش، تأثیر پخت با بخار فوق داغ بر مقاومت به هوازدگی تسریع شده چوب راش اشباع شده با دی‌متیلول دی‌هیدروکسی اتیلن اوره بررسی شد.

۲. روش شناسی پژوهش

۲-۱. مواد

تخته های مماسی چوب راش (*Fagus orientalis*) بدون عیب به ابعاد ۲۰ × ۱۰۰ × ۳۰۰ میلی متر (مماسی × شعاعی × طولی)، برای رسیدن به رطوبت ۱۲ درصد در اتاق کلیمانیزه (رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی گراد) قرار داده شدند.

رزین DMDHEU اصلاح شده با مقدار انتشار فرمالدهید کم با نام تجاری polycrease ECR (شکل ۲) با غلظت ۶۵ درصد از شرکت گلفام نسج آریا تهیه شد. مشخصات رزین Polycrease ECR در جدول ۱ نشان داده شده است. منیزیم کلرید شش آبه ($MgCl_2 \cdot 6 H_2O$) به عنوان کاتالیزور و آب دیونیزه نیز به عنوان حلال استفاده شد.



شکل ۲. ترکیب شیمیایی رزین: سمت چپ (DMDHEU, R=H) و سمت راست رزین اصلاح شده (mDMDHEU, R=CH₃) [۱۱]

جدول ۱. خصوصیات رزین Polycrease ECR [۱۲]

رنگ	نوع رزین	مدت زمان ژله‌ای شدن ثانیه	مدت زمان خشک شدن دقیقه	درجه حرارت بسیارش درجه سلسیوس	درجه حرارت خشک شدن درجه سلسیوس
زرد شفاف	مایع	۳۰-۴۰	۳-۴	۱۴۵-۱۵۵	۱۱۰-۱۳۰

۲-۲. اصلاح چوب

به منظور اشباع نمونه‌ها با رزین Polycrease ECR، در ابتدا رزین در دمای اتاق با آب دیونیزه به منظور رقیق‌سازی رزین و رساندن به غلظت ۳۰ درصد حل شد. منیزیم کلرید به عنوان کاتالیزور به میزان ۵ درصد وزن کل محلول استفاده شد. قبل از اشباع، مقاطع عرضی چوب با چسب اپوکسی اندود شده و همچنین وزن نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. تیمار نمونه‌ها با استفاده از روش خلاء-فشار انجام شد. برای اجرای این روش ابتدا نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه تحت خلاء به میزان ۶۰ میلی‌بار قرار گرفتند. پس از آن، محلول رقیق شده رزین به درون سیلندر تزریق و سپس فشاری به میزان ۵ بار به مدت ۴ ساعت روی محلول اشباع اعمال شد. پس از پایان فرآیند اشباع، نمونه‌ها از سیلندر خارج و وزن مرطوب پس از تیمار آن‌ها اندازه‌گیری شد. در ادامه نمونه‌ها برای پخت رزین در فویل آلومینیومی پیچیده شدند. فرآیند پخت رزین با دو روش به طور مجزا انجام شد. بخشی از نمونه‌ها به آون ۱۲۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت و بخشی برای اعمال بخار فوق داغ به اتوکلاو صنعتی (واقع در واحد هنر خم چوب شهرک صنعتی بهسان چوب احمدآباد مستوفی) تحت دمای ۱۰۰ درجه به مدت ۳۶ ساعت منتقل شدند. هدف از پخت در بخار فوق داغ یکنواختی نفوذ رزین DMDHEU در چوب با ابعاد بزرگ می‌باشد زیرا توزیع ناهموار منجر به ترک خوردگی شدید چوب تیمار شده پس از خشک شدن آن می‌شود. چوب راش تیمار شده به دلیل تنش‌های ناشی از خشک شدن تمایل زیادی به ایجاد ترک دارد. بنابراین، پخت در بخار فوق داغ موجب کاهش ترک‌های ناشی از خشک شدن چوب راش می‌شود. به علت وقوع تغییرات شیمیایی در ساختار چوب در دمای بالای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، روش اصلاح و خشک کردن باید با فرآیندهای نسبتاً ملایمی همراه باشد [۱۳]. به همین دلیل در این پژوهش برای پخت رزین در بخار فوق داغ، دما به ۱۰۰ درجه کاهش یافت و مدت زمان پخت به ۳۶ ساعت افزایش داده شد. پس از مرحله پخت پوشش آلومینیومی اطراف نمونه‌ها برداشته شده و به جهت جلوگیری از ترک برداشتن نمونه‌ها، فرآیند خشک کردن در کوره معمولی در دمای کم به روش جابجایی هوای گرم مطابق با برنامه چوب خشک کنی ارائه شده در جدول ۲ انجام شد.

۲-۳. بررسی آبشویی، درصد افزایش وزن، واکنش‌دهی ابعاد و جذب آب

به منظور بررسی مقاومت رزین در برابر آبشویی، آزمون آبشویی طبق استاندارد EN-84 برای خارج کردن رزین واکنش نداده از

چوب اجرا شد. برای اجرای آزمون ابتدا نمونه‌ها در آون آزمایشگاهی خشک شده و وزن خشک آنها اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها درون سیلندر اشباع قرار گرفته و به وسیله آب مقطر به روش خلاء-فشار (خلاء ۶۰ میلی بار به مدت ۳۰ دقیقه و سپس فشار ۵ بار به مدت ۲ ساعت) اشباع شده و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت در فشار اتمسفر غوطه‌ور شدند. این فرآیند به مدت ۳ روز ادامه پیدا کرد و سپس نمونه‌ها در آون آزمایشگاهی خشک شده و وزن خشک آنها مجدداً اندازه‌گیری شد. در نهایت، درصد افزایش وزن (WPG) نمونه‌ها به منظور اندازه‌گیری مقادیر بارگذاری رزین در داخل چوب با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$\text{WPG (\%)} = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

m_2 : وزن خشک نمونه اشباع شده (گرم) (پس از آبشویی) و m_1 : وزن خشک قبل اشباع (گرم)

جدول ۲. برنامه چوب خشک‌کنی استفاده شده برای خشک کردن چوب‌های اشباع شده با رزین [۲۵]

گام	رطوبت نمونه	دما (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی کوره (درصد)
۱	سبز	۴۰	۸۵
۲	۶۰	۴۰	۸۰
۳	۴۰	۴۰	۷۰
۴	۳۵	۴۵	۶۰
۵	۳۰	۴۵	۵۰
۶	۲۵	۵۰	۴۰
۷	۲۰	۶۰	۳۰
۸	۱۵	۶۵	۳۰

به منظور اندازه‌گیری واکنش‌پذیری ابعاد (S درصد) و درصد جذب آب (WA درصد)، پس از محاسبه وزن و حجم خشک، نمونه‌ها مطابق روش آبشویی ذکر شده توسط آب مقطر اشباع شده و سپس از سیلندر خارج و به مدت ۲۴ ساعت در فشار اتمسفر در آب غوطه‌ور شدند. پس از آن، مجدداً نمونه‌ها توزین و همچنین ابعاد آنها با کولیس اندازه‌گیری شد و واکنش‌پذیری حجمی و درصد جذب آب به ترتیب با استفاده از روابط ۲ و ۳ محاسبه شد:

$$S(\%) = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

V_2 : حجم نمونه بعد از غوطه‌وری در آب در زمان مشخص (میلی‌متر مکعب) و V_1 : حجم نمونه خشک شده در آون قبل از غوطه‌وری (میلی‌متر مکعب)

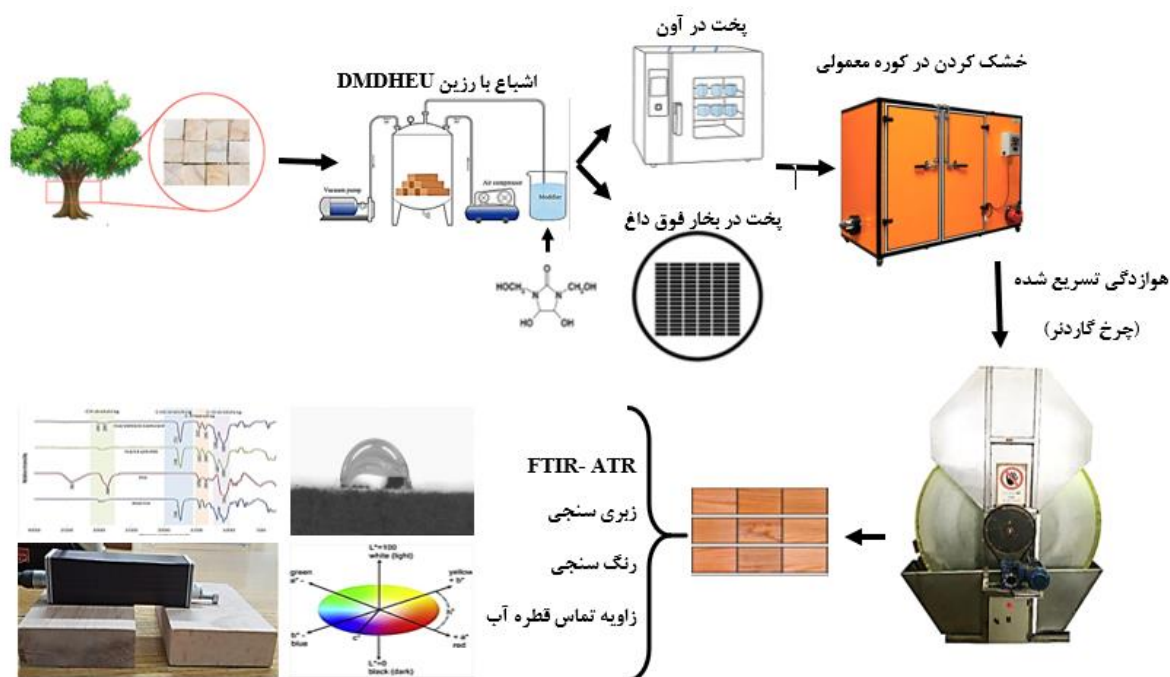
$$\text{WA (\%)} = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

m_2 : وزن نمونه بعد از غوطه‌وری در آب در زمان مشخص (گرم) و m_1 : وزن خشک نمونه قبل از غوطه‌وری در آب (گرم)

۲-۴. آزمون هوازدگی تسریع شده

این آزمون با استفاده از دستگاه هوازدگی گاردنر در آزمایشگاه حفاظت چوب گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران انجام شد. تحقیقات نشان داده است این دستگاه نسبت به هوازدگی طبیعی، ۱۲ بار سریع‌تر بوده و از طرفی نتایج آن نسبت به دستگاه‌های هوازدگی مدل QUV به هوازدگی طبیعی نزدیک‌تر است [۱۴]. نمونه‌های آزمونی مطابق استاندارد BS EN 927-6 [۱۵] پس از برش بینابینی به ابعاد ۱۵۰×۸۰×۲۰ میلی‌متر (مماسی × شعاعی × طولی) به مدت ۲ هفته در اتاق کلیما (با رطوبت

نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) متعادل‌سازی شدند. سپس یک لایه پوشش ضد آب در پنج سمت بدون پوشش نمونه‌ها اعمال شد. در این دستگاه، نمونه‌ها بر روی یک چرخ دوار نصب شده و سپس با چرخش تدریجی و آهسته، به‌طور پی در پی در چرخه‌های مشخص در معرض لامپ‌های شبیه‌ساز نور خورشید (در قسمت فوقانی دستگاه) و مخزن آب (در قسمت تحتانی دستگاه) قرار گرفت. مدت زمان هر چرخش کامل ۹۰ دقیقه و مدت زمان هوازدهی نمونه‌ها در این دستگاه، ۷۵۰ ساعت بود. نمونه‌ها پس از پایان دوره هوازدهی به مدت ۴۸ ساعت در فضای آزمایشگاه قرار داده شده و سپس در آن ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. پس از آن به مدت ۲ هفته در اتاق کلیما قرار داده شدند. آزمون‌های طیف‌سنجی ATR-FTIR، رنگ‌سنجی، زبری سطح و زاویه تماس قطره آب قبل و بعد از هوازدهی بر روی نمونه‌ها انجام شد. شمایی از مراحل انجام کار در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. شمایی از مراحل انجام کار

۲-۴-۱. طیف سنجی ATR-FTIR

به‌منظور بررسی تأثیر هوازدهی بر روی ساختار شیمیایی چوب، آزمون ATR-FTIR با استفاده از دستگاه مدل Tensor 27 ساخت شرکت Bruker آمریکا و در آزمایشگاه مرکزی پردیس علوم پایه دانشگاه تهران بر روی نمونه‌های چوبی قبل و پس از هوازدهی انجام شد. جهت انجام این آزمون نمونه‌هایی با ابعاد $10 \times 10 \times 2$ (مماسی \times شعاعی \times طولی) میلی‌مترمکعب تهیه شد. مطالعات ATR-FTIR در دامنه موجی ۴۰۰-۴۰۰۰ (عکس سانتی‌متر) انجام شد و سپس نتایج با استفاده از نرم‌افزار اختصاصی IR PAL به‌دست آمد.

۲-۴-۲. رنگ‌سنجی

برای اندازه‌گیری شدت تغییر رنگ نمونه‌ها پیش و پس از هوازدهی، از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل NRF145 ساخت کشور چین مطابق استاندارد ASTM D-224 و براساس سیستم $CIE-L^*a^*b^*$ انجام شد. با تابش رنگ بر روی نمونه‌ها و براساس نور منعکس شده پارامترهای a^* ، b^* ، L^* و h^* قبل و بعد از هوازدهی اندازه‌گیری شد. در این بررسی، بر روی هر نمونه آزمون، تغییرات رنگ در نقاطی از پیش تعیین شده در سطح هر نمونه قبل و بعد از هوازدهی توسط دستگاه مذکور سنجیده و میزان تغییرات روشنایی (ΔL^*).

میزان تغییرات قرمزی (Δa^*)، میزان تغییرات زردی (Δb^*) و شاخص تغییرات کلی رنگ (ΔE^*) با استفاده از روابط ۴ تا ۷ اندازه‌گیری شد.

$$\Delta L^* = L_r^* - L_1^* \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\Delta a^* = a_r^* - a_1^* \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\Delta b^* = b_r^* - b_1^* \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

پارامترهای L_1^* ، a_1^* و b_1^* مربوط به تغییر رنگ سطح نمونه‌ها قبل از هوازگی و پارامترهای L_2^* ، a_2^* و b_2^* مربوط به تغییر رنگ سطح نمونه‌ها بعد از هوازگی می‌باشد.

۲-۴-۳. زبری سطح

اندازه‌گیری کیفیت سطح به روش پروفیلومتری و براساس تکنیک سوزنی با استفاده از دستگاه زبری‌سنج مدل SJ-201P انجام شد. میزان زبری نمونه‌ها در جهت عمود بر الیاف اندازه‌گیری شده و پارامترهای R_a (میانگین زبری)، R_z (ارتفاع بلندترین قله تا عمیق‌ترین دره) و R_q (زبری مؤثر) توسط این دستگاه ثبت شد. برای مقایسه زبری نمونه‌ها قبل و پس از هوازگی، زبری نسبی براساس رابطه ۸ محاسبه شد.

$$R = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن R : زبری نسبی، R_2 : پارامتر زبری بعد از هوازگی و R_1 : پارامتر زبری قبل از هوازگی است.

۲-۴-۴. زاویه تماس قطره آب

به‌منظور ارزیابی میزان ترشوندگی و آب‌گریزی، اندازه‌گیری زاویه تماس قطره آب به روش قطره‌گذاری مکانیکی آب دیونیزه انجام شد. برای این منظور، قبل و بعد از هوازگی نمونه‌ها، زاویه تماس به‌مدت ۱۲۰ ثانیه با حجم قطره ۲۰ میکرولیتر و با تعداد ۶ تکرار برای هر نمونه محاسبه شد. طی اندازه‌گیری، شکل قطره آب در سطح نمونه‌ها با دوربین CCD ثبت شده و تصاویر به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار Image-J 1.46 آنالیز و زاویه تماس قطره آب محاسبه شد.

۲-۵. تجزیه و تحلیل آماری

گزاره‌های توصیفی شامل میانگین و انحراف معیار در نرم‌افزار اکسل، نسخه ۲۶ و آزمون‌های آماری شامل تجزیه واریانس یک‌طرفه، آزمون گروه‌بندی دانکن و آزمون T مستقل در سطح معنی داری ۰/۰۵ با استفاده از نرم‌افزار SPSS 26 انجام گرفت.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. مقادیر درصد افزایش وزن، واكشیدگی ابعاد و جذب آب

نتایج مربوط به درصد افزایش وزن (WPG) در اثر تیمار نمونه‌ها با رزین mDMDHEU و تحت شرایط مورد استفاده در این پژوهش، قبل و پس از آبشویی و همچنین مقادیر واكشیدگی ابعاد (S) و جذب آب (WA) در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج آزمون

مستقل T نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین میانگین مقادیر درصد افزایش وزن نمونه‌ها قبل از آبخوئی وجود دارد ($p < 0.000$). اما پس از آبخوئی اختلاف معنی‌داری بین میانگین‌ها مشاهده نشد. از آنجا که روش اتصال به بسپارهای تشکیل‌دهنده دیوار سلولی چوب وابستگی شدیدی با دما دارد [۱۶] در پخت به روش آون، به دلیل دمای بالاتر تیمار (۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) درصد افزایش وزن بیشتری مشاهده شد. گروه‌های هیدروکسی‌متیل در ملکول‌های mDMDHEU از طریق ایجاد پیوندهای عرضی با گروه‌های هیدروکسیل پلیمرهای چوب واکنش داده و یا از طریق گروه‌های هیدروکسی‌متیل فعال تحت واکنش‌های خود تراکمی قرار می‌گیرد. این واکنش‌ها منجر به تشکیل رزینی می‌شود که به دلیل اندازه آن قابل آبخوئی نیست و آبخوئی نمونه اصلاح‌شده صرفاً به جهت خارج ساختن مونومرهای واکنش نداده از چوب انجام می‌شود [۴]. البته طی دوره آبخوئی، دیوار سلولی کاملاً واکنشیده شده و فرصت کافی برای هیدرولیز گروه‌های همی‌استال فراهم می‌شود که گرمادهی در آون به فرآیند هیدرولیز و تشکیل گروه‌های هیدروکسیل جایگزین کمک می‌کند [۷]. شرایط پخت نمونه‌های تیمار شده با دو سطح متفاوت نشان داد که در نمونه‌های پخته شده در آون میزان آبخوئی کاهش پیدا کرده است. بنابراین به نظر می‌رسد، اختلاف میانگین دو سطح دمایی بیانگر این است که دمای بالا باعث کاهش آبخوئی مواد شده که در نهایت تثبیت بهتر رزین را به دنبال دارد. براساس نتایج به دست آمده از جذب آب و واکنش‌دگی ابعاد، در اثر تیمار با رزین DMDHEU و شرایط پخت متفاوت، میزان جذب آب و به تبع آن واکنش‌دگی حجمی در نمونه‌های تیمار شده کاهش یافت. بیشترین میزان جذب آب و واکنش‌دگی برای نمونه شاهد و کمترین آن برای تیمار پخت در آون بود. نتایج حاکی از آن است که دمای بالاتر تیمار، مقدار آب آزاد موجود در حفره‌های سلولی را کاهش و جذب پلیمر موجود در حفره‌ها را افزایش می‌دهد که متعاقباً منجر به کاهش بیشتر جذب آب و واکنش‌دگی ابعاد می‌شود [۶]. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، رزین DMDHEU از یک سو با پلیمر شدن در حفرات و همچنین انجام واکنش‌های خودتراکمی موجب پر کردن حفرات و منافذ دیوار سلولی شده و از سوی دیگر ملکول‌های رزین DMDHEU از طریق اتصال عرضی با گروه‌های هیدروکسیل دیوار سلول واکنش داده و با کاهش دسترس‌پذیری این گروه عاملی در چوب نقش به‌سزایی در مسدود کردن مکان‌های جذب آب و متعاقب آن کاهش جذب آب و واکنش‌دگی ابعاد دارد [۱۷، ۱۸، ۱۹]. علاوه بر این، حرارت با تخریب محل‌های جذب رطوبت در ترکیبات چوب همانند همی‌سلولز و بخش‌های آمورف سلولز جذب آب را کاهش می‌دهد و موجب بهبود ثبات ابعادی می‌شود [۱۹].

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های چوبی اصلاح‌شده در مقایسه با نمونه شاهد

شرح تیمار	درصد افزایش وزن (قبل از آبخوئی)	درصد افزایش وزن (پس از آبخوئی)	درصد واکنش‌دگی حجمی	درصد جذب آب ۲۴ ساعت
شاهد	-	-	۱۵/±۴۳ (۰/۷۳) ^c	۱۰۸/±۰۸۳ (۴/۸۶) ^a
پخت به روش بخار فوق داغ	۳۰/±۶۳ (۱/۴۱)	۲۳/±۵۳ (۱/۶۲)	۶/±۲۱ (۰/۴۵) ^b	۵۹/±۲۰ (۴/۸۴) ^b
پخت در آون آزمایشگاهی	۳۶/±۸۸ (۲/۰۵)	۲۴/±۲۸ (۱/۱۸)	۲/±۹۹ (۰/۷۴) ^a	۴۷/±۰۷ (۴/۸۱) ^c

۳-۲. مقاومت به هوازگی

۳-۲-۱. تغییرات شیمیایی

بررسی طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه‌های تیمار شده با mDMDHEU و نمونه‌های اصلاح‌نشده، افزایش محتوای کربونیل در عدد موجی ۱۷۲۶-۱۷۰۹ را متناسب با افزایش WPG نشان داد. این افزایش جذب توسط گروه‌های کربونیل در mDMDHEU ایجاد می‌شود (شکل ۴). در نمونه‌های تیمار شده با mDMDHEU افزایش جذب در اعداد موجی ۱۴۷۵ و ۱۲۳۶ مشاهده شد که به ترتیب به تغییر شکل CH₂ و ارتعاش کششی C-O در گروه N-متیلول mDMDHEU نسبت داده می‌شوند. جذب کششی قوی در عدد موجی ۳۲۶۰ تا ۳۳۸۰ مربوط به گروه‌های OH پلیمرهای چوب می‌باشد که در نمونه‌های تیمار شده از قدرت پیک به علت برقراری پیوندهای استری با گروه‌های OH کاسته شده است [۴]. نتایج طیف‌سنجی پس از هوازگی نشان داد که ارتفاع پیک در عدد موجی ۱۵۰۵ و ۱۶۰۰ مربوط به حلقه‌های آروماتیک در نمونه‌های تیمار شده نسبت به نمونه‌های اصلاح نشده به یک میزان کاهش یافته

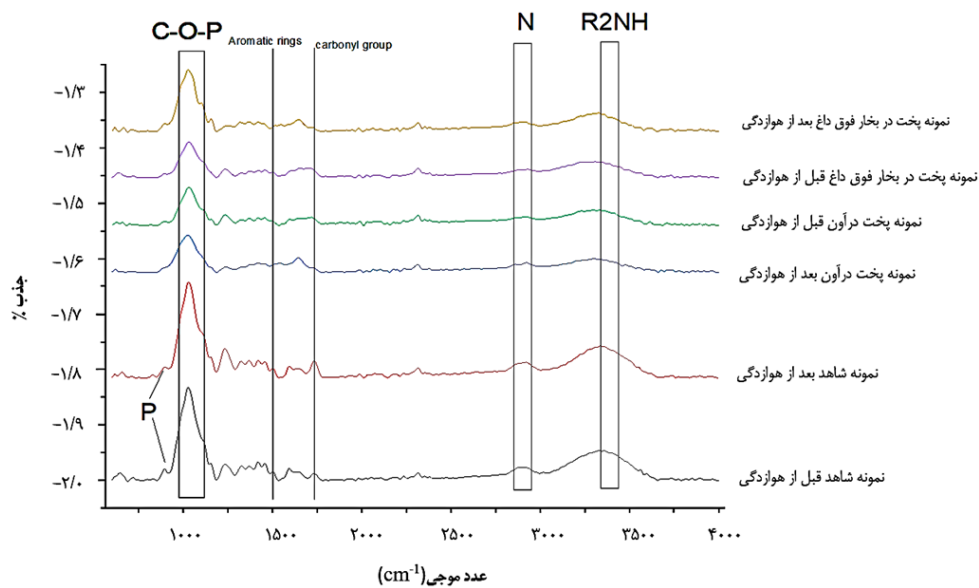
است که نشان‌دهنده عدم حفاظت لیگنین در هیچ یک از تیمارها، در برابر هوازدهی است. جذب در عدد موجی ۱۲۶۰ و ۱۲۲۴ در نمونه‌های تیمار نشده ناشی از ارتعاشات کربوکسیلی که در زایلان‌ها و سایر همی سلولزها نیز در طی هوازدهی کاهش یافت [۲۰].

۳-۲-۲. تغییرات رنگ

نتایج میزان پارامترهای رنگ‌سنجی نمونه‌ها قبل و پس از قرارگیری در شرایط هوازدهی در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که قبل از قرارگیری نمونه‌ها در شرایط هوازدهی، میزان L^* نمونه‌های اصلاح شده کمتر از نمونه‌های شاهد بود. به عبارتی، میزان روشنایی در چوب‌های شاهد بیشتر از نمونه‌های اصلاح شده بوده و نمونه‌های اصلاح شده اندکی تیره‌تر بودند. میزان a^* در نمونه‌های اصلاح شده اندکی بیشتر از نمونه‌های شاهد و میزان b^* در نمونه‌های اصلاح شده نسبت به شاهد کمتر بود. همچنین نتایج نشان داد که پس از قرارگیری نمونه‌ها در شرایط هوازدهی تسریع شده میزان L^* ، a^* و b^* در نمونه‌های اصلاح شده کمتر از نمونه شاهد است. به عبارت دیگر، به ترتیب میزان تیرگی، قرمزی و زردی در چوب‌های اصلاح شده و هوازده شده کمتر از نمونه چوب شاهد است که با نتایج آزمایشات Pfeffer و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد [۲۰]. اعتقاد بر این است که لایه سطحی نمونه‌ها که غنی از الیاف سلولزی پس از تجزیه لیگنین است، نور را به‌طور غیریکنواخت منعکس می‌کند که ممکن است به

منجر

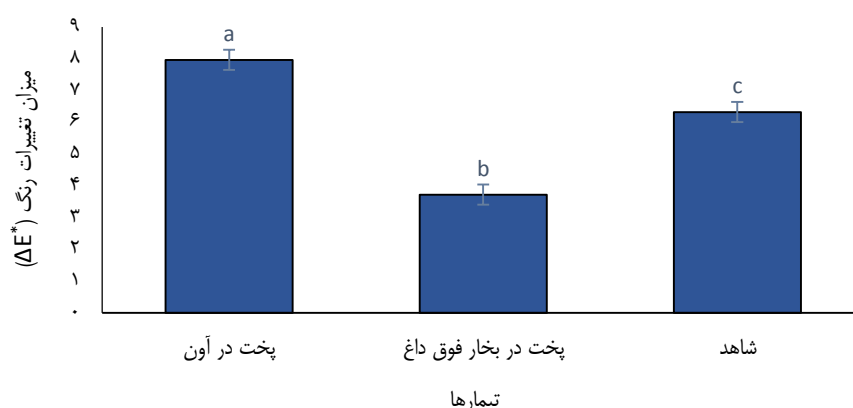
تغییر روشنی شود. در شکل ۵، شدت تغییرات رنگ (ΔE^*) نمونه‌های شاهد و اصلاح شده در اثر هوازدهی نشان داده شده است.



شکل ۴. طیف‌سنجی مادون قرمز ATR-FTIR نمونه شاهد و اصلاح شده قبل و پس از هوازدهی

جدول ۴. میانگین تغییرات پارامترهای رنگ‌سنجی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده قبل و پس از قرارگیری در شرایط هوازدهی

شرح تیمار	قبل از هوازدهی			بعد از هوازدهی		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
شاهد	۷۰/±۷۵ (۱/۱۵)	۱۲/±۳۰ (۰/۷۴)	۲۱/±۰۲ (۰/۹۰)	۶۵/±۶۳ (۰/۸۰)	۸/±۶۵ (۰/۳۷)	۲۰/±۳۴ (۰/۶۲)
پخت به روش بخار فوق داغ	۶۲/±۰۰ (۰/۴۱)	۱۱/±۸۸ (۱/۵۲)	۱۷/±۳۷ (۱/۳۷)	۶۱/±۳۵ (۱/۱۴)	۸/±۲۵ (۰/۱۴)	۱۷/±۸۷ (۰/۵۰)
پخت در آون آزمایشگاهی	۶۶/±۳۱ (۰/۸۷)	۱۳/±۷۷ (۰/۴۱)	۱۸/±۲۲ (۱/۳۶)	۶۱/±۴۳ (۱/۱۶)	۶/±۴۲ (۰/۷۷)	۱۵/±۹۲ (۱/۷۳)



شکل ۵. میزان تغییرات رنگ (ΔE*) نمونه‌های شاهد و اصلاح شده قبل و بعد از هوازدگی

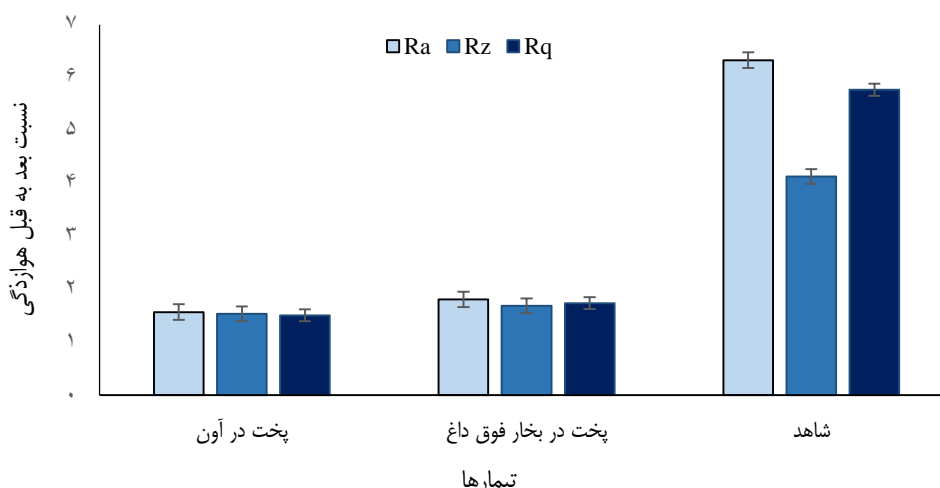
در این میان بهترین عملکرد در برابر تغییرات رنگ مربوط به تیمار پخت در بخار فوق داغ بوده است اما به‌طور کلی تیمار با این رزین از تغییرات رنگی در برابر هوازدگی و همچنین تخریب لیگنین جلوگیری نکرد.

۳-۲-۳. تغییرات زبری

نتایج میزان تغییر پارامترهای R_z ، R_q ، R_a در تیمارها قبل و پس از هوازدگی در جدول ۵ و میزان زبری نسبی (R) نمونه‌های شاهد و اصلاح شده، در شکل ۶ ارائه شده است. در همه نمونه‌های تیمار شده مقدار R_z ، R_q ، R_a بعد از هوازدگی بیشتر از میزان این پارامترها قبل از هوازدگی به‌دست آمد. میزان تغییرات زبری نسبی برای نمونه پخته‌شده در بخار فوق داغ و نمونه پخته‌شده در آون در حالت قبل و بعد از هوازدگی نسبت به چوب شاهد کمتر بود، اما میزان این پارامتر در دو تیمار تفاوت چندانی با هم نداشتند. آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه نیز تفاوت معنی‌داری بین مقادیر زبری در دو تیمار نشان نداد. مطابق با آزمون دانکن، نمونه‌های تیمار شده و نمونه شاهد در دو گروه طبقه‌بندی شدند. از آنجا که پس از واکنش با رزین در اثر جایگزینی گروه‌های هیدروکسیل، دیوار سلولی با افزایش حجم مواجه می‌شود و در اثر واکنش شدن چوب شکل و ابعاد سلول‌های چوبی تغییر می‌یابد، اصلاح چوب از این طریق موجب افزایش زبری سطح می‌شود. در طی هوازدگی چوب اصلاح شده، به‌دلیل کاهش جذب آب و تغییرات ابعادی کمتر آن، میزان زبری سطح و همچنین ترک‌های ناشی از جذب و دفع رطوبت نسبت به نمونه چوب اصلاح نشده کمتر است [۲۱].

جدول ۵. تغییرات پارامترهای زبری چوب‌های شاهد و تیمار شده در اثر هوازدگی

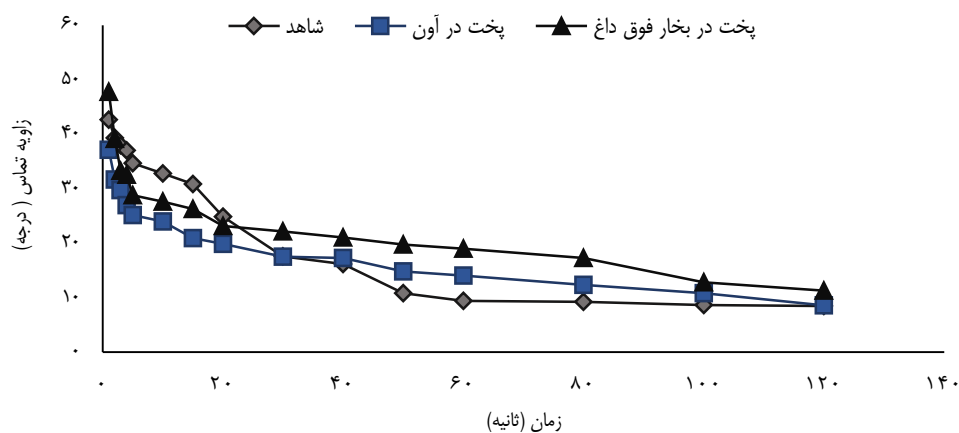
شرح تیمار	قبل از هوازدگی			بعد از هوازدگی		
	R_z	R_q	R_a	R_z	R_q	R_a
شاهد	۳/±۳۷ (۱/۳۰)	۲/±۴۷ (۰/۹۳)	۱۴/±۲۱ (۱/۱۵)	۸۷/±۴۰ (۳/۲۸)	۱۷/±۴۸ (۱/۵۰)	۱۴/±۲۱ (۱/۱۵)
پخت به روش بخار فوق داغ	۵/±۳۰ (۰/۴۸)	۳/±۷۱ (۰/۴۳)	۶/±۷۳ (۰/۸۴)	۵۶/±۴۱ (۷/۷۳)	۹/±۱۰ (۱/۱۱)	۶/±۷۳ (۰/۸۴)
پخت در آون آزمایشگاهی	۷/±۶۳ (۰/۸۵)	۵/±۵۳ (۰/۶۸)	۸/±۶۵ (۰/۲۲)	۶۹/±۱۳ (۵/۱۴)	۱۱/±۴۸ (۰/۳۷)	۸/±۶۵ (۰/۲۲)



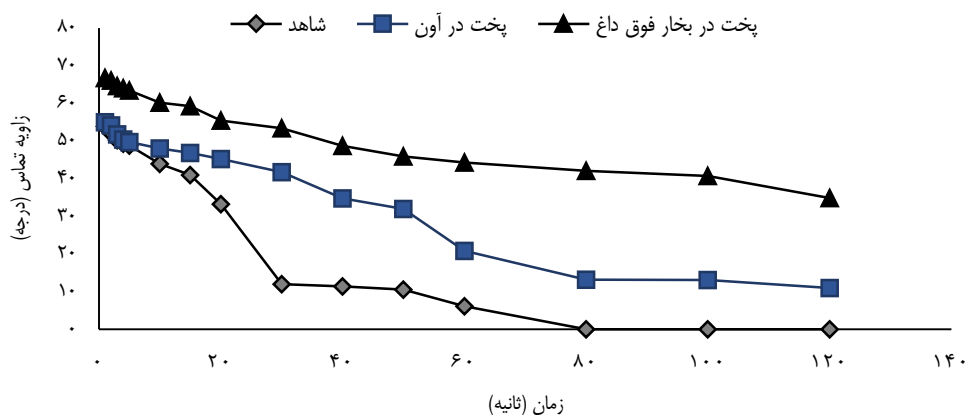
شکل ۶. نسبت بعد به قبل هوازگی پارامترهای زبری چوب های شاهد و اصلاح شده

۳-۲-۴. آب‌گریزی سطح

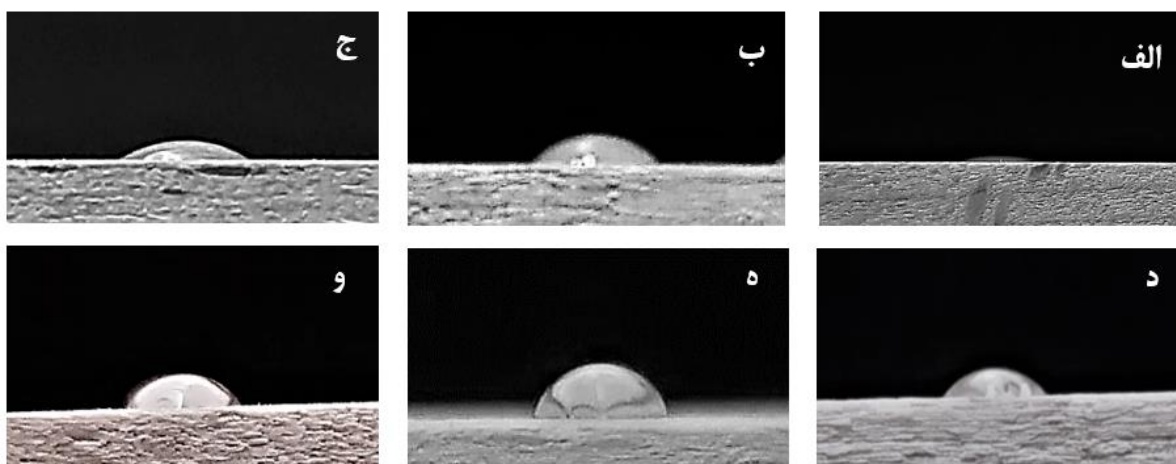
نتایج نشان داد زاویه تماس قطره آب در نمونه پخته شده در بخار فوق داغ بیشتر از نمونه پخته شده در آون بود که حاکی از عملکرد مطلوب آن در بهبود خواص آب‌گریزی چوب است. به عبارت دیگر، نمونه پخته شده در بخار فوق داغ کمترین میزان ترشوندگی سطح را داشت. علی‌رغم اینکه نمونه چوب اصلاح نشده در ثانیه‌های اول بیشترین میزان زاویه تماس با سطح را داشت، پس از گذشت چند ثانیه قطره آب بر روی سطح چوب پخش شده و زاویه تماس قطره آب به‌طور چشمگیری کاهش یافت (شکل ۷). مطابق یافته‌های Kishino و همکاران (۲۰۰۴)، خصوصیات ساختاری یک سطح، همراه با خواص شیمیایی، مسئول زاویه تماس هستند [۲۲]. همان‌طور که در نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز اشاره شد پیک ۳۴۰۰ مربوط به گروه‌های عاملی هیدروکسیل چوب می‌باشد که میل ترکیبی بسیاری با مولکول‌های آب دارد. در نمونه‌های اصلاح شده از قدرت این پیک به‌علت برقراری پیوندهای استری با گروه‌های هیدروکسیل زنجیرهای پلیمری کاسته شده است [۲۳]. دماهای بالا در مرحله پخت رزین موجب ایجاد اتصال عرضی رزین mDMDHEU با گروه‌های عاملی هیدروکسیل در سلولز و همی‌سلولز شده که منجر به مسدود شدن مکان‌های جذب رطوبت در گروه‌های هیدروکسیل شده و مانع از دسترسی مولکول‌های آب به این مکان‌ها می‌شود و در نهایت قابلیت ترشوندگی سطح را کاهش دهد [۷]. البته کاهش ترشوندگی در دمای بالای تیمار را می‌توان به افزایش بلورینگی سلولز در این فرآیند نیز نسبت داد [۲۴]. نتایج تأثیر هوازگی بر ترشوندگی چوب‌های اصلاح شده و اصلاح نشده در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج نشان داد که اختلاف زاویه تماس قبل و بعد از هوازگی در نمونه‌های اصلاح نشده بیشتر بود. نمونه پخته شده در بخار فوق داغ به دلیل توزیع یکنواخت‌تر رزین در سراسر دیوار سلولی بیشترین مقدار زاویه تماس قطره آب را نشان داد. این مسئله نشان‌دهنده حفظ خاصیت آب‌گریزی این تیمار بعد از هوازگی می‌باشد. تصاویر تهیه شده از آب‌گریزی سطح نمونه‌های تیمار شده و شاهد قبل و بعد از هوازگی در یک زمان مشخص در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۷. زاویه تماس اندازه‌گیری شده قبل از هوازدگی بر روی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده



شکل ۸. زاویه تماس اندازه‌گیری شده بعد از هوازدگی بر روی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده



شکل ۹. تصاویر تهیه شده از آبریزی سطح نمونه‌های شاهد و تیمار شده در یک زمان مشخص

الف-ج: قبل از هوازدگی (الف: شاهد، ب: پخت در بخار فوق داغ و ج: پخت در آون)
 د-و: بعد از هوازدگی (د: شاهد، ه: پخت در بخار فوق داغ و و: پخت در آون)

۴. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی بر پایه نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت اصلاح با mDMDHEU و پخت در بخار فوق داغ بر عملکرد هوازدگی چوب در طی هوازدگی مصنوعی تأثیر مثبت داشته و منجر به بهبود آب‌گریزی و کاهش زبری سطح شده است که می‌تواند ناشی از بهبود پایداری ابعادی و کاهش جذب و دفع رطوبت در اثر تیمار و توزیع یکنواخت‌تر رزین در سراسر دیوار سلولی باشد. شدت تغییر رنگ و خاکستری شدن ناشی از تخریب اجزای دیوار سلولی در اثر امواج فرابنفش، بر روی سطوح چوب اصلاح‌شده، در مقایسه با چوب اصلاح نشده کاهش یافت، اما همچنان آشکار بوده و از تغییر رنگ جلوگیری نشد. ارزیابی طیف‌سنجی مادون قرمز نیز نشان داد که لیگنین در هیچ یک از تیمارها در برابر هوازدگی حفاظت نشده و از این نظر تفاوتی با چوب اصلاح نشده مشاهده نشد. زیرا همان‌طور که اشاره شد دو گروه N-متیلول در mDMDHEU قادر به واکنش با گروه‌های هیدروکسیل پلیمرهای دیوار سلولی هستند و تأثیر مستقیم بر روی لیگنین ندارد. البته یک واکنش احتمالی با گروه‌های فنلی در لیگنین ممکن است تخریب نوری آن را کاهش دهد. علاوه بر این، mDMDHEU تحت خود تراکمی قرار گرفته که منجر به تشکیل یک ماتریس پلیمری سه بعدی می‌شود که می‌تواند به‌عنوان یک عامل تقویت‌کننده برای ماتریکس دیوار سلولی عمل کند تا لیگنین را که طی هوازدگی تجزیه می‌شود، حفظ کند. به‌نظر می‌رسد که این عملکرد نیازمند غلظت‌های بالاتر (۵۰ درصد) رزین DMDHEU بوده و در غلظت ۳۰ درصد نتایج خوبی به‌دست نیامد. قابل توجه‌ترین یافته از این پژوهش عملکرد مطلوب چوب پخته‌شده در بخار فوق داغ در برابر هوازدگی در مقایسه با چوب پخته‌شده در آن بود که می‌تواند ناشی از انتشار بیشتر رزین در دیوار سلولی و توزیع یکنواخت‌تر آن در ساختار چوب باشد. این مسئله به همراه ثبات ابعادی بیشتر چوب منجر به بهبود عملکرد در برابر هوازدگی شده و می‌تواند طول عمر چوب را جهت استفاده در فضای باز افزایش دهد. با این حال، بررسی مواد افزودنی کم‌هزینه و با حداقل سمیت که پایداری بیشتری در برابر نور برای سطوح چوبی اصلاح‌شده با mDMDHEU ایجاد می‌کنند، برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

۵. سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت‌های مالی بنیاد ملی علم ایران و امکانات آزمایشگاهی معاونت پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام شد.

۶. منابع

- [1] Mai, T.H., Hong, T.T.K., & Yen, T.N. (2021). The effect of weathering on wood and its protection. *Journal of Forestry Science and Technology*, 11(1), 118-127.
- [2] Alade, A.A., Hoette, C., & Militz, H. (2024). Coatings adhesion on chemically modified Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Woods. *Forests*, 15(3), 526.
- [3] Rasouli, D., Asadian, M., Rafiqi, A., & Khazaeeian, A. (2021). Study on physical properties and weathering resistance of wood modified by formaldehyde-based resins containing nano zinc oxide. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 11(4), 599-610. (In Persian)
- [4] Xie, Y., Krause, A., Mai, C., Militz, H., Richter, K., Urban, K., & Evans, P.D. (2005). Weathering of wood modified with the N-methylol compound 1,3-dimethylol-4,5-dihydroxyethyleneurea. *Polymer Degradation and Stability*, 89(2), 189-19.
- [5] Akhtari, M., & Arefkhani, M. (2010). Investigation effect of weathering on acetylated beech wood by FTIR spectroscopy and electron microscopic. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 25(1), 48-61. (In Persian)
- [6] Hill, A.S.C. (2006). Wood modification: chemical, thermal and other processes. *Jonh Wiley and Sons Press England*.

- [7] Rezvani, M.H., Talaei, A., & Rajabi Cham Heidari, H. (2017). Modification of paulownia wood with methylolated dimethyloldihydroxyethylenurea (mDMDHEU) and its effect on selected strength properties. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 32(3), 436-449. (In Persian)
- [8] Emmerich, L., Bollmus, S., & Militz, H. (2017). Wood modification with DMDHEU (1,3-dimethylol-4,5-dihydroxyethyleneurea) – State of the art, recent research activities and future perspectives. *Wood Material Science & Engineering*, 14(1), 3-18.
- [9] Gérardin, P. (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood—a review. *Annals of Forest Science*, 73 (1), 559-570.
- [10] Sandberg, D., Kutnar, A., & Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies - a review. *iForest*, 10(6), 895-908.
- [11] Militz, H., Schaffert, S., Peters, B.C., & Fitzgerald, C.J. (2011). Termite resistance of DMDHEU-treated wood. *Wood Science and Technology*, 45(3), 547-557.
- [12] Talaei, A., & Rezvani, M.H. (2016). Evaluation of the influence of chemical modification with polycrease ECR on the functional performance of poplar wood/polymer. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 32(1), 33-46. (In Persian)
- [13] Xie, Y., Krause, A., & Militz, H. (2014). Wood protection with Dimethyloldihydroxy- Ethyleneurea and its derivatives. *American Chemical Society*, 1158, 287-299.
- [14] Roux, M.L., & Podgorski, L. (2000). The advantages of having in the future a European accelerated weathering test for wood finishes. *Surface Coatings International*, 83(8), 399-403.
- [15] BS EN 927-6. (2006). Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Part 2: Exposure of wood coatings to artificial weathering using fluorescent UV lamps and water.
- [16] Gunduz, G., Aydemir, D., & Karakas, G. (2009). The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties. *Materials & Design*, 30(10), 4391-4395.
- [17] Mendis, M.S., Ishani, P.U., & Halwatura, R.U. (2023). Impacts of chemical modification of wood on water absorption: a review. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 20, 73-88.
- [18] Yasuda, R., & Minato, K. (1994). Chemical modification of wood by non-formaldehyde cross-linking reagents; Part 1. Improvement of dimensional stability and acoustic properties. *Wood Science and Technology*, 28(2), 101-110.
- [19] Aydemir, D., Gunduz, G., Altuntas, E., Ertas, M., Sahin, H.T., & Alma, M.H. (2011). Investigating changes in the chemical constituents and dimensional stability of heat-treated hornbeam and uludag fir wood. *BioResources*, 6(2), 1308-1321.
- [20] Pfeffer, A., Mai, C., & Militz, H. (2012) Weathering characteristics of wood treated with water glass, siloxane or DMDHEU. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1-3), 165-176.
- [21] Xie, Y., Krause, A., Militz, H., & Mai, C. (2008) Weathering of uncoated and coated wood treated with methylated 1,3-dimethylol-4,5-dihydroxyethyleneurea (mDMDHEU). *Holz als Roh- und Werkstoff*, 66(6), 455-464.
- [22] Kishino, M., & Nakano, T. (2004). Artificial weathering of tropical woods. Part 1: Changes in wettability. *Holzforschung*, 58(5), 552-557.
- [23] Kropat, M., Hubbe, M.A., & Laleicke, F. (2020). Natural, accelerated, and simulated weathering of wood: A review. *BioResources*, 15(4), 9998-10062.
- [24] Petrissans, M., Gerardin, P., & Serraj, M. (2003). Wettability of heat-treated wood. *Holzforschung*, 57(3), 301-307.
- [25] Boone, R.S., Kozlik, C.J., Bois, P. J., & Wengert, E. M (1988). Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 158 p.