



دانشگاه گیلان

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

جلد بیست و هشتم، شماره اول، ۱۴۰۰

۱۱۵-۱۳۲

<http://jwfst.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwfst.2021.18638.1903

کاربرد پوشش‌های اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات قابل پخت با امواج فرابنفش برای بهبود مقاومت چوب در برابر هوازدگی

هما کربلایی^۱، اصغر طارمیان^{۲*}، داوود رسولی^۳ و سعید پورمه‌دیان^۴

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

^۲دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران،

^۳استادیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران،

^۴دانشیار گروه مهندسی پلیمر و تکنولوژی رنگ، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷

چکیده

سابقه و هدف: یکی از مؤثرترین روش‌ها برای حفاظت چوب در برابر هوازدگی استفاده از پوشش‌ها است. در بین انواع پوشش‌ها، پوشش‌های تابش پخت به دلیل سرمایه‌گذاری کم، هزینه و مصرف انرژی کم، مقدار ماده جامد بالا و نبود حلال، گیرایی سریع و راندمان بالا و غیره مورد توجه و استفاده پژوهشگران قرار گرفتند. در این پژوهش، اثر دو نوع پوشش شفاف UV پخت (اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات) بر مقاومت به هوازدگی چوب نوئل بررسی شد.

مواد و روش‌ها: پوشش‌ها (اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات) به کمک فیلم‌کش با ضخامت ۲۰۰ میکرون بر روی نمونه‌های چوب نوئل اعمال شدند. سپس، عملیات پخت پوشش‌های یورتان‌اکریلات و اپوکسی‌اکریلات در دستگاه پخت UV به ترتیب برای مدت ۵ و ۴۰ ثانیه انجام شد. پس از پخت، نمونه‌های پوشش‌خورده و بدون پوشش (کنترل) به مدت شش ماه در معرض هوازدگی طبیعی قرار گرفتند. در نهایت، با استفاده از طیف‌سنجی مادون‌قرمز (ATR-FTIR)، مطالعات استرئومیکروسکوپ، میکروسکوپ الکترونی SEM، رنگ‌سنجی، اندازه‌گیری زبری سطح، زاویه تماس دینامیک آب و چسبندگی خراشی، تأثیر هوازدگی بر عملکرد هر یک از انواع پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که چوب بدون پوشش در اثر هوازدگی دچار تغییر رنگ شده و بر زبری سطح آن افزوده شد. بعد از هوازدگی، در چوب بدون پوشش، ترک‌های سطحی زیادی رخ داد. هم‌چنین، ترک‌های زیادی در سطح پوشش داده‌شده توسط یورتان‌اکریلات ایجاد شد، درحالی‌که در پوشش اپوکسی‌اکریلات آثاری از ترک‌های سطحی مشاهده نشد. شدت تغییر رنگ ناشی از هوازدگی در نمونه شاهد بیش‌تر از نمونه‌های پوشش‌خورده بود. مقاوم‌ترین پوشش در

* مسئول مکاتبه: tarmian@ut.ac.ir

برابر تغییرات رنگی ناشی از هوازُدگی، پوشش اپوکسی‌اکریلات بود. تغییرات مقدار زاویه تماس در اثر هوازُدگی علاوه بر تغییرات شیمی سطح چوب متأثر از وقوع ترک‌های سطحی و افزایش زبری سطح بود. نتایج^۱ ATR-FTIR نیز نشان داد که کاهش شدت پیک در اعداد موجی 1740 cm^{-1} (ارتعاش کششی C=O) و 1504 cm^{-1} و 1595 cm^{-1} (ارتعاش C=C در حلقه آروماتیک لیگنین) بیانگر تخریب همی سلولزها و تشکیل ترکیبات کربونیل جدید و تخریب لیگنین در اثر هوازُدگی چوب است. کاهش شدت پیک در اعداد موجی 1510 cm^{-1} (ارتعاش گروه‌های یورتانی CO-NH) و 1248 cm^{-1} (ارتعاش کششی C-O-C) در نمونه‌های پوشش‌خورده با پوشش یورتان‌اکریلات بیانگر گسیختگی زنجیر یورتانی در اثر تابش امواج UV است. نتایج هم‌چنین نشان داد که پوشش یورتان‌اکریلات چسبندگی کم‌تری در مقایسه با پوشش اپوکسی‌اکریلات داشت و در اثر هوازُدگی چسبندگی هر دو نوع پوشش کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی هر دو نوع پوشش موجب بهبود مقاومت به هوازُدگی چوب شدند. با این وجود، پوشش اپوکسی‌اکریلات در مقایسه با پوشش یورتان‌اکریلات عملکرد مطلوب‌تری داشته و در برابر هوازُدگی مقاوم‌تر بود، به‌طوری‌که چسبندگی و رنگ آن کم‌تر تحت‌تأثیر هوازُدگی قرار گرفت و عاری از ترک‌های سطحی بود.

واژه‌های کلیدی: اپوکسی‌اکریلات، چوب نوتل، هوازُدگی، یورتان‌اکریلات

مقدمه

امواج فرابنفش خورشید ازجمله عواملی است که سبب تخریب سطح چوب شده و در کنار سایر شرایط آب و هوایی پدیده هوازُدگی را سبب می‌شود (۱۱). طی پدیده هوازُدگی، در کنار تغییرات فیزیکی، بعضی از مواد پلیمری تشکیل‌دهنده چوب، تجزیه شده و ماهیت شیمیایی آن در لایه‌های سطحی تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، هنگامی که چوب در هوای آزاد قرار می‌گیرد، تحت‌تأثیر تجزیه فتوشیمیایی که عمدتاً در لیگنین رخ می‌دهد قرار گرفته و رنگ آن تغییر می‌کند. چون لیگنین در چوب همانند یک چسب الیاف را به هم متصل می‌نماید، پس از تجزیه، سطح چوب، از نظر مقدار سلولز غنی‌تر شده و به‌دلیل حساسیت کم‌تر سلولز در برابر تخریب پرتوهای فرابنفش، به مرور زمان تضعیف شده و طی بارندگی از سطح چوب شسته می‌شود. باید توجه داشت که امواج فرابنفش قادرند تنها تا عمق ۷۵ میکرومتری نفوذ کنند، به همین دلیل هوازُدگی را پدیده‌ای سطحی

می‌نامند که بیش‌تر خواص ظاهری و زیبایی چوب، نظیر رنگ را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۱۸). در صورت ادامه یافتن پدیده هوازُدگی، تقریباً ۶ میلی‌متر چوب در هر صد سال از بین می‌رود (۱۱). علاوه بر تغییر رنگ چوب، هوازُدگی منجر به زبر شدن سطح و گسیختگی در منافذ دیوار سلولی و وقوع ترک‌های سطحی در اثر جذب و دفع متناوب رطوبت می‌شود (۲).

هوازُدگی چوب را می‌توان با استفاده از پوشش‌دهی آن با انواع پوشش‌ها به حداقل رساند. برای مصارف بیرونی که چوب در معرض عوامل جوی و تابش امواج فرابنفش خورشید قرار داشته و حفظ رنگ طبیعی و زیبایی ظاهری آن مهم باشد، این نوع پوشش‌دهی اعمال می‌شود. پوشش‌های چوب بر اساس نمای ظاهری و هم بر اساس ساختمان شیمیایی با یکدیگر تفاوت دارند. با توجه به نمای ظاهری، پوشش‌ها به دو دسته شفاف و غیرشفاف

1- Attenuated total reflection-fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR)

چوب زیر پوشش است و نه خود پوشش؛ بنابراین، برای جلوگیری از تغییر رنگ این نوع پوشش‌ها باید تلاش کرد تا شدت برخورد نور UV بر چوب زیر پوشش کاهش یابد (۵). پوشش‌های با پخت تابشی ویسکوزیته مناسبی داشته و قابلیت استفاده بر روی مواد را دارند. وقتی این پوشش‌ها در معرض تابش قرار می‌گیرند، پلیمرها شده و پیوندهای عرضی زیادی در آنها اتفاق می‌افتد. در نتیجه، حالت مایع این پوشش‌ها به حالت جامد با کاربردهای متنوع تبدیل می‌شود. از ویژگی‌های بارز این پوشش‌ها این است که صد درصد محتوی آنها به حالت جامد تبدیل می‌شود (۲۱). با در نظر گرفتن اهمیت این موضوع، این پژوهش با هدف بهبود مقاومت به هوازدگی چوب با استفاده از پوشش‌های UV پخت اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات و مقایسه عملکرد آنها در فضای باز انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش از چوب نونل (*Picea abies*) استفاده شد. نمونه‌هایی بدون عیب و گره با ابعاد ۲×۱۰×۱۵ سانتی‌متر (L×R×T) به صورت بینابینی تهیه شدند و سطح تمام نمونه‌ها با سنباده برقی با زبری ۲۸۰ پرداخت شد (۱، ۲). پوشش‌های UV پخت اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات به ترتیب از شرکت‌های IGM Resins و Tianyi chemical چین تهیه شدند. برای کاهش ویسکوزیته اپوکسی‌اکریلات از دیلوئنت 2-ethylhexyl acrylate ساخت شرکت Evonic استفاده شد. در جدول ۱ تیمارهای مورد مطالعه و علائم اختصاری آنها ارائه شده است.

(مات) تقسیم می‌شوند. پوشش‌های شفاف عمدتاً برای مصنوعات حاصل از گونه‌های چوبی که طرح و نقش زیبایی دارند و مصنوعاتی که در اماکن سربسته مورد استفاده قرار می‌گیرند، بکار می‌روند. این پوشش‌ها را می‌توان با حفظ رنگ و بافت طبیعی چوب به کار برد. پوشش‌های غیرشفاف به‌طور کامل رنگ و بافت سطح چوب را پوشانده و زیبایی ظاهری چوب را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. به همین خاطر به‌منظور حفظ زیبایی نقوش طبیعی چوب، از پوشش‌های شفاف، استفاده می‌شود (۱، ۸، ۱۸). بیش‌ترین رزین مورد استفاده در فناوری پوشش، آکریلیک‌ها، پلی‌استرها، الکیدها و اپوکسی‌ها هستند (۱۵).

از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی در صنعت پوشش، ترکیبات آلی فرار (VOC^۱) در این نوع پوشش‌ها است. برای کاهش استفاده از ترکیبات آلی فرار در صنعت پوشش، از فناوری پخت با اشعه ماوراءبنفش (UV^۲) به‌طور گسترده استفاده می‌شود (۱۵). فرمولاسیون شیمیایی پوشش UV پخت عموماً شامل آغازگر نوری، مونومرهای واکنشگر و الیگومرهای عامل‌دار شده هستند (۴). امروزه الیگومرهایی که به سیستم اکریلات تعلق دارند و گیرایی آنها با پلیمریزاسیون رادیکال آزاد صورت می‌گیرد در پوشش‌های UV پخت استفاده فراوانی دارند. چانگ و همکاران (۱۹۹۹) نمونه‌های چوبی پوشش‌شده با چهار نوع پوشش شفاف آکریلیکی UV پخت را در معرض نور UV قرار دادند. رنگ همه نمونه‌ها در اثر تابش UV، به رنگ زرد تغییر کرد. تغییرات رنگی و شیمیایی پوشش‌های یورتان آلیفاتیک و سیلیکون اصلاح‌شده با آکریلیک بسیار جزئی بود. نتایج نشان داد که تغییرات رنگی ایجادشده در نمونه‌های پوشش‌خورده عمدتاً ناشی از تغییر رنگ

1- Volatile organic compounds

2- Ultraviolet

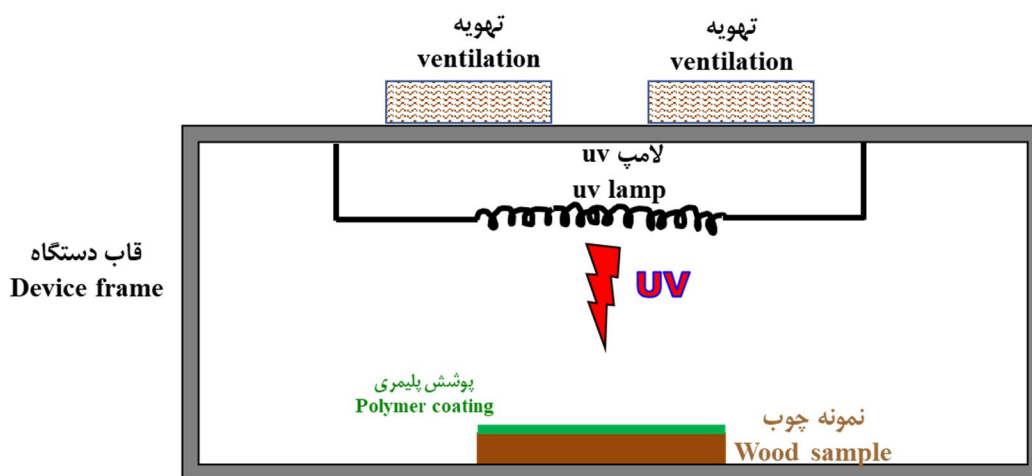
جدول ۱- کدگذاری اختصاری نمونه‌ها.

Table 1. Abbreviations of specimens used in this study.

توضیح Explanation	علامت اختصاری Abbreviation
نمونه کنترل (بدون پوشش) قبل هوازدگی Control sample before weathering	C-B
نمونه کنترل (بدون پوشش) بعد هوازدگی Control sample after weathering	C-A
نمونه حاوی پوشش اپوکسی قبل هوازدگی Sample contains epoxy coat before weathering	E-B
نمونه حاوی پوشش اپوکسی بعد هوازدگی Sample contains epoxy coat after weathering	E-A
نمونه حاوی پوشش یورتان قبل هوازدگی Sample contains urethane coat before weathering	U-B
نمونه حاوی پوشش یورتان بعد هوازدگی Sample contains urethane coat after weathering	U-A

۵ ثانیه در دستگاه پخت UV قرار گرفتند. دستگاه پخت UV (شکل ۱) ساخته شده برای انجام پژوهش حاضر، دارای یک لامپ جیوه‌ای با قدرت ۱۰۰۰ وات و طول موج ۳۶۰ نانومتر است. بعد از اعمال پوشش اپوکسی اکریلات و یورتان اکریلات بر تمام نمونه‌ها، مقاطع نمونه‌های چوبی با استفاده از رنگ سفید آلکیدی در ۲ نوبت پوشش داده شد تا از نفوذ آب و رطوبت از مقاطع چوب طی آزمون هوازدگی جلوگیری شود.

روش پوشش‌دهی نمونه‌ها: در این پژوهش از روش پوشش‌دهی با دستگاه فیلم‌کش مدل VF2147-081 ساخت شرکت TQC کشور آمریکا استفاده شد که مبنای محاسبه میزان پوشش مصرفی برای هر نمونه ضخامت فیلم پوشش بود. میزان ضخامت فیلم بر سطوح نمونه‌ها قبل از پخت ۲۰۰ میکرون بود. نمونه‌های حاوی پوشش اپوکسی اکریلات به مدت ۴۰ ثانیه و نمونه‌های حاوی پوشش یورتان اکریلات به مدت



شکل ۱- شمایی از دستگاه پخت UV ساخته شده و مورد استفاده در پژوهش حاضر.

Figure 1. Schematic of UV-curing apparatus.

هوازدگی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، واقع در جنگل شصت‌کلاته در معرض هوازدگی طبیعی قرار داده شدند (۱). جدول ۲ شرایط آب و هوایی در گرگان را طی آزمون هوازدگی نمونه‌ها نشان می‌دهد.

آزمون هوازدگی طبیعی: به منظور ارزیابی تأثیر پوشش‌ها بر مقاومت به هوازدگی، نمونه‌های پوشش داده شده به سمت جنوب تحت زاویه ۴۵ درجه و با ارتفاع ۵۵ سانتی‌متری از سطح زمین به مدت ۱۸۰ روز از تاریخ ۹۶/۳/۲۵ تا ۹۶/۹/۲۵ در سایت آزمون

جدول ۲- خلاصه شرایط آب و هوا در سایت آزمون هوازدگی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (<https://www.irimo.ir/>).

ماه Month	اسفند March	فروردین April	اردیبهشت May	تیر June	مرداد July	شهریور September
دمای میانگین Average temperature (°C)	14.7	20.1	25.1	28.4	28.5	29.1
دمای بیشینه The highest temperature (°C)	37.8	32.4	39.4	42.4	41.2	46.3
دمای کمینه The lowest temperature (°C)	1.4	10	16.3	18.8	20.8	17.9
میزان بارندگی در ماه (mm) Rainfall per month (mm)	40.4	37.1	2.2	0.5	0	0
رطوبت (%) Humidity (%)	74	68	60	57	57	54

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

در سیستم CIELAB، L به‌عنوان شاخص روشنایی بیان شده و مقادیر آن می‌تواند از ۱۰۰-۰ تغییر کند. اگر میزان تغییرات این شاخص مثبت باشد، نشان‌دهنده روشن‌تر شدن نمونه‌ها و اگر این تغییرات منفی باشد بیانگر تیره‌تر شدن رنگ آن‌ها خواهد بود. هم‌چنین، شاخص a مربوط به اندازه‌گیری رنگ قرمز-سبز و شاخص b مربوط به اندازه‌گیری رنگ زرد-آبی می‌باشد.

زاویه تماس قطره آب: تغییرات زاویه تماس قطره آب بر روی نمونه‌ها قبل و بعد از پوشش‌دهی و قبل و بعد از هوازدگی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس (PG-X Measuring Head) ساخت

آزمون چسبندگی پوشش‌ها: به منظور بررسی کیفیت چسبندگی پوشش بر روی سطح نمونه‌های چوبی قبل و بعد از هوازدگی از دستگاه اندازه‌گیری چسبندگی به روش cross cut، مدل CH30 ساخت شرکت TESTECH کشور کره جنوبی بر طبق استاندارد ASTM D۳۳۵۹ استفاده شد. این آزمون قدرت چسبندگی را به صورت کیفی بیان می‌کند.

رنگ‌سنجی: خصوصیات رنگ سطح پوشش‌ها قبل و بعد از هوازدگی طبیعی، به وسیله دستگاه رنگ‌سنج مدل TES A135 ساخت کشور تایوان اندازه‌گیری شد. به کمک دستگاه فوق، مقادیر L، a، b برای هر تیمار با ۱۵ تکرار هر دو ماه (جمعاً ۴ بار) اندازه‌گیری شد. در نهایت، میزان تغییر رنگ نمونه‌ها به وسیله فرمول زیر (رابطه ۱) محاسبه شد:

کشور سوئیس اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری زاویه تماس، طبق استاندارد ASTM D 5946، قطره آب با قطر ۳ میکرولیتر بر روی سطح مماسی نمونه انداخته شد. لازم به ذکر است که جهت انجام آنالیز آماری، میانگین زاویه تماس قطره از صفر تا ۶۰ ثانیه و با تکرار ۳ قطره برای هر نمونه در نظر گرفته شد.

اندازه‌گیری زبری: تغییرات زبری نمونه‌ها قبل و بعد از هوازده‌گی با دستگاه زبری‌سنج مدل PTP 80 ساخت شرکت BOCCHI کشور ایتالیا اندازه‌گیری شد. مکانیسم کار این دستگاه به این صورت است که دارای دو قسمت اصلی ثابت و متحرک است. در قسمت ثابت، صفحه نمایش و دیگر اجزای اصلی دستگاه قرار می‌گیرد و در قسمت متحرک سنسور زبری‌سنج قرار می‌گیرد و نتیجه را گزارش می‌کند. در این پژوهش پارامتر Ra که پارامتر مهم در محاسبه زبری است، اندازه‌گیری شد. پارامتر Ra یکی از فاکتورهای زبری سطح و نشان‌دهنده میانگین ناهمواری (برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌ها) در پروفیل سطح می‌باشد. هرچه مقدار این فاکتور کم‌تر باشد سطح صاف‌تر خواهد بود.

طیف‌سنجی مادون قرمز (ATR-FTIR): به منظور بررسی و ردیابی واکنش‌های شیمیایی قبل و بعد از پوشش‌دهی و هم‌چنین قبل و بعد از هوازده‌گی از اسپکتروسکوپی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (ATR-FTIR) مدل Tensor II ساخت شرکت Bruker آلمان در محدوده عدد موجی $5000-500 \text{ cm}^{-1}$ ، با تعداد ۱۶ اسکن و قدرت تفکیک 4 cm^{-1} استفاده شد.

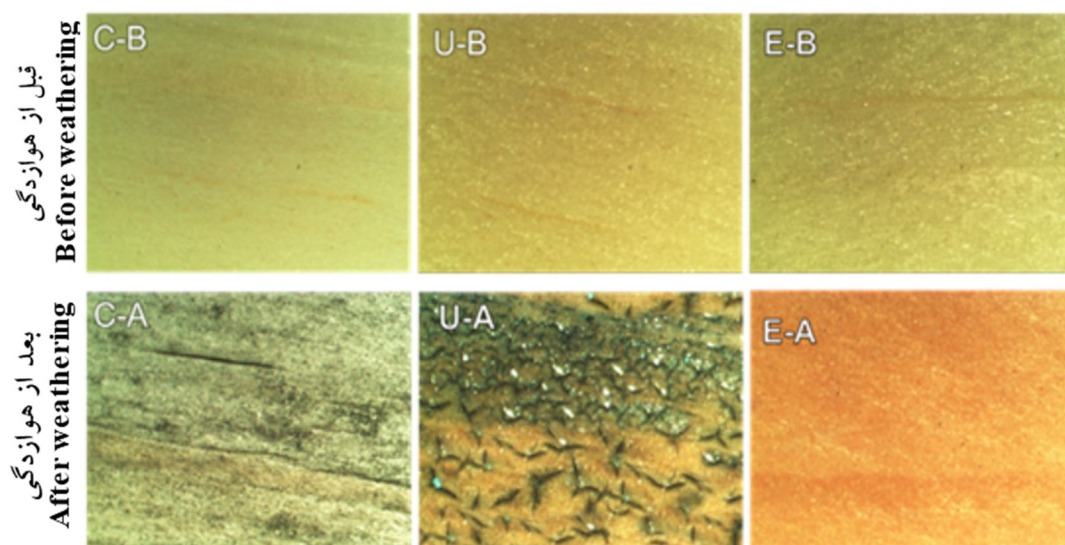
عکس‌برداری با استفاده از دستگاه استریومیکروسکوپ: به‌منظور بررسی تغییرات سطح نمونه‌ها قبل و بعد از هوازده‌گی با بزرگنمایی ۴۰ برابر، از دستگاه استریومیکروسکوپ مدل OLYMPUS 8ZX16 استفاده شد.

میکروسکوپ SEM: جهت عکس‌برداری در مقیاس میکرومتری از نمونه‌ها قبل و بعد از هوازده‌گی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل PS-230 ساخت شرکت Pemtron کره جنوبی استفاده شد. نمونه‌ها با طلا پوشش داده شده و در ولتاژ ۱۰ کیلوولت عکس‌برداری صورت گرفت. برش و تهیه نمونه‌های آزمونی به وسیله دستگاه برش لیزر مدل 1390E ساخت شرکت Senfeng چین انجام شد.

تجزیه و تحلیل آماری: نتایج در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از آزمون فاکتوریل بررسی و میانگین داده‌ها از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد به وسیله نرم‌افزار SPSS مقایسه شد.

نتایج و بحث

اثرات هوازده‌گی بر پایه مشاهدات میکروسکوپی: در شکل‌های ۲ تصاویر استریومیکروسکوپ از سطح نمونه‌های شاهد و پوشش داده‌شده با انواع پوشش‌ها قبل و بعد از هوازده‌گی ارائه شده است. نتایج نشان داد که در اثر هوازده‌گی در چوب بدون پوشش، ترک‌های سطحی رخ داده است. جذب و دفع رطوبت ناشی از نوسانات رطوبت نسبی محیط و هم‌کشیدگی و واکنشیدگی چوب از دلایل اصلی وقوع ترک‌خوردگی در اثر هوازده‌گی محسوب می‌شود (۱۲). با مقایسه نمونه‌های حاوی دو نوع پوشش به‌کار برده شده، مشخص شد که پوشش یورتان‌اکریلات مقاومت مناسبی در برابر هوازده‌گی نداشته و ترک‌های زیادی در سطح این پوشش‌ها ایجاد شده است درحالی‌که در نمونه‌های حاوی پوشش اپوکسی‌اکریلات آثاری از ترک‌های سطحی در چوب مشاهده نمی‌شود.

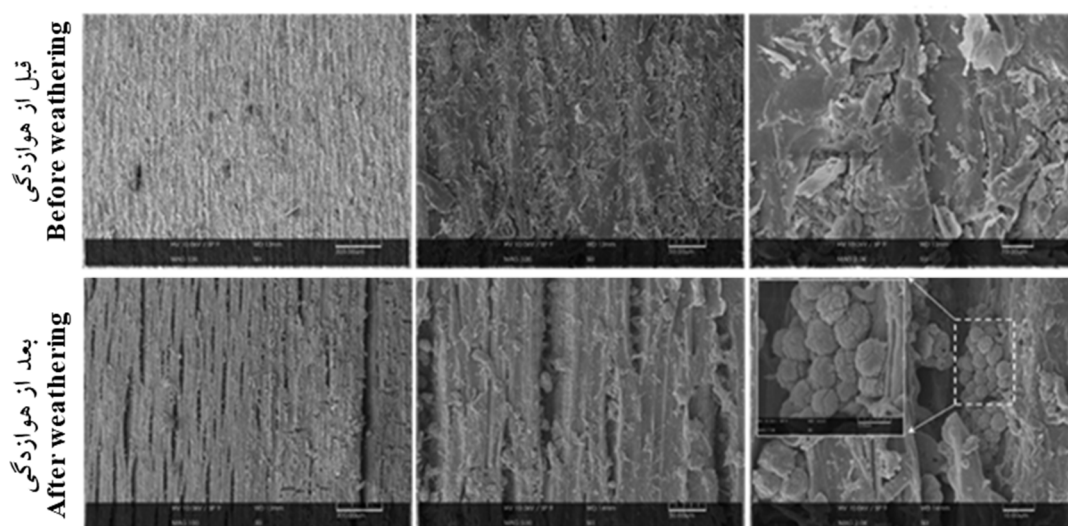


شکل ۲- تصویر استریومیکروسکوپ نمونه‌ها قبل و بعد از هوازدگی.

Figure 2. Stereo-microscope images of specimens before and after weathering.

شده و در بزرگنمایی‌های بیشتر نشانه‌هایی از رشد اولیه قارچ و کپک بر سطح چوب و درون ترک‌ها دیده می‌شود. ترک‌های ایجاد شده در سطح در راستای طولی و در جهت الیاف بوده که نشئت گرفته از همکشیدگی و واکشیدگی چوب در اثر جذب و دفع رطوبت است.

شکل ۳ ریزنگاره SEM نمونه‌های چوب معمولی قبل (C-B) و بعد از هوازدگی (C-A) را در سه بزرگنمایی ۱۰۰، ۵۰۰ و ۲۰۰۰ برابر نشان می‌دهد. سطح چوب معمولی قبل از هوازدگی عاری از هر نوع ترک یا ریشه‌های قارچی است درحالی‌که بعد از هوازدگی به‌وضوح ترک‌های سطحی زیادی ایجاد

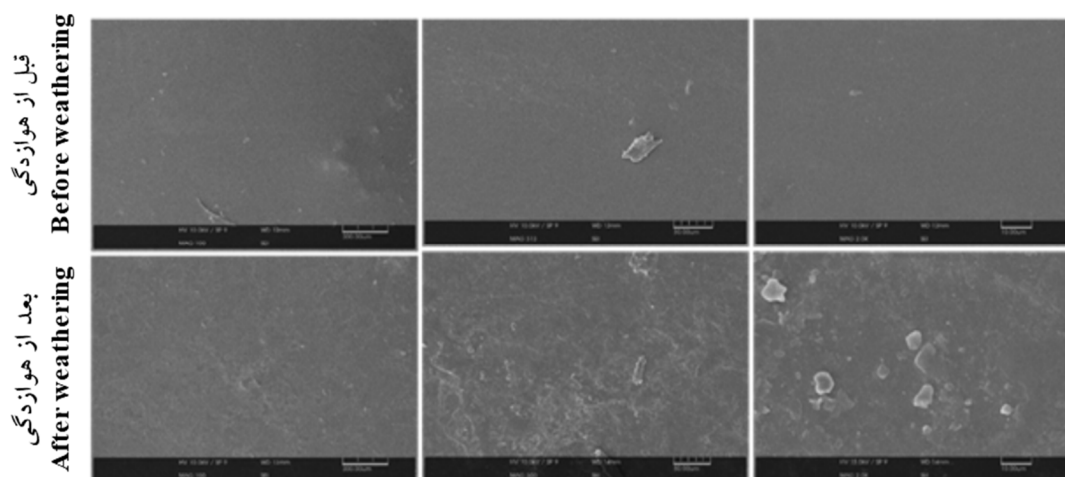


شکل ۳- ریزنگاره SEM نمونه‌های چوب معمولی قبل و بعد از هوازدگی، به‌ترتیب از راست به چپ با بزرگنمایی ۲۰۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰ برابر.

Figure 3. SEM micrographs of control wood before and after weathering, from right to left with 2000, 500 and 100x magnification, respectively.

بعد از هوازدگی هیچ نوع ترکی نداشته و تغییرات خاصی هم در اثر هوازدگی در آن‌ها دیده نشد که مطابق با اطلاعات گرفته شده از تصاویر استریومیکروسکوپ است.

شکل ۴ ریزنگاره SEM نمونه‌های چوب معمولی حاوی پوشش اپوکسی را قبل (E-B) و بعد از هوازدگی (E-A) در سه بزرگنمایی ۱۰۰، ۵۰۰ و ۲۰۰۰ برابر نشان می‌دهد. سطح پوشش اپوکسی قبل و

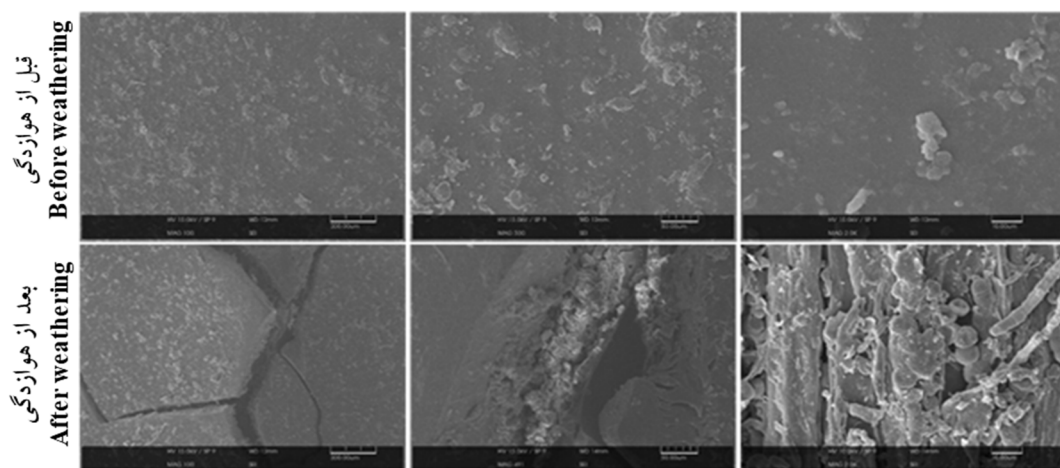


شکل ۴- ریزنگاره SEM نمونه‌های چوب حاوی پوشش اپوکسی آکریلات قبل و بعد از هوازدگی، به ترتیب از راست به چپ با بزرگنمایی ۲۰۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰ برابر.

Figure 4. SEM micrographs of epoxy-acrylate coated specimens before and after weathering, from right to left with 2000, 500 and 100x magnification, respectively.

ولی بعد از هوازدگی ترک‌های بزرگی ایجاد شد به طوری که با چشم غیرمسلح نیز قابل مشاهده بود. وجود این ترک‌ها سبب نفوذ آب و ریسسه‌های قارچی در بافت چوب می‌شود.

شکل ۵ ریزنگاره SEM نمونه‌های چوب حاوی پوشش یورتان آکریلات را قبل و بعد از هوازدگی در سه بزرگنمایی ۱۰۰، ۵۰۰ و ۲۰۰۰ برابر نشان می‌دهد. سطح پوشش قبل از هوازدگی هیچ نوع ترکی نداشته



شکل ۵- ریزنگاره SEM نمونه‌های چوب حاوی پوشش یورتان آکریلات قبل و بعد از هوازدگی، به ترتیب از راست به چپ با بزرگنمایی ۲۰۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰ برابر.

Figure 5. SEM micrographs of urethane-acrylate coated specimens before and after weathering, from right to left with 2000, 500 and 100x magnification, respectively.

حلقه آروماتیک است (۱۹). پیک مشاهده شده در اعداد موجی 1635 cm^{-1} و 831 cm^{-1} به ترتیب ناشی از حضور پیوند دوگانه اکریلات (۱۰) و ارتعاش C-O-C از حلقه اپوکسی است (۶). هم‌چنین، پیک مشاهده شده در عدد موجی 1727 cm^{-1} مربوط به کربونیل گروه استر رزین اپوکسی-آکریلات می‌باشد (۶). جذب در اعداد موجی 920 cm^{-1} و 880 cm^{-1} نیز ناشی از تغییر شکل حلقه گروه اپوکسی و بیانگر گروه اپوکسی است (۱۰). هم‌چنین، جذب در عدد موجی 1509 cm^{-1} مربوط به گروه‌های پارافینیل است که بیانگر واکنش شیمیایی بین اپوکسی و اکریلات اسید برای تشکیل رزین اپوکسی-آکریلات است. جذب در اعداد موجی 1070 cm^{-1} و 1249 cm^{-1} به ترتیب ناشی از ارتعاش کششی C-O در رزین اپوکسی و ارتعاش کششی C-O-C اتر آریل آلکیل اپوکسی است (۲۰). جذب در عدد موجی 1188 cm^{-1} بیانگر ارتعاش کششی C-C و در عدد موجی 1100 cm^{-1} و 1037 cm^{-1} بیانگر ارتعاش کششی C-O-C اترها (۱۳) و در عدد موجی 1252 cm^{-1} ناشی از ارتعاش حلقه اپوکسید است (۱۴). برای بررسی تخریب نوری پلیمرها در اثر هوازدهی می‌توان از شاخص کربونیل (رابطه ۲) استفاده کرد.

$$\text{Carbonyl index } (1654\text{ cm}^{-1}) = I_{\text{absorbance at } 1654\text{ cm}^{-1}} / I_{\text{absorbance at } 2877\text{ cm}^{-1}} \quad (2)$$

نمونه‌های پوشش‌دهی شده با پوشش یورتان-آکریلات: همان‌طوری که شکل ۶ نشان می‌دهد پیک مشاهده در عدد موجی 1248 cm^{-1} (ارتعاش کششی C-O-C) و 3322 cm^{-1} (ارتعاش کششی N-H) بیانگر حضور پیوندهای یورتانی است (۱۰). پیک مشاهده شده در عدد موجی 1643 cm^{-1} ناشی از

نتایج مشاهدات میکروسکوپی نشان داد چوب حاوی پوشش اپوکسی-آکریلات بیش‌ترین مقاومت را به هوازدهی نشان داده است به‌طوری‌که بعد از ۶ ماه از هوازدهی هیچ نشانی از ترک یا حتی تخریب جزئی در نمونه‌ها مشاهده نشد درحالی‌که چوب بدون پوشش و چوب حاوی پوشش یورتان-آکریلات مقاومت کمی نسبت به هوازدهی نشان دادند. مقاومت بالای پوشش اپوکسی-آکریلات را می‌توان به مقاومت ذاتی بالای این پلیمر به عوامل جوی و نیز ایجاد پیوندهای کووالانسی بین این پلیمر با چوب نسبت داد (۳، ۱۶).

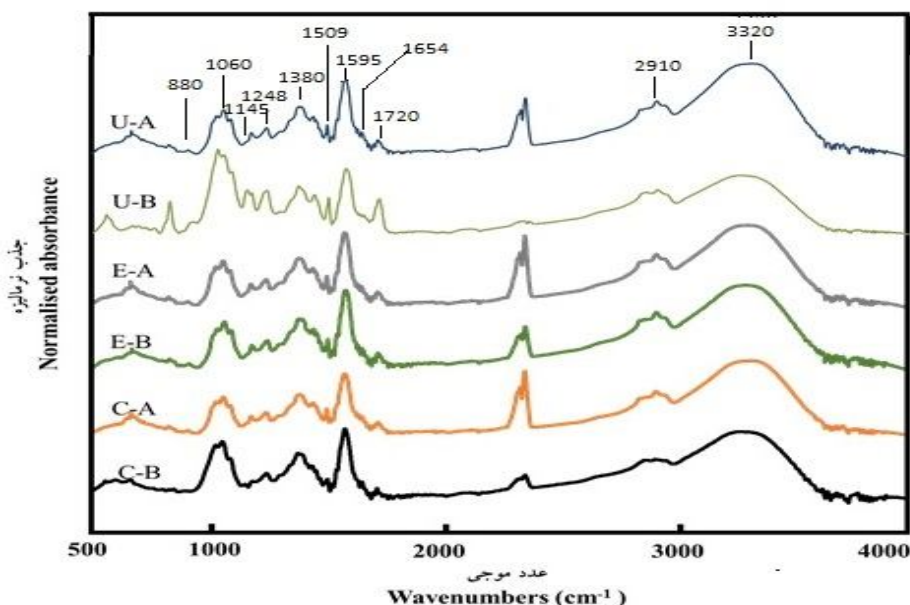
تغییرات شیمیایی در اثر هوازدهی: شکل ۶ منحنی FTIR همه نمونه‌های شاهد و پوشش‌دهی شده با هر دو نوع پوشش را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که در نمونه‌های شاهد (کنترل) شدت پیک در اعداد موجی 1740 cm^{-1} (ارتعاش کششی C=O) و 1504 cm^{-1} و 1595 (ارتعاش C=C در حلقه آروماتیک لیگنین) کاهش یافت که به ترتیب بیانگر تخریب همی سلولزها و تشکیل ترکیبات کربونیل جدید و تخریب لیگنین در اثر هوازدهی چوب است (۱۲).

نمونه‌های پوشش‌دهی شده با پوشش اپوکسی-آکریلات: جذب در عدد موجی 2933 cm^{-1} بیانگر ارتعاش کششی C-H در CH_2 حلقه اپوکسی (۱۹) و در اعداد موجی $1548-1507$ بیانگر ارتعاش کششی C-C

در اثر هوازدهی پوشش اپوکسی، شاخص کربونیل افزایش می‌یابد و هر چه پوشش به هوازدهی مقاوم‌تر باشد این شاخص کم‌تر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. نتایج پژوهش نشان داد که شاخص کربونیل برای نمونه‌های پوشش‌خورده قبل و بعد از هوازدهی به ترتیب برابر با $0/32$ و $0/36$ بود.

کششی C-O-C کاهش یافت. این مسأله بیانگر گسیختگی زنجیر در اثر تابش امواج UV است. نتایج این پژوهش نشان داد که در اثر هوازدهی شدت جذب در عدد موجی 1145 cm^{-1} در چوب پوشش‌خورده به‌طور محسوسی کاهش پیدا می‌کند. این پیک دلالیت بر ارتعاش کششی اتر (C-O) دارد. نتایج پژوهش‌های گذشته بیانگر آن است که بیش‌تر تغییر در طیف مادون‌قرمز پوشش‌های یورتانی‌اکریلات در اعداد موجی 2900 cm^{-1} (ارتعاش گروه CH) و 1250 cm^{-1} و 1020 cm^{-1} مربوط به گروه‌های یورتان است و در اثر هوازدهی شدت جذب در این دامنه اعداد موجی کاهش پیدا می‌کند (۱۰).

ارتعاش کششی C=C (گروه اکریلات) است (۸). تشکیل پیوندهای یورتانی در اثر پخت UV با این چهار مشخصه قابل‌مشاهده است (۱۰): جذب در محدوده اعداد موجی $3000-3500\text{ cm}^{-1}$ که بیانگر گروه NH است؛ جذب در محدوده اعداد موجی $1600-1700\text{ cm}^{-1}$ بیانگر گروه C=O است؛ جذب در محدوده اعداد موجی $1500-1600\text{ cm}^{-1}$ که دلالیت بر حضور گروه کاربامات است و در نهایت جذب در دامنه $1200-1300\text{ cm}^{-1}$ که دلالیت بر حضور گروه C=O به همراه NH دارد. نتایج نشان داد که در اثر هوازدهی نمونه‌های پوشش‌خورده، شدت پیک در اعداد موجی 1510 cm^{-1} (ارتعاش گروه یورتانی CO-NH) و 1248 cm^{-1} (ارتعاش



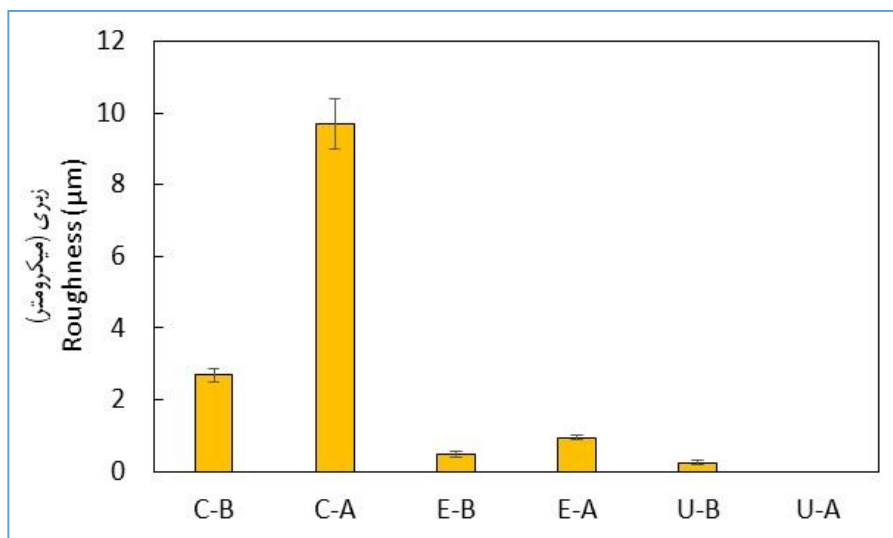
شکل ۶- منحنی طیف مادون‌قرمز FTIR نمونه‌ها قبل و بعد از هوازدهی.
Figure 6. FTIR spectra of specimens before and after weathering.

۶ ماهه به حدی نبود که منجر به تخریب مشهود این پوشش شود. نتایج مطالعات شیمی سطح همه نمونه‌ها در اثر هوازدهی با نتایج مشاهدات میکروسکوپی همخوانی دارد.

نتایج آزمون FTIR و افزایش عدد کربونیل نشان داد که حتی پوشش اپوکسی‌اکریلات در برابر عوامل هوازدهی کاملاً مقاوم نبوده و طی گذشت زمان به‌تدریج تخریب می‌شود. با این وجود، اثر هوازدهی

چوب باشد. صرف نظر از پوشش یورتان اکریلات، بیشترین زبری در نمونه کنترل (بدون پوشش) مشاهده شد (۲۲). در اثر هوازدهی چوب معمولی، زبری از ۲/۷ میکرومتری که حاصل از اثر پرداخت سنباده ۲۸۰ روی سطح چوب بود به ۹/۷ میکرومتر افزایش یافت. افزایش زبری ناشی از هوازدهی در نمونه‌های پوشش خورده کم‌تر بود که بیانگر اثرات حفاظتی پوشش‌های مورد استفاده در مقابل پارامترهای هوازدهی است. پوشش اپوکسی اکریلات کم‌ترین تغییرات زبری را در اثر هوازدهی از خود نشان داد. مقاومت ذاتی بالای اپوکسی اکریلات و چسبندگی زیاد و وجود پیوندهای کووالانسی بین این پوشش و سطح چوب می‌تواند عامل مؤثری در کاهش تخریب سطحی و میزان زبری سطح باشد (۳، ۱۶، ۲۲). به نظر می‌رسد مهم‌ترین عامل افزایش زبری در نمونه‌ها بعد از هوازدهی وقوع ترک‌ها باشد.

زبری و تغییر رنگ: شکل ۷ زبری (Ra) نمونه‌های چوب معمولی به همراه گروه بندی دانکن میانگین‌ها در اثر هوازدهی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد قبل از هوازدهی میزان زبری همه نمونه‌های پوشش داده شده کم‌تر از نمونه کنترل (نمونه بدون پوشش) است. قبل از هوازدهی، تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد بین میانگین زبری نمونه‌های پوشش خورده با یورتان اکریلات و نمونه‌های پوشش خورده با اپوکسی اکریلات مشاهده نشد. بعد از هوازدهی میزان زبری همه نمونه‌های پوشش داده شده و بدون پوشش افزایش یافت. به دلیل زبری بیش از حد نمونه‌های پوشش داده شده با یورتان اکریلات بعد از هوازدهی، انجام آزمون زبری با دستگاه زبری سنج سوزنی امکان‌پذیر نبود. افزایش بیش از حد زبری در نمونه‌های پوشش خورده با یورتان اکریلات می‌تواند ناشی از چسبندگی ضعیف یورتان اکریلات بر سطح



شکل ۷- زبری نمونه‌ها قبل و بعد از هوازدهی.

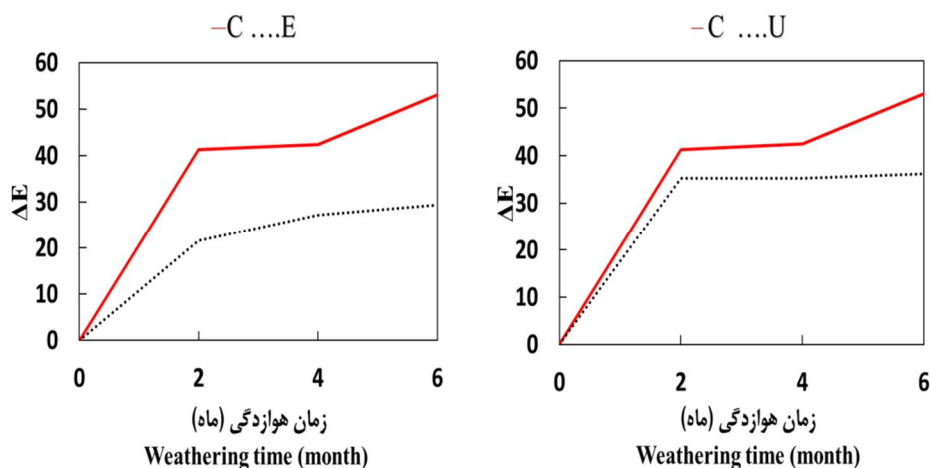
Figure 7. Roughness data of specimens before and after weathering.

یورتان اکریلات و اپوکسی اکریلات بر روی نمونه‌های چوب معمولی باعث کاهش تغییرات رنگی نسبت به نمونه بدون پوشش شده است. مقاوم‌ترین پوشش در

در شکل ۸ تغییرات رنگی (ΔE) نمونه‌های چوب معمولی بدون پوشش و پوشش خورده طی هوازدهی ارائه شده است. نتایج نشان داد که استفاده از پوشش

نمونه‌ها کم‌تر بود. در نمونه بدون پوشش در بازه زمانی ۲ تا ۶ ماه، تغییرات رنگی افزایش یافت ولی در نمونه‌های دارای پوشش اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات در بازه زمانی ۲ تا ۶ ماه تغییرات رنگی تقریباً ثابت ماند.

برابر تغییرات رنگی ناشی از هوازدگی، پوشش اپوکسی‌اکریلات بود. همه نمونه‌ها در ۲ ماه اول هوازدگی بیش‌ترین افزایش میزان تغییرات رنگی را از خود نشان دادند. در نمونه‌های حاوی پوشش اپوکسی‌اکریلات تغییرات رنگی نسبت به سایر



شکل ۸- تغییرات رنگی نمونه‌ها در طی هوازدگی.

Figure 8. Calorimetry of specimens during weathering.

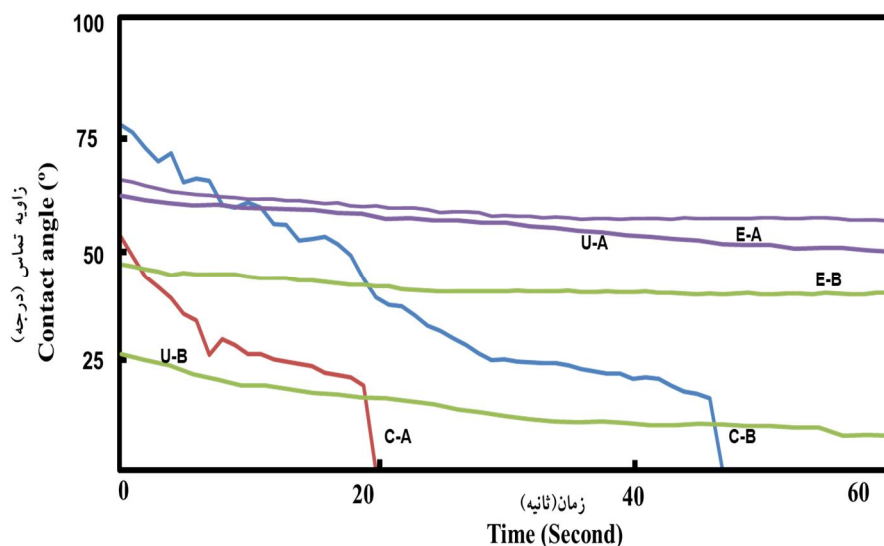
کپک *Aurobasium pullulans* و قارچ‌های مشابهی که از محصولات تجزیه‌ای تغذیه می‌کنند، رخ دهد (۱). در بین پوشش‌های استفاده شده بیش‌ترین تغییرات رنگی مربوط به یورتان‌اکریلات بود مقاومت کم پوشش یورتان‌اکریلات به هوازدگی، به مقاومت پایین ساختار آروماتیکی موجود در آن نسبت داده می‌شود (۳).

ترشوندگی و چسبندگی پوشش‌ها: آزمون زاویه تماس روی سطح نمونه‌ها با ۳ تکرار در بازه زمانی ۶۰ ثانیه انجام شد. نمونه‌های شاهد نیز برای مقایسه در نظر گرفته شدند. در شکل ۹ میزان تغییرات زاویه تماس در نمونه‌های چوب معمولی بدون پوشش و پوشش داده شده با اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات قبل و بعد از هوازدگی ارائه شده است. نتایج نشان داد که قبل از هوازدگی در نمونه کنترل (بدون پوشش)

به‌طورکلی نتایج نشان داد که همه نمونه‌ها در اثر قرارگرفتن در شرایط هوازدگی دچار تغییر رنگ شده‌اند. تغییر رنگ ایجاد شده در اثر هوازدگی چوب اغلب ناشی از تخریب ترکیبات دیواره‌های سلولی به‌ویژه لیگنین و تغییر میزان گروه‌های کربونیل در ساختار چوب است (۱). در مورد پوشش‌ها نیز تغییر رنگ ایجاد شده در اثر هوازدگی ناشی از تغییرات شیمیایی رخ داده در اثر هوازدگی است که شاید به‌ویژه تغییر شاخص کربونیل در پوشش اپوکسی‌اکریلات در اثر هوازدگی و گسیختگی زنجیرهای یورتانی در پوشش یورتان‌اکریلات در اثر تابش امواج UV، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار باشند. با این وجود، تغییرات رنگی سطح چوب لزوماً به‌تنهایی توسط پرتو ماوراءبنفش ایجاد نمی‌شود. تغییر رنگ تحت شرایط مرطوب‌تر، ممکن است در نتیجه فعالیت

نمونه کنترل کاهش یافت و پس از گذشت ۲۰ ثانیه اثری از قطره آب در سطح چوب مشاهده نشد. دلیل کاهش زاویه تماس در اثر هوازگی به خاطر تغییرات شیمیایی سطح چوب و افزایش غلظت گروه‌های آب‌دوست می‌باشد. همچنین، ویژگی‌های فیزیکی سطح مانند ایجاد ترک، ناهمواری و افزایش زبری سطح ناشی از هوازگی نیز بر زاویه تماس سطح چوب تأثیرگذار است (۷). در همه نمونه‌های پوشش داده شده (اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات) زاویه تماس بعد از هوازگی افزایش یافت.

پس از گذشت ۴۸ ثانیه اثری از قطره آب در سطح چوب مشاهده نشد که بیانگر، کشش سطحی و آب‌دوستی بالا در این نمونه است. همچنین، نتایج نشان داد که قبل از هوازگی در نمونه‌های پوشش داده شده (اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات) زاویه تماس کم‌تر از نمونه کنترل است و با گذشت زمان ۶۰ ثانیه، زاویه تماس کم‌ترین تغییرات را داشته است. لازم به ذکر است که آزمون زاویه قطره آب بر روی نمونه‌های یورتان‌اکریلات در قسمت‌هایی انجام شد که پوشش سالم بود. پس از هوازگی، زاویه تماس



شکل ۹- میزان زاویه تماس قطره آب نمونه‌ها قبل و بعد از هوازگی.

Figure 9. Water-droplet contact angle of specimens before and after weathering.

پوشش‌های یورتان‌اکریلات قبل و بعد از هوازگی چسبندگی بیشتری داشتند. مقاومت چسبندگی پوشش اپوکسی‌اکریلات به دلیل نفوذ بهتر پوشش به داخل بافت چوب بیشتر از یورتان‌اکریلات است. همچنین می‌توان گفت پوشش اپوکسی‌اکریلات توانسته است پیوند (کووالانس) بهتری با سطح چوب داشته باشد (۳، ۱۶).

جدول ۳ گروه‌بندی نتایج آزمون چسبندگی خراشی قبل و بعد از هوازگی را نشان می‌دهد. به علت چسبندگی بالای پوشش‌ها بر روی چوب، امکان اندازه‌گیری مقاومت به چسبندگی با آزمون چسبندگی کششی به روش پول‌آف^۱ مطابق استاندارد ASTM D 4541 میسر نشد. نتایج نشان داد که در اثر هوازگی مقاومت به چسبندگی پوشش‌ها کاهش یافت و پوشش‌های اپوکسی‌اکریلات نسبت به

1- Pull-off

جدول ۳- گروه‌بندی آزمون چسبندگی خراشی قبل و بعد از هوازدگی.

Table 3. Cross-cut test grouping before and after weathering.

بعد از هوازدگی After weathering	قبل از هوازدگی Before weathering	نمونه Sample
4B	5B	E
2B	3B	U

5B هیچ بخشی از پوشش از روی سطح جدا نشده است، 4B سطح خالی‌شده از پوشش کم‌تر از ۵ درصد کل سطح است، 3B سطح خالی‌شده از پوشش تقریباً بین ۵-۱۵ درصد کل سطح است، 2B سطح خالی‌شده از پوشش تقریباً بین ۱۵-۳۵ درصد کل سطح است، 1B سطح خالی‌شده از پوشش تقریباً بین ۳۵-۶۵ درصد کل سطح است، 0B سطح خالی‌شده از پوشش بیش‌تر از ۶۵ درصد کل سطح است.

نتیجه‌گیری

نشان داد به‌طوری‌که تغییرات شاخص کربونیل بسیار جزئی بود. استفاده از پوشش‌های اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات باعث افزایش زاویه تماس بعد از هوازدگی شد. پوشش‌های اپوکسی‌اکریلات نسبت به پوشش‌های یورتان‌اکریلات قبل و بعد از هوازدگی چسبندگی بیش‌تری داشتند، به همین دلیل در نمونه‌های حاوی پوشش اپوکسی‌اکریلات زبری کم‌تر تحت‌تأثیر هوازدگی قرار گرفت. در همه آزمون‌ها پوشش اپوکسی‌اکریلات نسبت به پوشش یورتان‌اکریلات بهتر عمل کرده و موجب مقاومت بیش‌تر چوب در برابر هوازدگی شد؛ بنابراین، با توجه به همه مزایای فنی و اقتصادی و محیط‌زیستی یاد شده این نوع پوشش UV پخت، می‌توان آن را به عنوان یک پوشش مناسب برای حفاظت از چوب در برابر هوازدگی معرفی کرد.

در این پژوهش، چوب نوئل با استفاده از دو رزین شفاف UV پخت شامل اپوکسی‌اکریلات و یورتان‌اکریلات پوشش داده شد و مقاومت به هوازدگی نمونه شاهد و پوشش‌دار طی ۶ ماه هوازدگی طبیعی بررسی شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت چوب شاهد (بدون پوشش) مقاومت کمی نسبت به هوازدگی داشت. بعد از هوازدگی ترک‌های زیادی در سطح چوب بدون پوشش و دارای پوشش یورتان‌اکریلات مشاهده شد درحالی‌که نمونه حاوی اپوکسی‌اکریلات تقریباً سالم باقی ماند و آثاری از ترک‌های سطحی بعد از هوازدگی بر روی آن مشاهده نشد. پوشش اپوکسی‌اکریلات در مقایسه با پوشش یورتان‌اکریلات به تغییر رنگ ناشی از هوازدگی مقاوم‌تر بود. در اثر هوازدگی، شیمی سطح نمونه‌های حاوی اپوکسی‌اکریلات تغییرات کم‌تری نسبت به نمونه‌های شاهد و حاوی پوشش یورتان‌اکریلات

منابع

1. Akbarnegad, M. 2014. Use of nanocellulose to increase the weathering resistance of acrylic coating used on beech surface. M.Sc. thesis. Groan University of Agricultural Sciences and natural Resources, Groan, Iran. 75p. (In Persian)
2. Akhtar, M. 2010. Investigation of microscopic structure and chemical changes in beech wood during weathering process. J. of Wood and Forest Science and Technology. 17: 3. 113-124. (In Persian)
3. Ansari, F., Lindh, E.L., Furo, I., Johansson, M.K., and Berglund, L.A., 2016. Interface tailoring through covalent hydroxyl-epoxy bonds improves hygromechanical stability in nanocellulose materials. Composites Science and Technology. 134: 175-183.

4. Bongiovanni, R., Montefalco, F., Priola, A., Marchionni, N., Lazzara, S., Suozzi, L., and Amador, B. 2002. High performance UV-cured coatings for wood protection. *Progress in Organic Coatings*. 45: 359-363.
5. Chang, S.T., and Chou, P.L. 1999. Photo-discoloration of UV-curable acrylic coatings and the underlying wood. *Polymer Degradation and Stability*. 63: 3. 435-439.
6. Chavoshi, N., Rostami, M., Ghahari, M., and Najafi, F. 2003. UV-curable silica-novolac epoxy methacrylate hybrid resin for surface coating: synthesis and characterization. *Color Science and Technology*. 8: 295-305.
7. Chehreh, F., and Mastari Farahani, M. 2015. Surface droplet contact angle and colour characteristics of eastern cottonwood treated with nano-copper oxide and exposed to natural weathering. *J. International Wood Products*. 6: 2. 69-71.
8. Choi, J.H., and Kim, H.J. 2006. Three hardness test methods and their relationship on UV-curable epoxy acrylate coatings for wooden flooring systems. *J. of Industrial and Engineering Chemistry*. 12: 3. 412-417.
9. Dawson, S.W., Singh, A.P., Kroese, H.W., Schweitzer, M.A., Gallagher, S., Riddiough, S.J., and Wu, S. 2008. Enhancing exterior performance of clear coatings through photo stabilization of wood Part 2: coating and weathering performance. *J. of Coatings Technology and Research*. 5: 2. 207-219.
10. Decker, C., Masson, F., and Schalk, R. 2004. Weathering resistance of water-based UV-cured polyurethane-acrylate coatings. *Polymer Degradation and Stability*. 83: 2. 309-320.
11. Decker, C., Moussa, K., and Bedikah, T. 1991. Photodegradation of UV-cured coatings II. Polyurethane-acrylate networks. *J. of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*. 29: 5. 739-747.
12. Evans, P.D. 2012. Weathering of wood and wood composites. P 151-216. In: R.M. Rowell (ed). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC press. Boca Raton, USA.
13. Goleman, H. 2019. The effect of alkyd coatings on the color changes and adhesion strength in parallel and perpendicular to fibers of date palm trees. *Forest and Wood Products*. 72: 1. 67-77.
14. González, M.G., Cubanelles, J.C., and Baseload, J. 2012. Applications of FTIR on epoxy resins-identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake. P 261-284. In: T. Theophile (ed). *Infrared spectroscopy-materials science, engineering and technology*. InTech. Madrid.
15. Hardies, R., Jessop, J.L., Peters, F.E., and Kessler, M.R. 2013. Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 49: 100-108.
16. Izee, S., Yousefi, H., Mashkour, M., and Rasouli, D. 2020. Fabrication and properties evaluation of three layered transparent nanocomposite reinforced with cellulose and chitin nanofibers. *J. of Wood and Paper Industries*. 10: 4. 495-505.
17. Kenong, D., Kenong, N., and Akepiro, S. 2011. Curing behavior of a UV-curable coating based on urethane acrylate oligomer: the influence of reactive monomers. *J. of Science and Technology*. 3: 2. 201.
18. Lebow, S., and Groenier, S. 2006. Preservative treated wood and alternative products in the forest service. *Forest Service USDA*. 9: 3. 257-277.
19. Macleod, I.T., Scully, A.D., Ghiggino, K.P., Ritchie, P.J.A., Paravagna, O.M., and Leavy, B. 1995. Photo degradation at the wood clear coat interface. *Wood Science and Technology*. 29: 9. 183-189.
20. Mirabedini, S.M., Sabzi, M., Zohuriaan-Mehr, J., Atai, M., and Behzadnasab, M. 2011. Weathering performance of the polyurethane nanocomposite coatings containing silane treated TiO₂ nanoparticles. *Applied Surface Science*. 257: 9. 4196-4203.

21. Ramesh, K., Nor, N.M., Ramesh, S., Vengadaesvaran, B., and Arof, A.K. 2013. Studies on electrochemical properties and FTIR analysis of epoxy polyester hybrid coating system. *International. J. of Electrochemical Science*. 8: 8422-8432.
22. Sow, C., Riedl, B., and Blanchet, P. 2011. UV-waterborne polyurethane-acrylate nanocomposite coatings containing alumina and silica nanoparticles for wood: mechanical, optical, and thermal properties assessment. *J. Coating Technology and Research*. 8: 2. 211-221.



The use of UV curing epoxy-acrylate and urethane-acrylate coatings for improving the weathering resistance of wood

H. Karbalaei¹, A. Tarmian^{*2}, D. Rasouli³ and S. Pour Mahdian⁴

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran,

²Associate Prof., Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran,

³Assistant Prof., Dept. of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

⁴Associate Prof., Dept. of Polymer Engineering and Color Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 12.31.2020; Accepted: 04.06.2021

Abstract

Background and Objectives: One of the most effective methods to protect wood against weathering is the use of coating. Among different coatings, light-curing ones have been attracted much attention due to less investment, low energy consumption, low cost, high solid content and solvent-free, high speed curing, and yield, etc. In this study, the effect of two transparent UV-curing coatings, including epoxy acrylate and urethane acrylate on the weathering resistance of spruce wood was investigated.

Materials and Methods: 200 mm-thick coating layers were applied on the surface of wood using a film applicator followed by UV-curing process of epoxy acrylate and urethane acrylate each for 5 and 40 seconds, respectively. Then, the coated specimens and control one were exposed to 6 months weathering. Finally, the effect of weathering on the specimens was tested using ATR-FTIR, stereo microscope, SEM, calorimetry, roughness, water-droplet contact angle and cross-cut adhesion.

Results: Results showed that the color of uncoated wood specimens changed and their roughness increased due to weathering. Many surface cracks occurred in the uncoated wood after weathering. Many cracks were also developed on the surface of urethane-acrylate coating, while no surface cracks were observed in the epoxy-acrylate coating. The discoloration level caused by weathering was higher in the control sample compared to that of the coated samples. The most resistant coating to the weathering discoloration was epoxy acrylate. The contact angle of weathered samples was affected by the surface cracks and roughness values in addition to changes on the surface chemistry. ATR-FTIR results showed a reduction in the intensity of peaks at wave numbers of 1740 cm^{-1} (vibration of C=O) and 1504 and 1595 cm^{-1} (vibration of C=C in aromatic ring of lignin) which indicates the degradation of hemicelluloses and formation of new carbonyl compounds and lignin degradation in specimens due to the weathering. Reduction in the intensity of peaks at wave numbers of 1510 cm^{-1} (vibration of CO-NH) and 1248 cm^{-1} (vibration of C-O-C) in wood samples coated by urethane acrylate showed the cleavage of urethane chains due to UV radiation. Results also showed that urethane acrylate had lower adhesion strength than epoxy acrylate, and the strength was reduced for both coatings as the result of weathering.

*Corresponding author: tarmian@ut.ac.ir

Conclusion: In general, both epoxy-acrylate and urethane acrylate coatings increased the resistance of wood against weathering. However, epoxy acrylate had much better performance compared to urethane acrylate. The adhesion strength and color of the epoxy-acrylate coating with no surface cracks were less affected by the weathering.

Keywords: Epoxy acrylate, Spruce wood, Urethane acrylate, Weathering