

عملکرد پوشش‌های ضدحریق معمولی و حجیم‌شونده در حفاظت چوب اصلاح حرارتی شده کاج جنگلی در برابر آتش

احمد جاوید^۱، اصغر طارمیان^{۲*}، هادی غلامیان^۳

۱. کارشناس ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

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

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۳

چکیده

در این تحقیق، عملکرد پوشش‌های ضدحریق پایه آب مختلف شامل پوشش ضدحریق معمولی، پوشش ضدحریق حجیم‌شونده و پوشش دهی بعد از تیمار سطحی با مخلوط اسیدبوریک و بوراکس برای بهبود مقاومت به آتش چوب اصلاح حرارتی شده کاج جنگلی قبل و بعد از هوازدگی تسریع شده بررسی شد. از چوب اصلاح شده به روش تجاری ترمووود در دمای ۲۱۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت استفاده شد. آزمون مقاومت به آتش به روش منبع شعله باز و مطابق استاندارد EN ISO 11925-2 انجام گرفت و پارامترهای کاهش جرم، دوام شعله، دوام افروختگی و درصد سطح کربونیزه اندازه‌گیری شد. فرایند پیرولیز نمونه‌های پوشش خورده با استفاده از آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TGA) در محیط نیتروژن نیز بررسی شد. برپایه نتایج، هر سه نوع پوشش، مقاومت به آتش چوب اصلاح حرارتی شده را به‌ویژه از طریق کاهش دوام افروختگی بهبود دادند، ولی پوشش ضدحریق حجیم‌شونده عملکرد مطلوب‌تری داشت و بلافاصله پس از برداشتن نازل آتش، شعله آتش خاموش شد. کاهش جرم ناشی از پیرولیز در پوشش ضدحریق معمولی کمتر و مقدار زغال باقی‌مانده در پایان آزمون در آن بیشتر بود. در هر سه نوع پوشش، کاهش جرم در سه مرحله از منحنی TGA رخ داد و در گام میانی کاهش جرم با شدت بیشتری همراه بود، ولی مرحله سوم تخریب حرارتی در هر یک از پوشش‌ها در دماهای متفاوتی شروع شد. در اثر هوازدگی بر اشتعال‌پذیری چوب اصلاح حرارتی شده افزوده شد و از عملکرد کنندسوزکنندگی همه پوشش‌ها نیز به‌شدت کاسته شد.

واژه‌های کلیدی: اسید بوریک، بوراکس، پوشش ضدحریق، پیرولیز، چوب اصلاح حرارتی شده، مقاومت به آتش.

مقدمه

می‌توان به ترمووود در فنلاند، پلاتو در هلند، چوب تیمار روغن‌گرمایی شده در آلمان، رتیفیکاسیون^۱ در فرانسه و چوب تیمار شده تحت خلأ در برخی کشورها اشاره کرد. در فرایند تولید "ترمووود"، چوب در محیط بخار آب در دمای زیاد (۲۲۰-۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) اصلاح می‌شود و بر اثر آن خاصیت جذب و دفع رطوبت چوب کاهش پیدا

اصلاح حرارتی چوب یکی از روش‌های سازگار با محیط زیست برای بهبود برخی ویژگی‌های آن، به‌ویژه پایداری ابعاد آن در برابر جذب و دفع رطوبت است. تاکنون روش‌های تجاری متعددی برای تولید چوب اصلاح حرارتی شده ابداع شده و توسعه یافته است که از جمله

می‌کند و ثبات ابعاد آن در برابر تغییرات رطوبت بهبود می‌یابد. افزون‌بر این، برخی خواص چوب مانند مقاومت-های بیولوژیکی آن نیز بهبود پیدا می‌کند. با این حال، این نوع چوب اصلاح شده مستعد آتش‌گیری است و حتی ممکن است اشتعال‌پذیری آن بیشتر از چوب معمولی باشد [۴-۱]. در ایران، کاربرد ترموود در مقایسه با دیگر چوب‌های اصلاح حرارتی شده رواج بیشتری دارد. در حال حاضر از ترموود به‌طور گسترده برای مصارف مختلف در فضای باز مانند مبلمان شهری و پارکی، میز، نیمکت سونا، استخر و کفپوش فضای باز و نمای ساختمان استفاده می‌شود. افزون‌بر این، کاربرد این نوع چوب اصلاح شده در ساختمان‌سازی و حتی برای مصارف داخلی و تزئینی نیز رواج یافته است. بنابراین، حفاظت آن در برابر آتش به‌منظور رعایت نکات ایمنی و الزامات مورد نظر ضروری است. حفاظت چوب در برابر آتش به‌طور معمول به دو صورت انجام می‌گیرد: اشباع عمیق با مواد کندسوزکننده مانند اسیدبوریک، بوراکس، مواد پایه‌کربن مانند گرافیت و مونوآمونوم فسفات و نیز پوشش‌دهی با پوشش‌های ضدحریق [۵-۹]. کندسوز شدن چوب بسته به نوع ماده یا پوشش کندسوزکننده استفاده‌شده به‌طور معمول با چهار سازوکار انجام می‌گیرد: تشکیل زغال (سازوکار شیمیایی)؛ رقیق کردن گازهای قابل اشتعال (تئوری گازی)؛ سرامیکی کردن^۱ (تئوری پوشش‌دهی)؛ اصلاح خواص حرارتی مانند میزان هدایت حرارتی (تئوری حرارتی) و جلوگیری از وقوع واکنش زنجیره‌ای (تئوری گازی) [۸]. فرایند سوختن چوب با استفاده از ماده کندسوزکننده ممکن است با دو یا چند سازوکار به‌طور هم‌زمان کنترل شود. تأثیر مواد کندسوزکننده بر فرایند سوختن چوب با کاهش زمان اشتعال‌پذیری آن، کاهش سرعت آزاد شدن حرارت طی سوختن و کاهش سرعت انتشار سطحی شعله همراه است.

یکی از انواع پوشش ضدحریق متداول، پوشش‌های آماس‌شونده (حجیم‌شونده)^۲ است. بیش از ۲۰ سال است که از این نوع پوشش‌ها در صنعت ساختمان و به‌ویژه به‌منظور حفاظت فولاد در سازه‌های فولادی برای جلوگیری از فرو ریختن آنها در آتش‌سوزی استفاده می‌شود [۹]. این پوشش‌ها در معرض آتش بیش از چند برابر ضخامت (تا صد برابر ضخامت) خود حجیم می‌شوند و لایه زغالی و عایق ضخیمی روی سطح تشکیل می‌دهند [۹، ۱۰]. این نوع پوشش‌ها به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند. ۱. پوشش‌های ضدحریق حجیم‌شونده شیمیایی قدیمی که با سازوکار شیمیایی موجب کندسوز شدن ماده می‌شوند. ۲. نوع جدیدی از این پوشش‌ها که حاوی گرافیت حجیم‌شونده‌اند و با سازوکار فیزیکی موجب کندسوز شدن ماده می‌شوند [۱۰]. پوشش‌های ضدحریق حجیم‌شونده به دو صورت آلی و معدنی، پایه اپوکسی یا اکریلیک و در انواع مات و شفاف و نیز به‌صورت پایه حلال، پایه آب یا پودری عرضه می‌شوند. پوشش‌های معدنی برپایه سیلیکات‌های قلیایی‌اند که کاربرد اصلی آنها برای حفاظت چوب و فرآورده‌های چوبی در برابر آتش برای مصارف داخلی است [۱۰]. پوشش‌های حجیم‌شونده آلی، فیلم‌های پوششی نازک برپایه کاتالیزور اسیدی و عامل آب‌زدا (پلی‌فسفات آمونیوم)، تشکیل‌دهنده زغال (مانند پنتاآریتريتول) و ماده تشکیل‌دهنده فوم (ملامین) برپایه اتصال‌دهنده پایه آب یا پایه حلال هستند [۱۰]. فرمولاسیون این نوع پوشش‌ها در عملکرد آنها در برابر آتش بسیار مؤثر است و بر این اساس، تحقیقات متعددی در این زمینه انجام گرفته است [۱۳-۱۰]. چانگ و همکاران (۲۰۰۹) به این نتیجه رسیدند که مواد حجیم‌کننده برپایه رزین‌های تجاری مانند رزین کویلیمیر اکریلیک استایرن برای بهبود مقاومت به آتش فرآورده‌های چوبی بسیار مؤثرند [۱۱]. ژو و همکاران (۲۰۱۸) با وارد

نمونه‌ها به شرایط رطوبت تعادل، به مدت دو هفته در اتاق کلیما (رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) قرار داده شدند.

پوشش‌های ضدحریق و روش پوشش‌دهی

پوشش‌های ضدحریق پایه آب مورد استفاده در این تحقیق شامل پوشش ضدحریق معمولی برپایه ترکیبات فسفر و پوشش ضدحریق حجیم‌شونده و پوشش پلی‌یورتان پایه‌آب همراه با اسیدبوریک و بوراکس بود. پس از خروج نمونه‌های ترموود از اتاق کلیما و قبل از اعمال پوشش، در دو مرحله به‌وسیله سنباده ۱۵۰ و ۲۲۰ عملیات سنباده‌زنی انجام گرفت. مخلوط اسیدبوریک و بوراکس با غلظت ۸ درصد و با نسبت مساوی در آب با استفاده از یک همزن مغناطیسی حل شده و سپس به‌وسیله قلم‌مو طی دو مرحله روی نمونه‌ها اعمال شد. سپس نمونه‌ها با پوشش پلی‌یورتان پایه آب با ۳۲ درصد ماده جامد با استفاده از دستگاه فیلم‌کش با ضخامت ۲۰۰ میکرون پوشش داده شدند. پوشش‌های ضدحریق معمولی و حجیم‌شونده نیز به روش مشابه با دستگاه فیلم‌کش اعمال شدند.

آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TGA)

به‌منظور بررسی فرایند پیرولیز، آزمون TGA روی نمونه‌های پوشش‌خورده در آزمایشگاه گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران انجام گرفت. برای این منظور، لایه‌های بسیار نازکی از سطح چوب پوشش‌خورده با استفاده از تیغ تیز بریده شد. این آزمون براساس استاندارد ASTM E 1131-08 و در محیط گاز نیتروژن انجام گرفت. پیرولیز نمونه‌ها در دامنه دمایی ۱۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت حرارت‌دهی ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه انجام گرفت. دیگر شرایط آزمایشگاه و مشخصات دستگاه TGA به‌کاررفته در جدول ۱ ارائه شده است.

کردن اسیدبوریک در ساختار پوشش‌های شفاف ضدحریق حجیم‌شونده، مقاومت این نوع پوشش در برابر آتش را بهبود بخشیدند و سرعت انتشار دود را کاهش دادند [۱۲]. مجموعه تحقیقات و پیشرفت‌های اخیر درباره پوشش‌های ضدحریق حجیم‌شونده در مقاله‌ای مروری توسط پوری و خان (۲۰۱۷) ارائه شده است [۱۰]. اشباع چوب با مواد کندسوزکننده به‌نسبت هزینه‌بردار است، درحالی‌که استفاده از پوشش‌های ضدحریق روشی ارزان و کارآمد است. بنابراین در تحقیق حاضر امکان بهبود مقاومت به آتش ترموود کاج جنگلی با استفاده از انواع پوشش ضدحریق بررسی شد. در حال حاضر، ترموود کاج جنگلی رایج‌ترین نوع ترموود در ایران به شمار می‌آید و با توجه به الزامی بودن اخذ گواهینامه آتش برای محصولات مصرفی در نمای ساختمان به‌منظور دریافت گواهی پایان کار، حفاظت ترموود در برابر آتش به‌دلیل ضعف این فراورده به هنگام آتش‌سوزی ضروری است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

الوار ترموود کاج جنگلی (*Pinus sylvestris L.*) به ابعاد ۲×۱۰×۳۰ سانتی‌متر از شرکت مازند چوب آریا تهیه شد. ترموود تولیدشده از نوع ترمو-D بود که عملیات اصلاح آن در دمای ۲۱۲ درجه سانتی‌گراد به مدت سه ساعت انجام گرفته بود. ترموود در دو نوع استاندارد ترمو-S و ترمو-D تولید می‌شود. حرف S نشان‌دهنده ثبات است و در کاربرد این نوع ترموود، ثبات ابعاد مهم است. حرف D نشان‌دهنده دوام است و در کاربرد نهایی این نوع ترموود، دوام زیستی مهم است. ترمو-D در دمای بیشتری در مقایسه با ترمو-S تولید می‌شود. سپس، نمونه‌ها به ابعاد ۲×۱۰×۱۵ (شعاعی × مماسی × طولی) سانتی‌متر برش داده شدند. در ادامه، به‌منظور رسیدن

جدول ۱. شرایط آزمایش TGA و مشخصات دستگاه استفاده شده

مشخصات دستگاه	مشخصات pan	وزن نمونه (میلی گرم)	سرعت گرمایش (درجه سانتی گراد در دقیقه)	خلوص گاز N ₂ (درصد)	سرعت جریان (میلی لیتر در دقیقه)
TGA STGA	جنس Al ₂ O ₃	۳۴	۱۰	۹۹/۹۹	۱۰۰



شکل ۱. دستگاه هوازدگی تسریع شده گاردنر

آزمون هوازدگی تسریع شده

در قسمت تحتانی دستگاه قرار می‌گیرند. مدت زمان هر چرخش کامل چرخ دوار ۹۰ دقیقه بود. از لامپ‌هایی با نام تجاری لامپ‌های خورشیدی استفاده شد که طیف نوری آنها شبیه امواج خورشیدی است و در ناحیه طول موج ۳۶۰ نانومتر دارای پیک قوی هستند. برای نصب نمونه‌ها روی دستگاه، در ابتدا، دو سمت آنها با مت ۵ سوراخ شد و سپس نمونه‌ها با استفاده از بست کمربندی پلاستیکی روی دستگاه ثابت شدند. مدت زمان هوازدگی ۷۵۰ ساعت (حدود یک ماه) بود.

آزمون مقاومت به آتش

مقاومت به آتش نمونه‌ها براساس استاندارد EN ISO 11925-2 مطابق روش منبع شعله باز اندازه‌گیری شد [۱۴]. تصویری از دستگاه مقاومت به آتش مورد استفاده و مشخصات آن در شکل ۲ ارائه شده است. برای این منظور، نمونه‌ها پس از خشک شدن در آون در دمای

عملکرد هر یک از پوشش‌های ضدحریق در برابر آتش بعد از هوازدگی تسریع شده نیز دوباره بررسی شد. برای این منظور، از دستگاه هوازدگی گاردنر در آزمایشگاه حفاظت و اصلاح چوب گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران استفاده شد (شکل ۱). این آزمون براساس روش پیشنهادی مرکز فنی چوب و مبلمان فرانسه (CTBA)^۱ انجام گرفت [۱۳]. سرعت این دستگاه دوازده برابر هوازدگی طبیعی است و نتایج آن نسبت به دستگاه‌های هوازدگی تسریع شده QUV به شرایط هوازدگی طبیعی نزدیک‌تر است. در این دستگاه، نمونه‌ها روی یک چرخ دوار نصب می‌شوند و سپس با چرخش تدریجی و آهسته و در چرخه‌های مشخص، در معرض لامپ‌های شبیه‌ساز نور خورشید در قسمت فوقانی دستگاه و مخزن آب واقع

نتایج و بحث

پیرولیز ترمووود پوشش‌دهی‌شده با پوشش‌های

ضدحریق

نتایج آزمون TGA نمونه‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که کاهش جرم ناشی از پیرولیز در نمونه پوشش‌خورده با پوشش ضدحریق معمولی به‌طور محسوسی کمتر از پوشش‌های دیگر بود (جدول ۲). کاهش جرم در پایان آزمون برای نمونه‌های پوشش‌دهی‌شده با پوشش ضدحریق حجیم‌شونده، پوشش ضدحریق معمولی و پوشش همراه با اسیدبوریک و بوراکس به ترتیب ۹۷/۲، ۸۸ و ۹۴/۷ درصد بود. کاهش جرم ناشی از پیرولیز در همه نمونه‌ها در سه مرحله رخ داد، ولی الگوی تغییرات کاهش جرم در آنها طی تخریب حرارتی متفاوت بود. این مسئله ممکن است ناشی از سازوکارهای متفاوت تأثیرگذار هر یک از پوشش‌های مورد نظر در کنترل فرایند سوختن چوب باشد که در بخش‌های بعدی به آنها اشاره خواهد شد. کاهش جرم در طی آزمون TGA ناشی از خشک شدن یا آزاد شدن گازها و مواد فرار است. کاهش جرم جزئی در ابتدای منحنی و در مرحله اول (دامنه دمایی ۱۸۰-۱۰ درجه سانتی‌گراد) ممکن است ناشی از خروج آب و هیدراتاسیون جزئی پوشش‌ها باشد. کاهش جرم در این مرحله در نمونه پوشش‌دهی‌شده با پوشش ضدحریق حجیم‌شونده بیشتر بود. به‌طور معمول در فرایند پیرولیز چوب نیز کاهش جرم اندکی در این مرحله از فرایند به‌دلیل خروج رطوبت و مواد فرار از چوب و تا حدودی تخریب همی‌سلولزها رخ می‌دهد [۱۵]. بیشترین کاهش جرم در هر سه نمونه پوشش‌خورده در مرحله دوم رخ داد و از شیب منحنی در مرحله سوم فرایند پیرولیز کاسته شد. به‌طور متوسط ۵۰ درصد از کاهش جرم نمونه‌ها در مرحله دوم رخ داد. کاهش جرم در مرحله دوم فرایند پیرولیز ممکن است مربوط به تخریب سلولز و همی‌سلولزهای ترمووود و نیز

متوسط ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۲۴ ساعت، با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شدند و سپس به مدت ۱۲۰ ثانیه با فشار ثابت گاز خروجی در معرض آتش قرار گرفتند. دهانه نازل آتش به فاصله ۵ میلی‌متر از سطح نمونه‌ها و با زاویه ۴۵ درجه قرار گرفت. بعد از برداشتن نازل آتش، دوام شعله‌وری و دوام افروختگی (بعد از خاموش شدن شعله) برحسب ثانیه با استفاده از کروномتر اندازه‌گیری شد. درصد سطح کربونیزه شدن نمونه‌ها نیز با نرم‌افزار Image-J اندازه‌گیری شد. در پایان سوختن، نمونه‌ها دوباره توزین شدند و درصد کاهش جرم ناشی از سوختن نیز محاسبه شد.



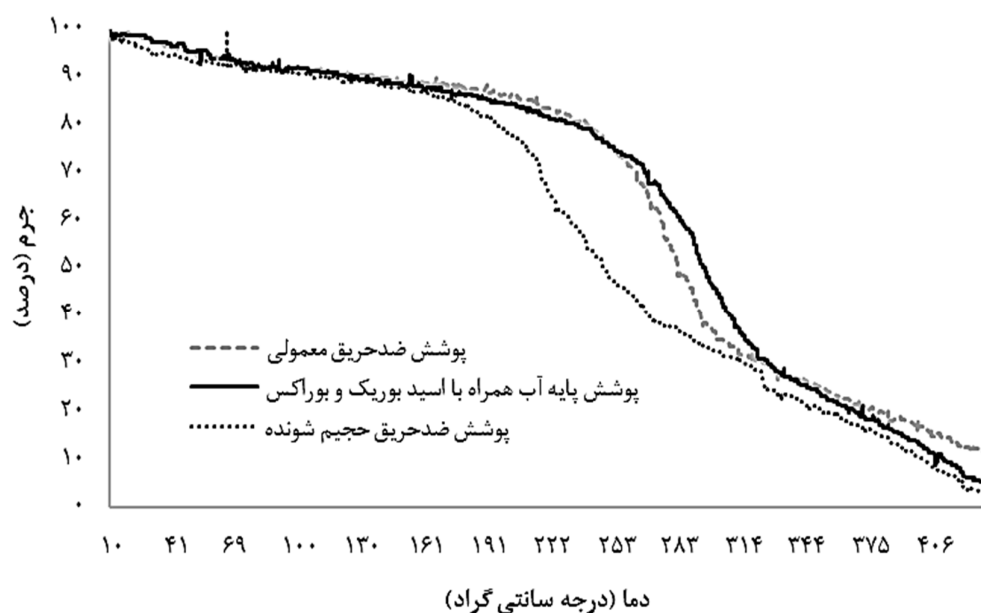
شکل ۲. تجهیزات آزمون مقاومت به آتش و مشخصات آن

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل نتایج در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. برای هر تیمار از سه تکرار استفاده شد. از آزمون تجزیه واریانس یکطرفه (ANOVA) برای بررسی تفاوت‌های معنی‌دار بین میانگین‌ها و از آزمون چنددامنه‌ای دانکن نیز برای گروه‌بندی آنها در سطح اعتماد ۹۵ درصد استفاده شد.

باقی مانده در دمای ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد در نمونه پوشش دهی شده با پوشش ضدحریق حجیم‌شونده کمتر از نمونه‌های دیگر است. مقدار زغال باقی مانده در نمونه‌های پوشش دهی شده با پوشش ضدحریق حجیم‌شونده، پوشش ضدحریق معمولی و پوشش پایه آب همراه با اسیدبوریک و بوراکس به ترتیب ۲/۸، ۱۲ و ۵/۲ درصد بود. بنابراین می‌توان گفت سازوکار کندسوزکنندگی پوشش ضدحریق معمولی بیشتر بر افزایش تشکیل زغال استوار بوده است.

هیدراتاسیون پوشش‌ها باشد [۱۶]. شروع مرحله سوم منحنی TGA در نمونه‌های تحت بررسی متفاوت بود و در نمونه پوشش دهی شده با پوشش ضدحریق حجیم‌شونده در دمای کمتری آغاز شد. مرحله سوم منحنی TGA اغلب مربوط به تخریب لیگنین است. لیگنین به دلیل پایداری شیمیایی قوی مشتقات بنزن- پروپیل، از پایداری حرارتی بیشتری در مقایسه با سلولز و همی سلولز برخوردار است و تخریب آن در دماهای بیشتر و با سرعت کمتری رخ می‌دهد [۱۵]. نتایج همچنین نشان داد که مقدار زغال



شکل ۳. نتایج آزمون TGA برای نمونه‌های پوشش خورده

جدول ۲. نتایج آنالیز وزن سنجی حرارتی ترمو و دماهای پوشش دهی شده در محیط نیتروژن

نوع پوشش	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم
	دما کاهش جرم (درجه سانتی‌گراد)	کاهش جرم دما (درصد)	کاهش جرم دما (درصد)
پوشش پلی‌یورتان پایه آب همراه با اسیدبوریک و بوراکس	۱۸۰-۱۰	۳۲-۱۸۰	۴۳۰-۳۲۰
پوشش ضدحریق معمولی	۱۸۰-۱۰	۳۰-۱۸۰	۴۳۰-۳۰۰
پوشش ضدحریق حجیم‌شونده	۱۸۰-۱۰	۲۷۵-۱۸۰	۴۳۰-۲۷۵

تأثیر انواع پوشش بر مقاومت به آتش ترمووود

نتایج نشان داد که در بین پوشش‌ها، فقط پوشش ضدحریق حجیم‌شونده سبب کاهش معنی‌دار در دوام شعله ترمووود شد (شکل ۴-الف). در مقابل، اعمال هر یک از انواع مواد کندسوزکننده و پوشش‌های به‌کاررفته در این تحقیق، به‌صورت معنی‌داری موجب کاهش دوام افروختگی شد (شکل ۴-ب). پس از برداشتن نازل آتش، میانگین دوام شعله در ترمووود بدون پوشش ۹۹ ثانیه بود، ولی پس از پوشش‌دهی با پوشش ضدحریق حجیم‌شونده، دوام شعله برابر با صفر بود. متوسط دوام افروختگی ترمووود ۱۹/۶ ثانیه بود و پس از پوشش‌دهی با هر یک از انواع پوشش و پس از خاموش شدن شعله، هیچ یک از نمونه‌ها دچار افروختگی نشدند و فرایند سوختن به‌سرعت متوقف شد. نتایج همچنین نشان داد که کاهش جرم ناشی از سوختن (شکل ۵-الف) و مقدار سطح کربونیزه (شکل ۵-ب) ترمووود متأثر از پوشش‌دهی با پوشش‌های استفاده‌شده نبود. نتایج تحقیقات گذشته نیز حاکی از آن است که پوشش ضدحریق حجیم‌شونده به‌طور چشمگیری مقاومت به آتش چوب را بهبود می‌دهد [۸-۱۲]. این پوشش‌ها در اثر آتش‌گیری چند برابر ضخامت خود پف می‌کنند و یک لایه زغال عایق ضخیم روی ماده تشکیل می‌دهند که مانع انتقال حرارت و آتش به سطح چوب می‌شود [۸، ۱۰]. پوشش‌های ضدحریق به‌طور معمول با سه سازوکار یعنی به تأخیر انداختن زمان شعله‌ور شدن، کاهش سرعت آزاد شدن حرارت طی سوختن و کاهش سرعت انتشار شعله موجب حفاظت ماده در برابر آتش می‌شوند [۱۷]. در پوشش‌های ضدحریق حجیم‌شونده، سازوکار حجیم‌شدگی پوشش در اثر تماس با آتش طی شش مرحله شامل نرم شدن اتصال‌دهنده (چسب)، آزاد شدن اسید، کربونیزه شدن، تشکیل گاز، فوم شدن و منجمد شدن رخ می‌دهد [۱۷]. در نمونه‌های پوشش‌خورده با پوشش پلی‌یورتان همراه با اسیدبوریکن و بوراکس (به‌عنوان مواد کندسوزکننده) می‌توان

گفت بهبود مقاومت به آتش با سه سازوکار رقیق کردن گازهای قابل اشتعال، سرامیکی کردن و تشکیل زغال در دماهای زیاد به‌طور همزمان رخ داده است [۵، ۸]. اعتقاد بر این است که اسیدبوریکن فرایند دهیدراتاسیون و دیگر واکنش‌های حذف‌کننده اکسیژن در چوب را در دماهای به‌نسبت کم (۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) تسریع می‌کند و بدین ترتیب مقدار تشکیل زغال را افزایش می‌دهد و موجب بهبود مقاومت به آتش می‌شود [۱۸]. بوراکس از سرعت انتشار شعله می‌کاهد، ولی موجب افزایش افروختگی می‌شود. در مقابل، اسیدبوریکن از شدت افروختگی می‌کاهد، ولی تأثیر کمی بر سرعت انتشار شعله دارد، به همین دلیل این دو ترکیب کندسوزکننده به‌طور معمول با همدیگر استفاده می‌شوند [۱۸].

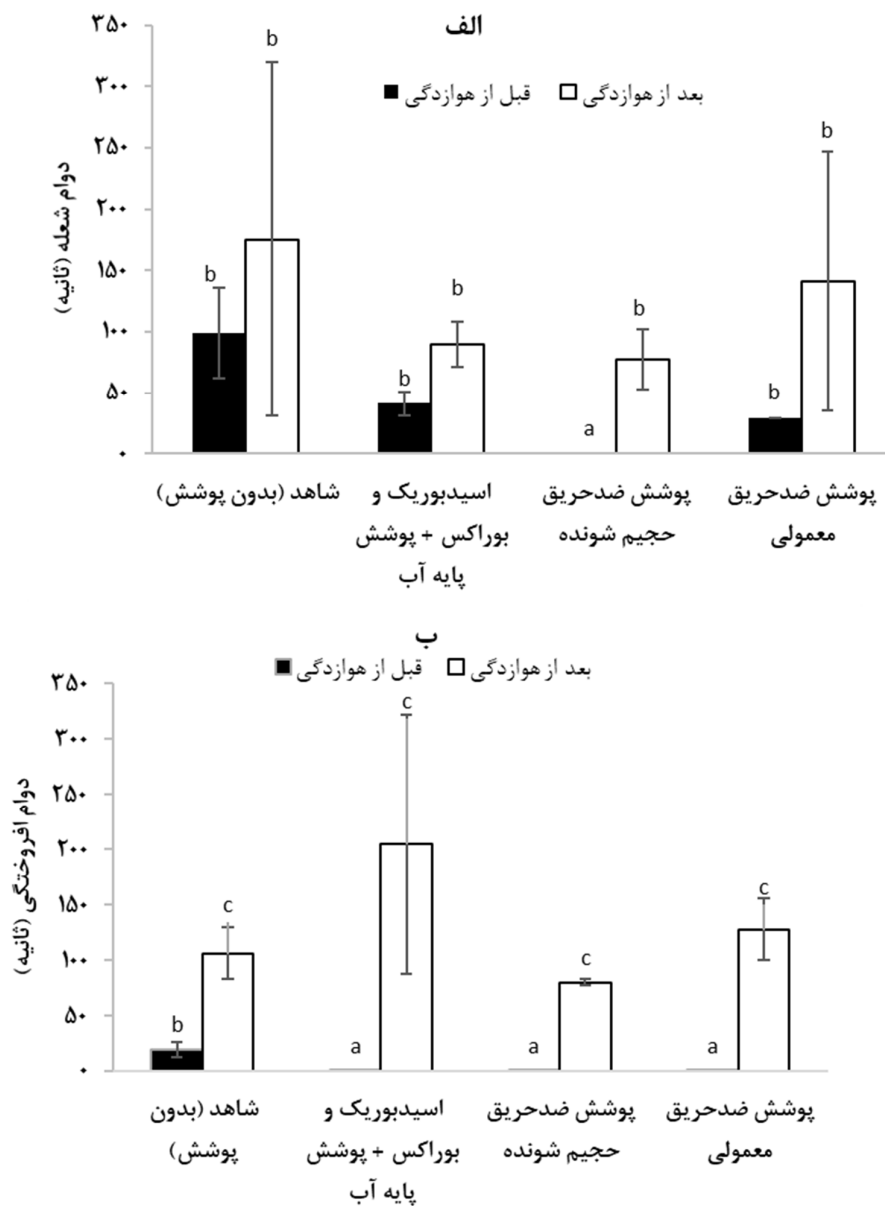
تأثیرات هوازدگی بر مقاومت به آتش ترمووود و

عملکرد پوشش‌های ضدحریق

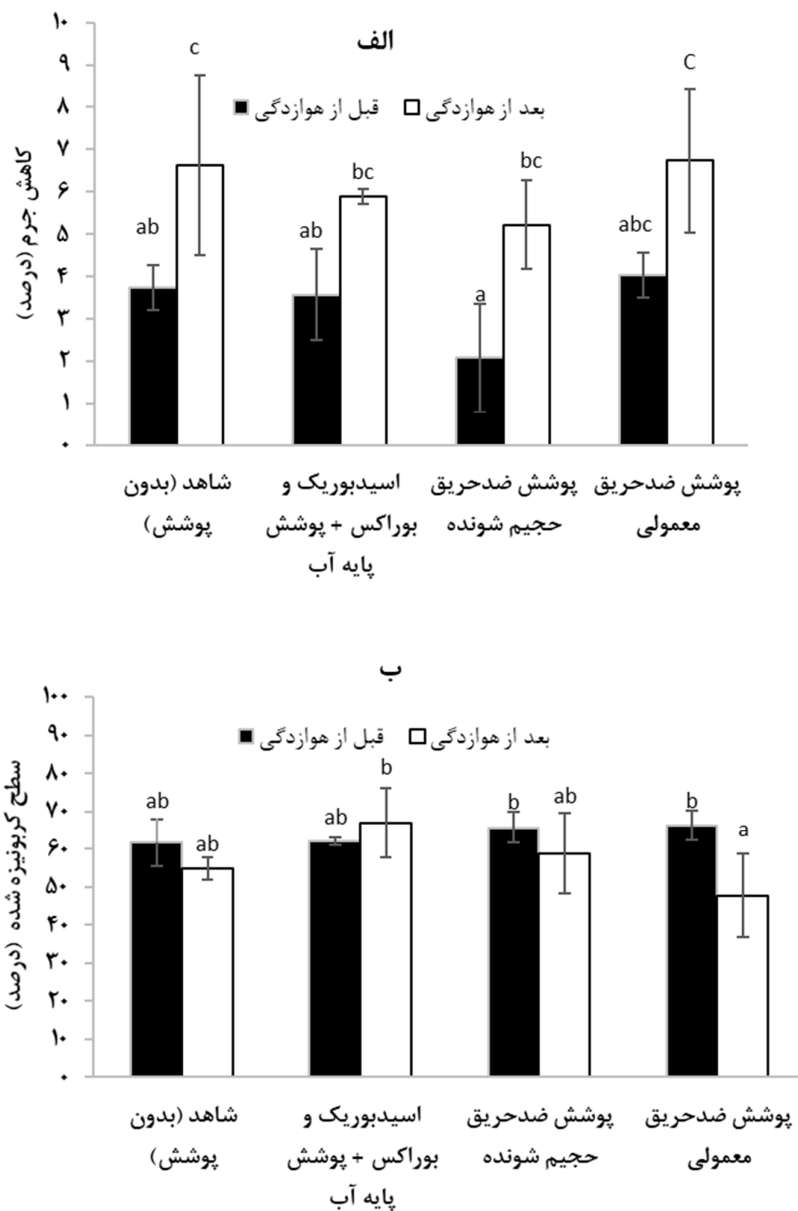
نتایج نشان داد که در اثر هوازدگی تسریع‌شده از مقاومت به آتش ترمووود به‌طور معنی‌داری کاسته می‌شود. مقدار کاهش جرم ترمووود و دوام افروختگی آن پس از هوازدگی افزایش یافت، ولی هوازدگی بر دوام شعله و مقدار سطح کربونیزه آن تأثیر معنی‌داری نداشت (شکل ۴). همچنین در اثر هوازدگی، دوام شعله در نمونه پوشش‌خورده با پوشش ضدحریق حجیم‌شونده افزایش معنی‌داری نشان داد، ولی دوام شعله پوشش‌های دیگر متأثر از هوازدگی نبود (شکل ۴-الف). قبل از هوازدگی، شعله آتش در نمونه با پوشش ضدحریق حجیم‌شونده، بلافاصله بعد از برداشتن نازل آتش خاموش شد، درحالی که بعد از هوازدگی، میانگین دوام شعله در این نمونه هوازده برابر با ۷۷/۶ ثانیه بود. بعد از هوازدگی، تفاوت معنی‌داری بین دوام افروختگی ترمووود شاهد و ترموودهای پوشش‌خورده مشاهده نشد. دوام افروختگی در همه نمونه‌ها پس از هوازدگی به‌شدت افزایش یافت (شکل ۴-ب). کاهش جرم ناشی از سوختن ترمووود

شاهد و پوشش دهی شده با پوشش ضدحریق حجیم‌شونده پس از هوازده‌گی به ترتیب ۷۶/۵ و ۸۴/۲ درصد افزایش یافت. افزایش دوام افروختگی و کاهش جرم ناشی از سوختن ترموود پس از هوازده‌گی ممکن است ناشی از تخریب پلیمرهای دیواره سلولی به‌ویژه لیگنین در اثر هوازده‌گی باشد. فرایند سوختن چوب بدون شعله (دوام افروختگی) توسط لیگنین کنترل می‌شود [۴]. همچنین این نتایج بیانگر این مسئله است که اگرچه پوشش ضدحریق حجیم‌شونده استفاده شده در این تحقیق عملکرد مطلوبی در کاهش اشتعال‌پذیری ترموود دارد، در اثر هوازده‌گی به‌علت تخریب پوشش و احتمالاً آبشویی مواد فعال کندسوزکننده، از کارایی و خاصیت حجیم‌شوندگی آن کاسته می‌شود. در مقابل، هوازده‌گی بر مقدار کاهش جرم نمونه‌های پوشش‌خورده با پوشش ضدحریق معمولی و پوشش پلی‌یورتان همراه با اسیدبوریک و بوراکس تأثیر معنی‌داری نداشت (شکل ۵-الف). شایان ذکر است که عملکرد هر یک از انواع پوشش در برابر هوازده‌گی متفاوت است. تحقیقات گذشته نیز حاکی از آن است که برخی پوشش‌ها از آبشویی مواد کندسوزکننده از چوب طی هوازده‌گی ممانعت می‌کنند، درحالی‌که برخی دیگر از پوشش‌ها در اثر هوازده‌گی دچار ترک‌خوردگی شده یا به‌طور موضعی به‌علت کاهش چسبندگی پوشش، از سطح چوب جدا می‌شوند و در نتیجه مواد فعال کندسوزکننده به‌راحتی از ساختار پوشش، آبشویی شده و خارج می‌شوند [۱۹]. همچنین، تفاوت معنی‌داری در مقدار کاهش جرم ناشی از سوختن نمونه‌های هوازده‌ مشاهده نشد. هوازده‌گی فقط بر سطح کربونیزه نمونه پوشش‌خورده با پوشش ضدحریق معمولی تأثیرگذار بود و مقدار آن

۳۸/۷ درصد افزایش یافت. پس از هوازده‌گی، تفاوت معنی‌داری در میانگین سطح کربونیزه نمونه‌های شاهد و پوشش‌خورده مشاهده نشد (شکل ۶). مورفولوژی لایه زغال تشکیل‌شده در پوشش‌های ضدحریق حجیم‌شونده با ساختار چندسلولی آن برای قضاوت در مورد عملکرد این نوع پوشش‌ها در برابر آتش مهم است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، از خاصیت حجیم‌شوندگی این نوع پوشش بعد از هوازده‌گی به‌شدت کاسته شده است. نتایج نشان داد که قبل از هوازده‌گی، ضخامت پوشش ضدحریق حجیم‌شونده پس از قرارگیری در معرض شعله آتش به‌طور میانگین ۲۷/۹ برابر افزایش یافت، درحالی‌که پس از هوازده‌گی، این نوع پوشش فاقد خاصیت حجیم‌شوندگی بود (شکل ۶). بهرانی و همکاران (۲۰۱۸) نیز عملکرد سه نوع پوشش ضدحریق حجیم‌شونده پایه‌آب را روی تخته لایه پس از هوازده‌گی طبیعی برای مدت ۱۲ ماه بررسی کردند و دریافتند که هوازده‌گی از عملکرد این نوع پوشش‌ها در برابر آتش می‌کاهد [۱۷]. در مقابل، روبرتس و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که عملکرد پوشش‌های ضدحریق حجیم‌شونده بر پایه اپوکسی متأثر از هوازده‌گی طبیعی نیست [۲۰]. به‌طور کلی، پوشش‌های ضدحریق بر پایه اپوکسی در مقابل تأثیرات هوازده‌گی در مقایسه با پوشش‌های ضدحریق پایه‌آکرلیک مقاوم‌ترند. نتایج تحقیقات گذشته حاکی از آن است که پس از اشباع چوب با مواد کندسوزکننده، می‌توان با پوشش‌دهی آن با انواع پوشش به‌ویژه پوشش‌های مقاوم به امواج UV از آبشویی مواد کندسوزکننده در اثر هوازده‌گی و در نتیجه کاهش مقاومت به آتش چوب اشباع‌شده ممانعت کرد [۱۹].



شکل ۴. دوام شعله و افروختگی ترموود شاهد و پوشش‌خورده قبل و بعد از هوازدگی



شکل ۵. کاهش جرم ناشی از سوختن و سطح کربونیزه ترموود شاهد و پوشش خورده قبل و بعد از هوازدگی



شکل ۶. ترمووود شاهد و پوشش‌خورده پس از پایان آزمون آتش، قبل و بعد از هوازدگی

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد که همه پوشش‌های ضدحریق استفاده‌شده در این تحقیق از اشتعال‌پذیری ترمووود کاج جنگلی می‌کاهند، ولی عملکرد پوشش ضدحریق حجیم‌شونده در مقایسه با پوشش‌های دیگر بهتر بود. در نمونه پوشش‌دهی‌شده با پوشش ضدحریق حجیم‌شونده، بلافاصله شعله آتش پس از برداشتن نازل آتش خاموش شد، درحالی که پوشش ضدحریق معمولی و پوشش پلی‌یورتان پایه‌آب همراه با اسیدبوریک و بوراکس تأثیر معنی‌داری در کاهش سرعت انتشار شعله نداشتند. کندسوزکنندگی توسط هر سه نوع پوشش به‌واسطه کاهش دوام فروختگی بود و پارامترهای کاهش جرم و سطح کربونیزه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار نگرفتند. نتایج آنالیز وزن‌سنجی حرارتی

حاکمی از کاهش جرم کمتر در پوشش ضدحریق معمولی و افزایش زغال باقی‌مانده در این پوشش بود. در هر سه نوع پوشش، کاهش جرم در گام میانی منحنی TGA بیشتر بود، ولی فرایند پیرولیز در گام سوم در هر یک از پوشش‌ها در دماهای متفاوتی شروع شد. همچنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کندسوزکنندگی در پوشش ضدحریق معمولی اغلب با سازوکار افزایش زغال همراه بود. نتایج نشان داد که در اثر هوازدگی از مقاومت به آتش ترمووود کاج جنگلی کاسته می‌شود. همچنین از عملکرد همه پوشش‌های ضدحریق در اثر هوازدگی کاسته شد و این پوشش‌ها قادر به بهبود مقاومت به آتش ترمووود در شرایط هوازدگی نبودند. پوشش ضدحریق حجیم‌شونده نیز خاصیت حجیم‌شوندگی خود را پس از هوازدگی از دست داد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری

کرد که پوشش‌های مذکور فقط برای حفاظت ترمووود در برابر آتش برای مصارف داخلی قابل استفاده‌اند و برای مصارف بیرونی و فضای باز توصیه نمی‌شوند. در تحقیقات آتی، بررسی عملکرد دیگر پوشش‌های ضدحریق با فرمولاسیون‌های متفاوت به‌منظور حفاظت ترمووود در مصارف بیرونی پیشنهاد می‌شود.

References

- [1]. Čekovská, H., Gaff, M., Osvald, A., Kačík, F., Kubš, J., and Kaplan, L. (2017). Fire resistance of thermally modified spruce wood. *BioResources*, 12(1): 947-959.
- [2]. Martinka, J., Hroncová, E., Chrebet, T., and Balog, K. (2014). The influence of spruce wood heat treatment on its thermal stability and burning process. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(4): 477-486.
- [3]. Gašparík, M., Osvaldová, L.M., Čekovská, H., and Potůček, D. (2017). Flammability characteristics of thermally modified oak wood treated with a fire retardant. *BioResources*, 12(4): 8451-8467.
- [4]. Osvald, A., and Gaff, M. (2017). Effect of thermal modification on flameless combustion of spruce wood. *Wood Research*, 62(4): 565-574.
- [5]. Fazeli, A., and Talaei, A. (2019). The effect of heat treatment and primary impregnation of Fir wood with borax on the fire resistance and thermal behavior. *Wood and Forest Science and Technology Research*, 25 (4): 71-86.
- [6]. Uner, I.H., Deveci, I., Baysal, E., Turkoglu, T., Toker, H., and Peker, H. (2016). Thermal analysis of Oriental beech wood treated with some borates as fire retardants. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(2): 293-304.
- [7]. Parsapuzhou, D. Hejazi, S. Karimi, A., Dost Hosseini, K. and Akhtari, M. (2003). The Effect of fire retardants (Mono Ammonium Phosphate and Borax, Minalite and Pyresot) on Iranian Maple (*Acer insigne* Boiss). *Iranian Journal of Natural Resources*, 56 (3): 257-270.
- [8]. Lowden, L.A., and Hull, T.R. (2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*, 2(4): 1-19.
- [9]. Hao, J., and Chow, W. K. (2003). A brief review of intumescent fire retardant coatings. *Architectural Science Review*, 46(1): 89-95.
- [10]. Puri, R.G., and Khanna, AS. (2017). Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(1): 1-20.
- [11]. Chuang, Sh., Tsai, K.C., Wang, MK., Ko, C.H., and Luen, S.I. (2009). Impact of the intumescent formulation of styrene acrylic-based coatings on the fire performance of thin painted red lauan (*Parashorea spp.*) plywood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67: 407-415.
- [12]. Xu, Z., Chu, Z., and Yan, L. (2018). Enhancing the flame-retardant and smoke suppression properties of transparent intumescent fire-retardant coatings by introducing boric acid as synergistic agent. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(5): 1-12.
- [13]. Roux, M.L., and 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.
- [14]. EN ISO 11925-2 (2002) Reaction to fire tests for building products – Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame – Part 2: Single-flame source test.
- [15]. Xing, D., and Li, J. (2014). Effects of heat treatment on thermal decomposition and combustion performance of *Larix spp.* wood. *BioResources*, 9(3): 4274-4287.
- [16]. Uner, I. H., Deveci, I., Baysal, E., Turkoglu, T., Toker, H., and Peker, H. (2016). Thermal analysis of Oriental beech wood treated with some borates as fire retardants. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(2): 293-304.
- [17]. Bahrani, B., Hemmati, V., Zhou, A., and Quarles, S.L. (2018). Effects of natural weathering on the fire properties of intumescent fire retardant coatings. *Fire and Materials*, 42(4): 413-423.

- [18]. Wang, Q., Li, J., and Winandy, J.E. (2004). Chemical mechanism of fire retardance of boric acid on wood. *Wood Science and Technology*, 38(5): 375-389.
- [19]. Harada, T., Matsunaga, H., Kataoka, Y., Kiguchi, M., and Matsumura, J. (2009). Weatherability and combustibility of fire-retardant-impregnated wood after accelerated weathering tests. *Journal of Wood Science*, 55(5): 359-366.
- [20]. Roberts, T.A., Shirvill, L. C., Waterton, K., and Buckland, I. (2010). Fire resistance of passive fire protection coatings after long-term weathering. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(1): 1-19.

The efficiency of non-intumescent and intumescent coatings for fire protection of thermally-modified Scots pine

A. Javid; M.Sc, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

A. Tarmian*; Assoc., Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

H. Gholamiyan; Assist., Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

(Received: 21 April 2020, Accepted: 23 July 2020)

ABSTRACT

In this study, the performance of different water-based fire retardant coatings including non-intumescent and intumescent coatings and coating after surface treatment with a mixture of boric acid and borax for improving the fire resistance of thermally-modified Scots pine was investigated before and after accelerated weathering. The modified wood used in this study was produced at 212 °C for 3 h according to ThermoWood process. The fire resistance test was carried out using the open flame method according to EN ISO 11925-2 standard. The pyrolysis process of the coated specimens was also studied using Thermogravimetric analysis (TGA) under nitrogen atmosphere. The results showed that all three types of coatings were able to improve the fire resistance of the modified wood, especially by reducing the ignition time, but the intumescent coating was more efficient, and after the fire nozzle removal, the flame spread was stopped immediately. The mass loss due to pyrolysis was lower in the non-intumescent coating and the amount of its residual char was higher at the end of the test compared to other coatings. In all three types of coatings, the mass loss occurred in three stages of the TGA curve, and in the middle stage, the mass loss was more pronounced but the third stage of thermal degradation for each coating began at different temperatures. As a result of weathering, the flammability of the thermally-modified wood was increased and the fire protection performance of all coatings was also significantly reduced.

Keywords: Boric acid, Borax, Fire retardant coating, Pyrolysis, Thermally-modified wood, Fire resistance.

* Corresponding Author, Email: tarmian@ut.ac.ir, Tel: +982632249311