

بررسی اثر نانو ذرات رس و پوشش‌های مختلف در افزایش خواص حرارتی و مقاومت به آتش چوب

هادی غلامیان^{۱*}، احمد جاوید^۲

- ۱- استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، صندوق پستی: ۴۱۱۱.
۲- کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، صندوق پستی: ۴۱۱۱.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۱۰ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۴۰۰/۹/۲۰

چکیده

در این مطالعه تاثیر استفاده از پوشش‌های مختلف بر بهبود مقاومت به شعله و تیمارهای خستگی دمایی به مدت ۱۰۰ ساعت در دمای بین ۳۰- درجه و ۳۰+ درجه در سطح پوشش مورد بررسی قرار گرفت. از گونه چوبی نراد (*Abies alba*) و پوشش‌های آلکیدی، پلی‌یورتان، روغنی، کرم و فسفرسانس در این تحقیق استفاده گردید. همچنین از آزمون‌های وزن‌سنجی حرارتی و زاویه تماس جهت بررسی عملکرد پوشش‌ها استفاده شد. نتایج آزمون‌های میزان دوام شعله، میزان گدازش، درصد کاهش جرم و درصد سطح کربونی شده نشان دادند که مقاومت‌ها در پوشش‌های مختلف متفاوت می‌باشد و به طور کلی بهترین عملکرد به ترتیب مربوط به پوشش فسفرسانس، کرم، روغنی و پلی‌یورتان بود. همچنین نتایج آزمون وزن سنجی حرارتی نشان داد که کمترین مقاومت در میان پوشش‌ها مربوط به پوشش آلکیدی بود که شروع فرآیند کاهش جرم در آن در دمای حدود ۵۰ تا ۷۵ درجه آغاز گردید. از دلایل اصلی در مقاومت کم پوشش‌های آلکیدی به استفاده از تینر و ساختار سخت و شکننده آن می‌توان اشاره نمود. همچنین، نتایج آزمون زاویه تماس نشان داد پس از تیمار خستگی گرمایی، مقاومت به جذب رطوبت در پوشش‌ها به میزان معناداری کاهش یافت. به ترتیب کمترین و بیشترین میزان زاویه تماس در نمونه پوشش خورده فسفرسانس (60°C) و پوشش کرم (130°C) مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: پوشش، حرارت، چوب، وزن‌سنجی حرارتی، زاویه تماس.

Investigating the Effect of Clay Nanoparticles and Various Coatings on Increasing Thermal Properties and Fire Resistance of Wood

H. Gholamiyan*, A. Javid

Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran,
P. O. Box: 4111, Karaj, Iran.

Received: 08-07-2020

Accepted: 31-10-2020

Available online: 11-12-2021

Abstract

In this study, the effect of different coatings on improving flame resistance and fatigue temperature at the coating surface was investigated. *Abies alba* wood species and alkyd, polyurethane, oil, chromium, and phosphorescence coatings were used. Thermal weight tests and contact angle tests were also used to evaluate the performance of the coatings. The results of the flame resistance test, melting rate, mass reduction percentage, and carbonization level showed that the coatings resistances were different. In general, the best performance was for phosphorescence, chromium, oil, and polyurethane coatings, respectively. The results showed that alkyd coatings have the lowest resistance. Its mass reduction began at a temperature of about 50 to 75 degrees. One of the main reasons for the low resistance of alkyd coatings is its thinner, rigid, and fragile structures. The contact angle test results showed that after temperature fatigue treatments, the moisture absorption resistance in the coatings significantly reduced. The lowest and the highest contact angles were observed in the phosphorescent coated sample (60°C) and chromium coating (130°C), respectively. J. Color Sci. Tech. 15(2021), 165-176©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Coating, Heat, Wood, Thermal weighting, Contact angle.

۱- مقدمه

عملکرد منفی چوب و فراورده‌های لیگنوسولوزی در برابر آتش و کاهش مقاومت آن از عوامل کاهش کاربرد آن‌ها محسوب می‌شود. یکی از دلایل مهمی که باعث می‌شود چوب به عنوان یک ماده مناسب به کار رود، حفاظت آن در برابر آتش با استفاده از انواع مواد کندسوز کننده و ضدحریق است. طبق مطالعات انجام شد در سال ۲۰۱۱ به این نتیجه رسیدند که آتش مخرب‌ترین عامل غیر زیستی چوب به حساب می‌آید. همچنین دریافتند که عمل تخریب به‌وسیله آتش در مقایسه با تخریب آهسته‌تر توسط حشرات، قارچ‌ها و حفاران دریایی، بسیار سریع‌تر است [۱]. با وجود ویژگی‌ها و مزیت‌های چوب از جمله: تنوع، تجدیدپذیری، استحکام وابسته به وزن، در دسترس بودن و غیره، این ماده دارای معایب نامطلوبی نظیر ناپایداری ابعاد نیز هست که از تبادل رطوبت با محیط اطراف آن ناشی می‌شود [۲]. مزایا و معایب اشاره شده باعث تغییر خواص مکانیکی، خاصیت خوردگی، قابلیت رنگ‌پذیری، هدایت حرارتی، هدایت الکتریکی و صوتی چوب می‌شود. فناوری نانو از مباحث روز علمی است که کاربرد گسترده‌ای در رشته‌ها از جمله صنعت چوب و کاغذ پیدا کرده است. محققان در این رشته به انجام پژوهش‌های متعددی در این حوزه پرداخته‌اند. از جمله تاثیراتی که این مواد بر خواص چوب و فراورده‌های آن داشته است، می‌توان به افزایش دوام در برابر رطوبت، ویژگی‌های ظاهری مانند سختی [۳، ۴]، مقاومت در برابر عامل‌های زیانبار زیستی، پرتوهای فرابنفش و انواع دیگر اشاره کرد [۵]. عمل تیمار چوب با استفاده از فرآیندهای پوشش‌دهی و یا اشباع می‌تواند دوام طبیعی چوب و سازه‌های چوبی را بهبود بخشد [۶، ۷]. همچنین، تحقیقات باتیستا و همکارانش (۲۰۱۱) و رودریگوویز و همکارانش (۲۰۰۳) نشان داد، نانو پوشش‌ها و پوشش‌های هیبریدی باعث افزایش مقاومت چوب در برابر سایش و خراش می‌شود [۸، ۹]. امروزه پوشش‌های گوناگونی در صنعت چوب و مبلمان مورد استفاده قرار می‌گیرد که پوشش‌های آلکیدی، پلی‌یورتانی و روغنی از رایج‌ترین آنها می‌باشد. در مورد پوشش‌های آلکیدی تحقیقات و مطالعاتی انجام شده است. طبق تحقیقات انجام شده توسط غلامیان و همکارانش (۲۰۱۱) با استفاده از پوشش‌های آلکیدی بر روی چوب به این نتیجه رسیدند که این پوشش باعث افزایش مقاومت چوب به جذب آب و انتشار بخار آب می‌شود [۱۰، ۱۱]. در بررسی‌های انجام شده دیگر، با پوشش‌دهی سطح چوب با پوشش‌های آلکیدی، باعث ایجاد تغییرات رنگی شده است و باعث افزایش a^* و b^* و کاهش L^* شده است [۱۲، ۱۳]. هنگام عمل پوشش‌دهی، با اعمال سیلر در چوب و پس از جذب آن، کیلر در سطح پوشش داده می‌شود که باعث شکل‌گیری لایه‌ای شیشه‌ای می‌شود، مقاومت را در برابر رطوبت بالا می‌برد [۱۴]. نتایج بدست آمده توسط راجپوت و همکارانش (۲۰۱۴) در مورد پوشش پلی‌یورتان به این نتیجه رسیدند که این

پوشش مقاومت مکانیکی خوبی در برابر تغییرات آب و هوایی دارد و همچنین دارای خاصیت مناسبی در حفاظت سطح چوب است [۱۶]. [۱۵]. در مطالعه‌ای دیگر بر روی پوشش پلی‌یورتان، نتایج حاصل از استفاده پوشش پلی‌یورتان و نانو الیاف سلولز اکسید شده نشان داد که پوشش پلی‌یورتان سازگاری خوبی با سطح چوب دارد و از نظر مکانیکی مقاومت بالایی از خود نشان داده است [۱۷]. در صنعت رنگ‌کاری و پوشش‌دهی چوب یکی از روغن‌های که بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد روغن بزرک است [۱۸]. روغن بزرک یا کتان روغن گیاهی است که توسط دانه‌های گیاه بزرک یا کتان به دست می‌آید [۱۹]. برای جلای چوب و همچنین در مصارف خوراکی، دارویی، درمان سوختگی و سرماخوردگی از روغن بزرک استفاده می‌شود. یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها برای حفاظت چوب در ایران استفاده از روغن بزرک در پوشش‌دهی بوده است که توانسته است تا حدودی باعث بهبود مقاومت به هوازدگی، تغییر در ثبات ابعاد و تغییر رنگ شود. اما به مرور زمان هوازدگی باعث تغییر و تخریب چوب شده است [۲۰]. فرآیند تیمار چوب با استفاده از روغن بزرک باعث تاثیر در بهبود ثبات ابعاد چوب و همچنین افزایش مقاومت چوب به نسبت تغییرات جذب رطوبتی می‌شود [۲۱]. در سطح چوب روغن بزرک به دلیل ایجاد فرآیند خود اکسایشی، لایه محافظی را به‌وجود می‌آورد [۲۲]. یکی از جدیدترین روش‌های پوشش‌دهی استفاده از سیستم پاششی آبکاری گرمی است. مهم‌ترین دلیل و مزیت استفاده از این سیستم نسبت به سیستم‌های سنتی، ایجاد سطح براق، سهولت در کار و بهبود خواص سطحی می‌باشد. پوشش‌های گرمی توانایی تولید طیف‌های مختلف رنگی را دارند و باعث شکل‌گیری ظاهری نزدیک به فلزاتی همچون طلا، مس، نقره و برنز می‌شوند. پوشش سوپرکرم دارای فرمول‌بندی بر پایه آب است که در حفظ محیط زیست و سلامت آن مناسب می‌باشند. طبق مطالعات صورت گرفته در زمینه پوشش‌های کرومی نتایج نشان داد که پوشش‌های کرومی دارای مقاومت بالا در برابر خوردگی و سایش، سختی بالا و ظاهری روشن است [۲۳، ۲۴]. نتایج مطالعات نوروزی و محبی نشان داد که با اعمال پوشش‌های نانو کیتوزان، نانو روی، روغن بزرک و روغن سیلیکون، سطح چوب راش آب‌گریزتر شد [۲۵]. طبق تحقیقات گذشته نشان داد شد، با استفاده از فیلم‌هایی در مقیاس نانو میزان مقاومت چوب در مقابل تغییرات محیطی و هوازدگی افزایش یافته است [۲۶]. در تحقیقات دیگر بر روی چوب گونه صنوبر نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از نانو ذرات رس، کمی از تخریب نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به نمونه‌های بدون پوشش می‌کاهد [۲۷]. مطالعه‌ای دیگر که توسط فوفا و همکارانش (۲۰۱۴) بر روی چوب صنوبر که در دستگاه گرماسنج مخروطی انجام پذیرفت نشان داد، استفاده از نانو ذرات رس واکنش ضعیفی در برابر آتش از خود نشان داده است [۲۸]. نتایج به دست آمده توسط محققان

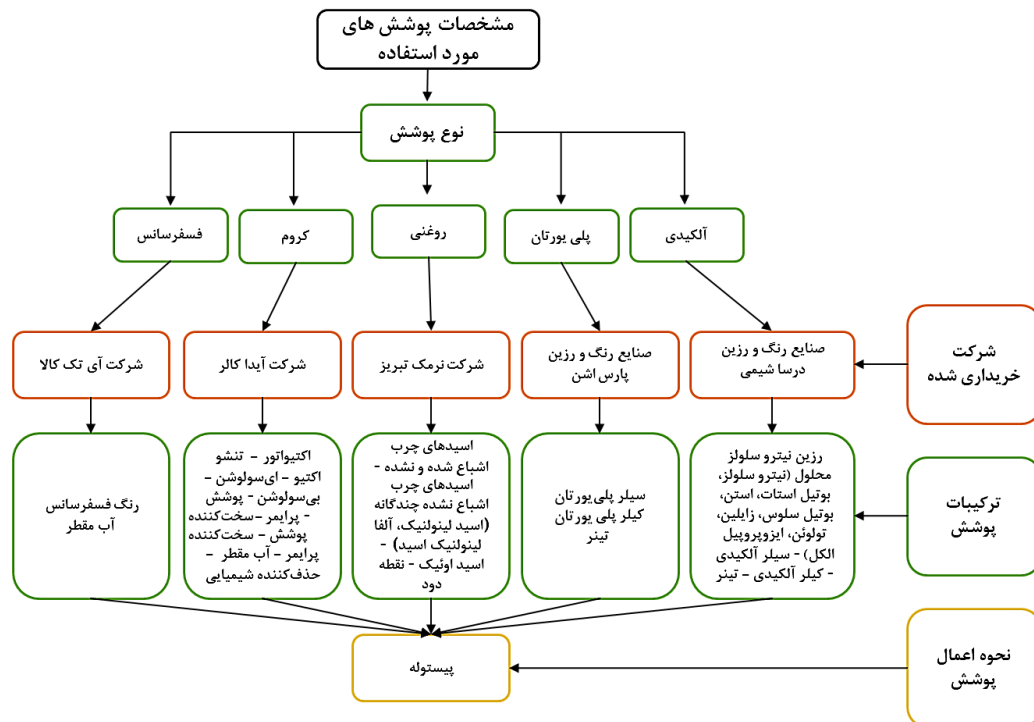
۱۰×۲۰×۶۰ سانتی‌متر تهیه گردید. سپس الوار چوبی ۶۰۰ سانتی‌متری به الوارهایی به طول ۱۰۰ سانتی‌متری تبدیل و به مدت یک سال در انبار برای رسیدن به رطوبت پایین‌تر قرار گرفتند. پس از آن نمونه‌ها به ابعاد نهایی ۱۰×۲×۱۵ سانتی‌متر برش داده شدند و در ادامه به منظور رسیدن نمونه‌ها به شرایط رطوبت تعادل ۱۲ درصد، به مدت ۲ هفته در اتاق کلیما (رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) قرار داده شدند.

۲-۲- آماده‌سازی زیرپوشه (سطح چوب زیر پوشش نهایی)

پس از خارج کردن نمونه‌ها از اتاق کلیما، با استفاده از سنباده در دو مرحله: مرحله اول - سنباده ۲۰۰ به مدت ۳ دقیقه و مرحله دوم - سنباده ۳۰۰ به مدت ۲ دقیقه سنباده زده شد تا برای اعمال پوشش آماده شوند. سپس سطوح نمونه‌ها توسط پیستوله با نسبت ۱۰۰ میلی‌گرم بر متر مربع با استفاده از پوشش‌های مذکور پوشش داده شد. در انتها نمونه‌های پوشش خورده به مدت زمان ۲۰ روز برای خشک شدن و به تعادل رسیدن در محیط اتاق کلیما قرار گرفته شدند.

۲-۳- نوع پوشش‌ها

در این تحقیق از پنج نوع پوشش با مشخصات نشان داده در شکل ۱ استفاده شده است.



شکل ۱: مشخصات پوشش‌های مورد استفاده.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از گونه چوبی نراد (*Abies alba*) استفاده شد. الوارهای چوبی خشک شده از بازار چوب‌فروشان شهر کرج در ابعاد

نیترژن و مطابق استاندارد ASTM E 1131 انجام شد که عمل پیرولیز نمونه‌ها در دامنه دمایی ۱۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت حرارت‌دهی ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه انجام شد. دیگر مشخصات و شرایط آزمون در جدول ۲ مشخص شده است.

۷-۲- آزمون مقاومت به آتش

برای انجام فرآیند آزمون از نمونه‌هایی در ابعاد ۱۵۰×۱۰۰ میلی‌متر که برای هر تیمار سه تکرار استفاده گردید. وزن نمونه‌ها قبل از آزمون اندازه‌گیری شد و پس از آن بر روی دستگاه نصب و به مدت ۱۲۰ ثانیه در معرض آتش قرار گرفتند. فاصله نازل خروجی آتش با فاصله ۵ میلی‌متر از سطح نمونه و با زاویه ۴۵ درجه قرار گرفت که پس از آن داده‌هایی همچون میزان شعله‌وری، میزان گدازش، درصد کاهش جرم و درصد سطح کربنی شده بررسی و یادداشت گردید. فرآیند درصد سطح کربنی شده توسط نرم افزار Image-J اندازه‌گیری شد. این آزمون مطابق با استاندارد BS 476 انجام پذیرفت.

۸-۲- آزمون سیکل حرارتی

آزمون سیکل حرارتی با استفاده از خستگی دمایی، دوام سطوح پوشش خورده را با تغییرات دمایی برای نشان دادن میزان تخریب در برابر دماهای مختلف مشخص شده بررسی می‌کند. این آزمون با استفاده از دستگاه اتافک آزمون چرخه حرارتی انجام پذیرفت. اندازه نمونه‌های چوبی پوشش داده شده در ابعاد ۵×۵×۲ سانتی‌متر بود. که طبق استاندارد ASTM C1104 و ASTM C411 انجام پذیرفت.

۴-۲- مراحل پوشش‌دهی

الف- پوشش آلکیدی: از پوشش آلکیدی سیلر و کیلر استفاده گردید که درصد ماده خشک آن بعد از رقیق شدن با تینر و آماده برای رنگ‌کاری ۱۱ درصد و قبل از رقیق شدن با حلال، ۳۰ درصد بود.
ب- پوشش پلی‌پورتان: از سیلر و کیلر پلی‌پورتان استفاده شد که درصد ماده خشک آن بعد از رقیق شدن به وسیله تینر و آماده برای رنگ‌کاری ۱۱ درصد و قبل از رقیق شدن با حلال، ۴۵ درصد در نظر گرفته شد.
ج- پوشش روغن گیاهی: این پوشش از روغن بزرک بر روی چوب توسط پیستوله اعمال شد.
د- پوشش کرمی (سوپرکرم): در سه مرحله پرایمر، کرم و کیلر توسط پیستوله عمل پوشش‌دهی انجام پذیرفت.
ن- پوشش فسفرسانس: از ترکیب رنگدانه‌های سبز رنگ فسفرسانس همراه با آب مقطر به نسبت ۱ به ۹ که میزان فسفرسانس ۱۰ درصد و آب مقطر ۹۰ درصد استفاده شد. جنس خود پوشش فسفرسانس از رنگدانه‌های فسفری بوده که به نام مواد فسفرسانس معروف است.

۵-۲- جدول تیمارها

تمامی مراحل انجام تحقیق بر اساس جدول ۱ تیمار انجام شده است.

۶-۲- آنالیز وزن سنج حرارتی (TGA)

آزمون TGA به منظور تحلیل فرآیند پیرولیز بر روی انواع نمونه‌های پوشش خورده چوب نراد، انجام پذیرفت. این آزمون در محیط گاز

جدول ۱: تیمارهای مورد استفاده.

تعداد تکرار هر نمونه در تیمارها جدا	نوع پوشش	نوع چوب	کد تیمار
	تیمارهای اول	تیمارهای دوم	
۳	شاهد (بدون پوشش)		۱
۳	پوشش آلکیدی	پوشش آلکیدی + نانورس	۲
۳	پوشش پلی‌پورتان	پوشش پلی‌پورتان + نانورس	۳
۳	پوشش روغنی	پوشش روغنی + نانورس	۴
۳	پوشش کرم	پوشش کرم + نانورس	۵
۳	پوشش فسفرسانس	پوشش فسفرسانس + نانورس	۶

جدول ۲: مشخصات دستگاه TGA و شرایط آزمون

نام دستگاه	مشخصات pan	وزن نمونه (میلی‌گرم)	خلوص گاز N ₂	سرعت گرمایش (درجه سانتی‌گراد در دقیقه)	سرعت جریان (میلی‌لیتر در دقیقه)
TGA STGA	جنس Al ₂ O ₃	۰,۰۳۴	۹۹,۹۹۹۹	۱۰	۱۰۰

۲-۱۰- تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری از طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SPSS صورت پذیرفت. که برای هر تیمار از سه تکرار استفاده شد. از آزمون تجزیه و تحلیل واریانس برای بررسی معنی‌دار بودن میانگین‌ها و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه دانکن مورد استفاده قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

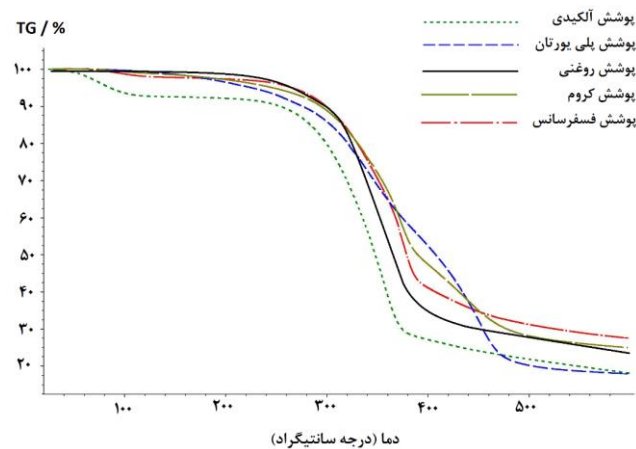
۳-۱- آزمون وزن سنج حرارتی (TGA)

در آزمون وزن‌سنج حرارتی TGA مطابق با شکل ۲ در نمونه‌های فاقد نانو ذرات رس نتایج نشان داد که میزان کاهش جرم در نمونه پوشش‌خورده با استفاده از پوشش آلکیدی به طور قابل توجهی بیشتر از سایر نمونه‌های پوشش‌خورده بود. اما پس از افزودن نانوذرات رس مطابق با شکل ۳، نتایج بهتری مشاهده شد، که باعث مقاومت بیشتر پوشش‌ها با استفاده از نانو رس شد.

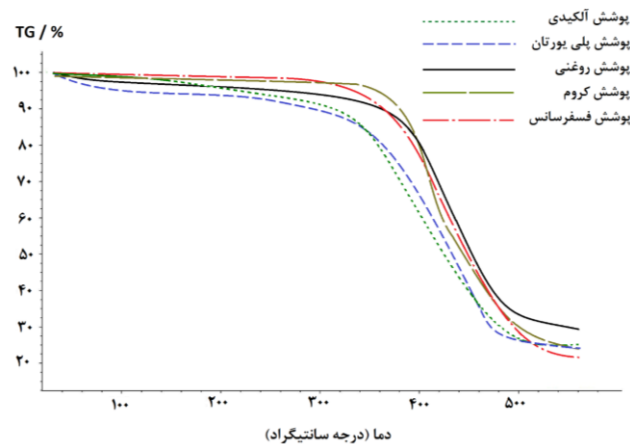
در این آزمون که به میزان ۱۰۰ ساعت به طول انجامید، تعداد سیکل آن ۵۰ و میزان دمای محیط تست حداکثر مثبت ۳۰ درجه و حداقل منفی ۳۰ درجه انجام گرفته شد. که پس از گذراندن این چرخه‌ها، میزان تخریب سطح دوباره سنجیده می‌شود. این دستگاه در واقع شبیه‌ساز طبیعی فصول مختلف سال در برابر گرما و سرما است.

۲-۹- آزمون زاویه تماس

جهت بررسی میزان مقاومت به رطوبت و جذب آب پوشش‌های سطحی پس از انجام آزمون سیکل حرارتی، آزمون زاویه تماس قطره آب بر روی سطح آنها طبق استاندارد ASTM D 5946 انجام شد و میزان زاویه تماس پس از ۵ ثانیه رها شدن قطره بر روی سطح نمونه مورد محاسبه قرار گرفت. این فرآیند قبل و بعد از آزمون چرخه حرارتی صورت پذیرفت.



شکل ۲: نتایج آزمون TGA برای نمونه‌های پوشش‌دهی شده بدون نانو رس.



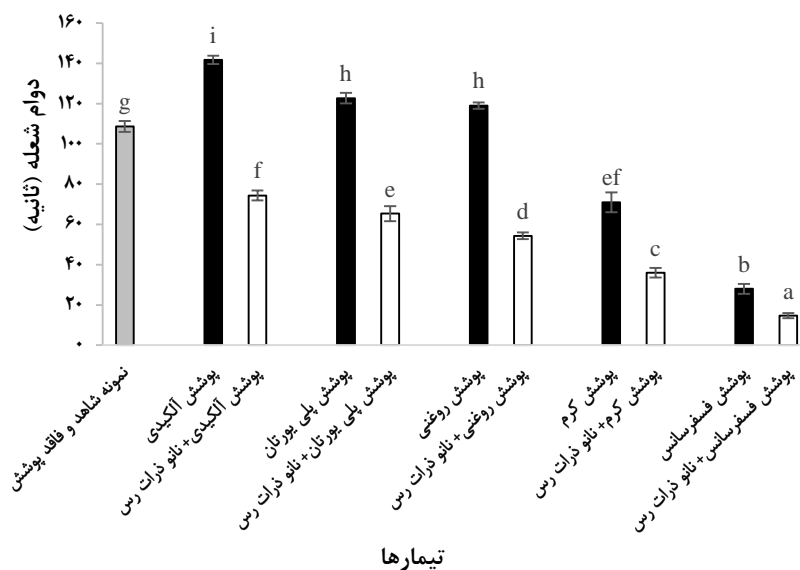
شکل ۳: نتایج آزمون TGA برای نمونه‌های پوشش‌دهی شده دارای نانو رس.

پوشش‌ها، پوشش فسفرسانس مقاومت بیشتری نسبت به سایر پوشش‌ها داشته و باعث کاهش در دوام شعله شده است که میزان دوام شعله در این نمونه به مدت ۲۸ ثانیه بود. پس از آن به ترتیب افزایش دوام شعله پوشش کروم به مدت ۷۱ ثانیه، پوشش روغنی ۱۱۹ ثانیه، پوشش پلی‌یورتان ۱۲۲ ثانیه و کم دوام ترین پوشش هم مربوط به پوشش آلکیدی به مدت ۱۴۱ ثانیه می‌باشد. که دو پوشش فسفرسانس و کروم نسبت به نمونه شاهد عملکرد بهتری داشته و سایر پوشش‌ها عملکرد ضعیف تری از خود نشان دادند. نتایج حاصل از نمونه‌های درون گروهی پوشش‌های همراه با نانو ذرات رس نشان داد، مقاومت پوشش فسفرسانس حاوی نانو ذرات رس بهتر از سایر پوشش‌ها شده است که مدت زمان دوام شعله در این نمونه ۱۴،۶۶ ثانیه و بعد از آن به ترتیب افزایش دوام شعله پوشش کرم ۳۶ ثانیه، پوشش روغنی ۵۴ ثانیه، پس از آن پوشش پلی‌یورتان ۶۵ ثانیه و در آخر پوشش آلکیدی ۷۴ ثانیه را نشان داد که از مقاومت کافی برخوردار نبود و به نسبت نمونه شاهد فاقد پوشش، همه نمونه‌ها از مطلوبیت بیشتری برخوردار بودند. در مقایسه دو گروه با یک دیگر مشخص شد که پوشش فسفرسانس در دو حالت خود از مقاومت بیشتری نسبت به سایر پوشش‌ها برخوردار بود اما پوشش کرم، روغنی، پلی‌یورتان و آلکیدی به ترتیب ذکر شده از مقاومت کافی برخوردار نبودند (شکل ۴). سپس در قسمت میزان گدازش یا فروختگی نمونه‌های پوشش‌خورده، نتایج درون گروهی نمونه‌های فاقد نانو ذرات رس حاکی از آن بود که در نمونه پوشش‌خورده با پوشش فسفرسانس و همچنین نمونه پوشش‌خورده کرم، میزان گدازش به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرده و به صفر رسیده است و از مقاومت بالایی برخوردار بودند. اما پوشش‌های روغنی، پلی‌یورتان و آلکیدی به ترتیب ۳۵، ۵۱ و ۶۸ ثانیه جزء نا مطلوب‌ترین پوشش‌ها قرار گرفتند که هر سه پوشش عملکرد ضعیف‌تری نسبت به نمونه فاقد پوشش از خود نشان دادند. نتایج درون گروهی نمونه‌های دارای نانو ذرات رس نشان داد، پوشش فسفرسانس و کرم حاوی نانو ذرات رس، نسبت به سایر پوشش‌ها از مقاومت بیشتری برخوردار بوده و مدت زمان گدازش را به صفر رساندند. اما در سه پوشش دیگر روغنی، پلی‌یورتان و آلکیدی با روند کاهش مقاومت و افزایش میزان گدازش به ترتیب یاد شده همراه بود که پوشش آلکیدی با مدت زمان ۲۸ ثانیه ضعیف‌تر از سایر پوشش‌ها مشخص شد که در اینجا همه نمونه‌ها نسبت به نمونه فاقد پوشش از مطلوبیت بهتری برخوردار بودند. در مقایسه بین دو گروه، پوشش‌های فسفرسانس و کرم فاقد نانو ذرات و حاوی نانو ذرات جزء مقاوم‌ترین پوشش‌ها و پوشش آلکیدی و سایر پوشش‌های فاقد نانو ذرات رس و حاوی نانو ذرات رس جزء نا مطلوب‌ترین پوشش‌ها نمایان شدند. (شکل ۵).

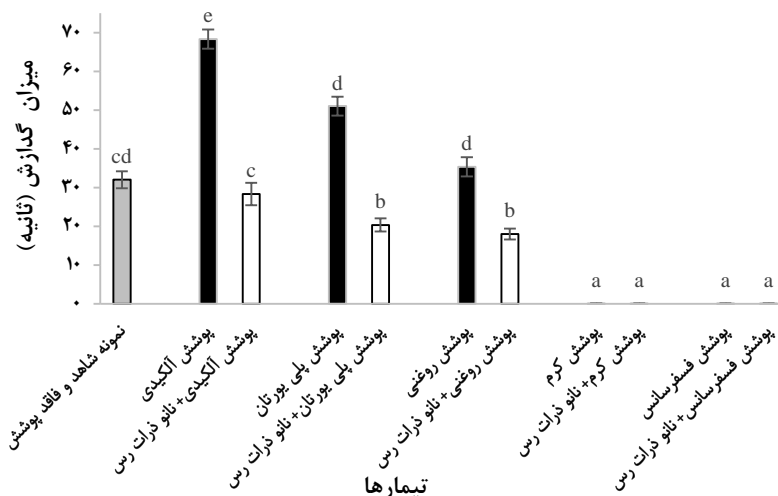
شروع فرآیند کاهش جرم در نمونه پوشش‌خورده آلکیدی در دمای حدود ۵۰ تا ۷۵ درجه بود اما در چهار نمونه دیگر پوشش‌خورده این فرآیند کاهش جرم در دامنه دمایی بالای ۱۵۰ درجه شروع شد. اما این پوشش‌ها با نانورس نشان داد که شروع فرآیند تخریب حرارتی و کاهش جرم در همه نمونه‌ها به صورت تدریجی بود و پس از رسیدن به دمای بالای ۳۰۰ درجه، شاهد تسریع در افزایش کاهش جرم در نمونه‌ها را در پی داشت که طبق تحقیقات گذشته فوفا و همکارانش در سال ۲۰۱۴ نتایج آن‌ها بر روی چوب گونه صنوبر نشان داد استفاده از نانو ذرات رس مقاومت به نسبت ضعیفی در برابر آتش از خود نشان داده است. پایدارترین پوشش بدون نانورس از نظر مقاومت بیشتر در برابر کاهش جرم، پوشش روغنی بود که تا دمای حدود ۲۸۰ درجه به صورت تدریجی و خیلی کم مورد تخریب حرارتی قرار گرفت و پس از آن به سرعت روند تخریب حرارتی آن در دمای حدود ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد شروع شده و پس از دمای ۴۰۰ درجه به صورت تدریجی کاهش پیدا کرده است. ولی در پوشش‌های همراه با نانورس، پایدارترین پوشش هم با تفاوت بسیار اندکی با سایر پوشش‌ها مربوط به پوشش روغنی است. در پوشش‌های دیگر همان‌طور که گفته شد در پوشش آلکیدی فرآیند تخریب سریع‌تر اتفاق افتاد اما در نمونه‌های پوشش‌خورده پلی‌یورتان، کروم و فسفرسانس، این فرآیند نزدیک به هم بوده و به صورت تدریجی در دمای بالای ۱۲۰ درجه شروع به تغییرات جرمی کردند و پس از آن در دامنه دمایی ۲۳۰ تا ۲۷۰ درجه این سه نمونه پوشش‌خورده به صورت ناگهانی مورد تخریب حرارتی قرار گرفتند و تا دمای حدود ۴۰۰ درجه پیش رفته و پس از آن دوباره با کاهش تدریجی جرم روبرو شدند. ولی فقط نمونه پلی‌یورتان تا دمای ۴۸۰ درجه به سرعت کاهش جرم پیدا کرده و نزدیک به دمای ۵۰۰ درجه تدریجی شد. در بین پوشش‌های همراه با نانو رس، همه نمونه‌ها تا حدود دمای ۴۸۰ درجه دچار کاهش جرم شدید شدند اما پس از آن تغییرات حاصل به صورت تدریجی شکل گرفت. در بین پوشش‌های با نانو رس، تغییرات کاهش جرم دو نمونه پوشش آلکیدی و پلی‌یورتان تقریباً شبیه به هم بوده و سه نمونه پوشش روغنی، کرم و فسفرسانس تا حدودی شبیه به هم مشاهده شد. فرآیند کاهش جرم و تخریب به دلیل خشک شدن و یا آزاد شدن گازها و مواد فرار است و پس از آن تخریب سلولز و همی‌سلولز صورت می‌گیرد و در دماهای بالاتر تخریب لیگنین به دلیل مقاومت بهتر و بیشتر آن به دلیل دارا بودن بنزن- پروپیل دیرتر تخریب می‌شود [۳۱].

۳-۲- تأثیر انواع نمونه‌های پوشش‌خورده چوب نراد بر مقاومت به آتش

نتایج درون گروهی تیمارهای بدون نانو ذرات رس نشان داد که در بین



شکل ۴: میزان دوام شعله و گروه‌بندی دانکن در بین نمونه‌های مختلف.



شکل ۵: میزان گدازش و گروه‌بندی دانکن در بین نمونه‌های مختلف.

آلکیدی که بیشترین کاهش وزن را دارا بود به میزان ۶,۵ درصد دچار کاهش جرم شدند. در نمونه‌های گروه دوم که دارای نانو ذرات رس بودند، نتایج نشان داد که استفاده از نانو ذرات رس در بهبود فرآیند کاهش جرم نمونه‌ها در مقابل اشتعال سهیم بوده و باعث کمتر شدن کاهش جرم شده است. به گونه‌ای که به همان شکل گروه اول مقاوم‌ترین پوشش، پوشش کروم به میزان ۱,۳ بعد از آن پوشش فسفرسانس به میزان ۲,۱ و پس از آن پوشش روغنی، پلی‌یورتان و آلکیدی به ترتیب به میزان ۴,۵، ۲,۶ و ۴,۸ دچار کاهش جرم شدند. همچنین، به غیر از دو نمونه پوشش کرم و فسفرسانس، نمونه پوشش

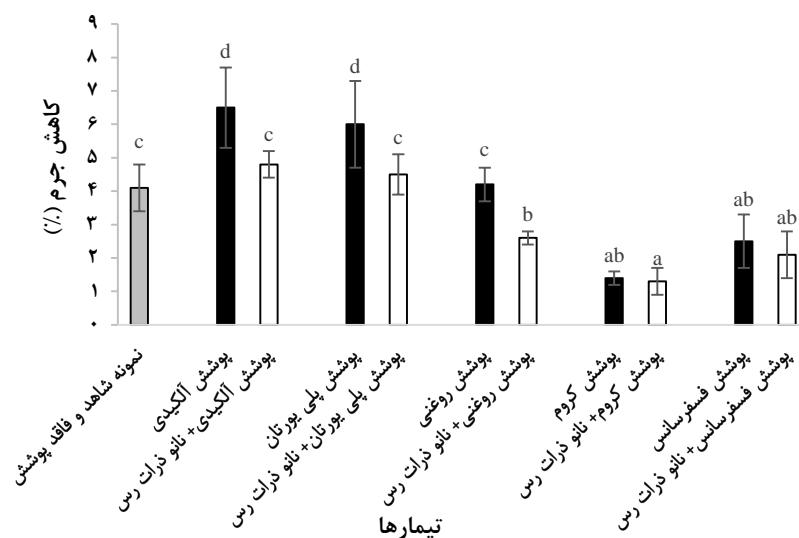
نتایج تغییرات جرمی نشان داد که مقدار کاهش جرم در نمونه‌های درون گروهی فاقد نانو ذرات رس، پوشش کرم نسبت به سایر پوشش‌ها به میزان کمتری در مقابل اشتعال دچار کاهش جرم شده است که مقدار آن در حدود ۱,۴ درصد می‌باشد و پس از آن پوشش فسفرسانس بود که با روند کاهش جرم کمتری به میزان ۲,۵ درصد روبرو شد که این دو پوشش در مقابل نمونه شاهد فاقد پوشش، عملکرد بهتری از خود نشان دادند. اما سه پوشش دیگر دچار کاهش جرم بیشتری شده و از مقاومت کافی برخوردار نبودند به گونه‌ای که پوشش روغنی به میزان ۴,۲ درصد، پوشش پلی‌یورتان به میزان ۶ درصد و پوشش

فسفرسانس به میزان ۴۸ درصد و در آخر پوشش آلکیدی به میزان ۵۱ درصد در مقابل اشتعال کربنی شدند. در مقایسه بین دو گروه مشخص شد که استفاده از نانو ذرات رس باعث مقاومت بیشتر در برابر اشتعال و کاهش میزان سطح کربونیزه می‌شود (شکل ۷). بر طبق نتایج آماری به دست آمده نشان داده شد که میانگین داده‌ها طبق آزمون تجزیه و تحلیل واریانس در همه مراحل با هم معنی‌دار بودند که همچنین مطابق شکل‌های مذکور در گروه‌های مختلف طبقه‌بندی شدند.

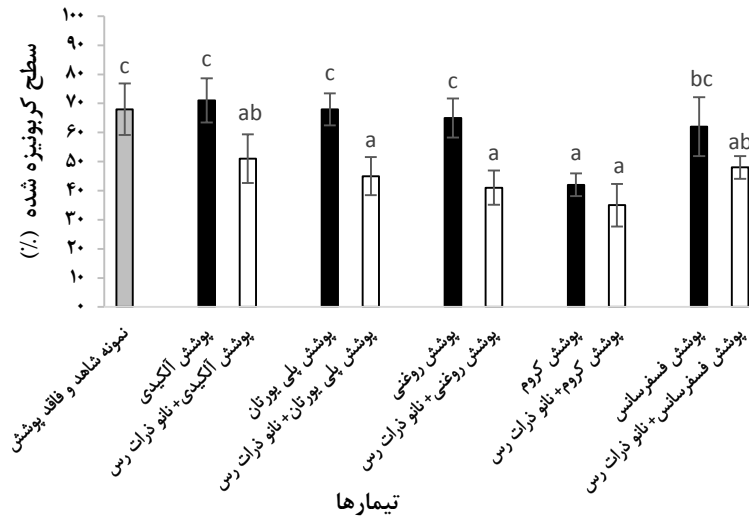
۳-۳-۲- آزمون چرخه حرارتی و اثر زاویه تماس قطره

نتایج تیمار چرخه حرارتی بر میزان زاویه تماس نمونه‌های پوشش داده شده و نشده نشان داد که میزان زاویه تماس کاهش یافته است. بدین صورت که قبل از آزمون چرخه حرارتی، در نمونه‌های پوشش خورده فاقد نانو ذرات رس، پوشش کرم نسبت به سایر پوشش‌ها زاویه تماس بیشتری به مقدار ۱۳۴٫۳۳ درجه داشته است که نشان‌دهنده مقاومت بیشتر این پوشش نسبت به سایر پوشش‌ها است. پس از این پوشش، پوشش روغنی با زاویه تماس ۱۰۲ درجه مطلوب‌تر از سایر پوشش‌ها بوده است. پوشش پلی‌یورتان و آلکیدی با زاویه تماس ۹۳ و ۹۰ درجه نیز در رده متوسط مقاومت قرار گرفتند و آخرین پوشش نیز که پوشش فسفرسانس است جزء کم‌دوام‌ترین پوشش با زاویه تماس ۶۴٫۶۶ درجه قرار گرفت. در همه پوشش‌ها زاویه تماس نسبت به نمونه شاهد بیشتر بوده که مطلوب‌ترین پوشش که پوشش کرم است در حدود بیش از سه برابر مقاومت آن نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است.

روغنی نیز نسبت به نمونه شاهد از مطلوبیت بیشتری در برابر کاهش جرم برخوردار بودند. نتایج مقایسه بین دو گروه نیز نشان داد که پوشش‌های کرم بدون نانو ذرات رس و حاوی نانو ذرات رس و بعد از آن پوشش‌های فسفرسانس بدون نانو ذرات و حاوی نانو ذرات از سایر پوشش‌ها مقاوم‌تر بوده و نانو ذرات رس باعث عملکرد بهتر آن‌ها شده است و پوشش‌های آلکیدی بدون نانو ذرات و حاوی نانو ذرات در رده ضعیف‌ترین مقاومت قرار گرفتند (شکل ۶). بعد از آن با استفاده از نرم‌افزار Image-J میزان سطح کربنی شده نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از تغییرات سطح کربنی شده در بین نمونه‌های گروه اول که فاقد نانو ذرات رس بودند نشان داد که در بین پوشش‌های مختلف، پوشش کرم به نسبت سایر پوشش‌ها کمتر دچار کربنی شده در اثر اشتعال شده است که میزان آن در حدود ۴۲ درصد بود و پس از این پوشش، پوشش فسفرسانس در رده دوم بعد از پوشش کرم به میزان ۶۲ درصد قرار گرفت و به نسبت نمونه شاهد از میزان سطح کمتر و بهتری در عمل کربنی شده سطح قرار گرفتند. اما پوشش‌های دیگر جزء پوشش‌های با سطح بیشتر کربونیزه قرار گرفته و میزان آن‌ها در پوشش روغنی ۶۵ درصد، پوشش پلی‌یورتان ۶۸ درصد و پوشش آلکیدی به میزان ۷۱ درصد قرار گرفتند و به نسبت نمونه شاهد فقط پوشش روغنی با فاصله اندکی مطلوب‌تر بود. در گروه دوم نمونه‌های حاوی نانو ذرات رس نتایج نشان داد، پوشش کروم حاوی نانو ذرات با میزان کمتر سطح کربونیزه به مقدار ۳۵ درصد و پس از آن پوشش روغنی بود که به مقدار ۴۱ درصد کمتر دچار سطح کربونیزه شد و پوشش پلی‌یورتان در رده سوم به میزان ۴۵ درصد و بعد از آن پوشش



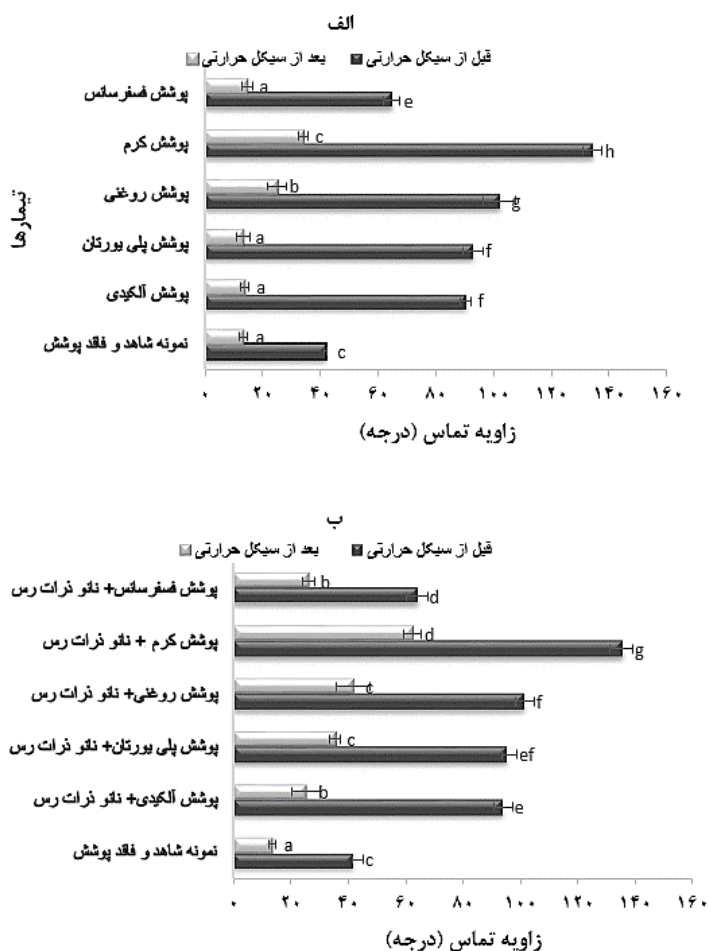
شکل ۶: درصد کاهش جرم و گروه‌بندی دانکن در بین نمونه‌های مختلف.



شکل ۷: درصد سطح کربونیزه و گروه‌بندی دانکن در بین نمونه‌های مختلف.

نمونه شاهد مطلوب‌تر و زاویه تماس بیشتری داشته است. پس از انجام آزمون چرخه حرارتی نیز مانند نمونه‌های فاقد نانو ذرات، نتایج حاکی از افت شدید در زاویه تماس نمونه‌های مختلف پوشش خورده و نخورده بود به گونه‌ای که پوشش کرم که از سایر پوشش‌ها مقاوم‌تر بود زاویه تماس آن به کمتر از نصف در حدود ۶۲,۳۳ درجه رسیده و پس از آن پوشش روغنی از ۱۰۱,۳۳ به ۴۱,۶۶ رسیده و پس از آن پوشش‌های پلی‌یورتان، فسفرسانس و آلکیدی با زاویه تماس به ترتیب ۲۶,۳۵,۳۳ و ۲۵,۳۳ درجه دچار افت در زاویه تماس و تخریب قرار گرفتند. نسبت به نمونه شاهد که در حدود ۱۳,۳۳ قرار داشت، نمونه آلکیدی جزء نامطلوب‌ترین و نمونه پوشش خورده کروم جزء مطلوب‌ترین پوشش قرار گرفت. در مقایسه دو حالت پوشش فاقد نانو ذرات رس و حاوی نانو ذرات رس نتایج نشان داد که تاثیر نانو ذرات رس قبل از آزمون چرخه حرارتی بسیار ناچیز بوده است و به مقدار قابل توجهی در افزایش مقاومت نقش نداشته است. اما اثر نانو ذرات رس پس از آزمون چرخه حرارتی نشان داد که در حدود دو برابر از کاهش زاویه تماس نسبت به نمونه‌های فاقد نانو ذرات رس، جلوگیری کرده است. در تحقیق دیگر با استفاده از تیمار پلازما بر روی پوشش پایه حلال و پایه آب پلی‌یورتان، نتایج نشان داد که میزان زاویه تماس کاهش یافته و میزان ترشوندگی سطح چوب افزایش پیدا کرده است [۳۲]. نتایج آماری آزمون تجزیه و تحلیل واریانس نیز در شکل ۸ که به دو قسمت الف و ب تقسیم شده است، حاکی از معنی‌دار بودن نمونه‌ها بوده که طبق گروه‌بندی دانکن شکل الف به ۸ گروه و شکل ب به ۷ گروه طبقه‌بندی شدند.

اما پس از آزمون چرخه حرارتی نتایج نشان داد که، به مقدار قابل توجهی زاویه تماس در همه نمونه‌ها کاهش پیدا کرده به گونه‌ای که پوشش کروم که از سایر پوشش‌ها مقاوم‌تر بود با افت شدیدی به گونه‌ای که از ۱۳۴,۳۳ درجه به ۳۴ درجه کاهش پیدا کرده است. پس از آن پوشش روغنی به نسبت سایر پوشش‌ها مقاومت بهتری داشته که زاویه تماس آن از ۱۰۲ درجه به ۲۵ درجه کاهش پیدا کرده است. سایر پوشش‌ها نیز با روند افت شدید زاویه تماس به ۱۴,۶۶، ۱۳,۶۶ و ۱۳,۳۳ درجه در نمونه‌های به ترتیب فسفرسانس، آلکیدی و پلی‌یورتان در رده کم دوام‌ترین پوشش‌ها قرار گرفتند که نسبت به نمونه شاهد، پوشش پلی‌یورتان در یک سطح قرار گرفته و مقاوم‌ترین پوشش که کروم بود در حدود بیش از دو برابر نمونه شاهد از خود مقاومت نشان داده است. در مرحله بعد در نمونه‌های دارای نانو ذرات رس در قسمت قبل از آزمون چرخه حرارتی، نتایج حاصل نشان داد، پوشش کرم حاوی نانو ذرات رس با زاویه تماس بیشتری به مقدار ۱۳۵,۶۶ درجه از مقاومت بیشتری نسبت به سایر پوشش‌ها برخوردار است. و پس از آن پوشش روغنی حاوی نانو ذرات رس بود که نسبت به سایر پوشش‌ها با زاویه تماس ۱۰۱,۳۳ درجه از مطلوبیت بیشتری برخوردار بود. دو پوشش پلی‌یورتان و آلکیدی نیز با زاویه تماس ۹۵,۳۳ و ۹۳,۶۶ درجه در رده متوسط مقاومت قرار گرفته و پوشش فسفرسانس نیز جزء نامطلوب‌ترین پوشش با زاویه تماس ۶۴ درجه قرار گرفته است. در مقایسه با نمونه شاهد نشان داده شد همه پوشش‌ها دارای زاویه تماس بیشتری نسبت به نمونه شاهد بودند اما پوشش کرم نیز مطابق پوشش‌های فاقد نانو ذرات رس، در حدود بیش از سه برابر بیشتر از



شکل ۸: نتایج زاویه تماس با استفاده از آزمون چرخه حرارتی همراه با گروه‌بندی دانکن.

۴- نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج نشان داد که اکثر پوشش‌های اعمال شده قابلیت کاهش اشتعال‌پذیری چوب نراد را دارند و استفاده از نانوذرات رس باعث افزایش مقاومت پوشش‌ها می‌شود. در بخش آزمون مقاومت به آتش، پوشش فسفرسانس و کرم فاقد نانو ذرات و حاوی نانو ذرات با دوام شعله، میزان گدازش، کاهش جرم و میزان سطح کربونیزه کمتر نسبت به سایر پوشش‌ها جزء مقاوم‌ترین پوشش‌ها قرار گرفتند و توانستند در مقابل احتراق چوب نراد از آن محافظت کنند. اما استفاده از سه پوشش روغنی، پلی‌یورتان و آلکیدی توصیه نشده زیرا از روند اشتعال به مقدار ناچیز جلوگیری کرده و مناسب نیستند. در نتایج بدست آمده آنالیز وزن‌سنج حرارتی نشان داد که تخریب حرارتی در نمونه با پوشش فسفرسانس و روغنی نسبت به سایر پوشش‌ها از مقاومت بهتری برخوردار بودند که با اضافه کردن نانو ذرات رس، بر مقاومت آن‌ها افزوده شده است. و همچنین کم‌دوام‌ترین پوشش هم پوشش آلکیدی بود که سریع‌تر مورد تخریب

قرار گرفت زیرا که روند کاهش جرم آن بیشتر از سایر پوشش‌ها بوده است و مقاومت کافی در برابر حرارت نداشته است و در کل استفاده از نانو ذرات رس باعث افزایش مقاومت در برابر کاهش جرم نمونه‌ها شده است. نتایج حاصل از آزمون چرخه حرارتی هم نشان داد که نمونه‌های مختلف در اثر قرارگیری در دماهای مختلف چه تأثیرات منفی بر دوام پوشش‌ها در برابر رطوبت از خود نشان می‌دهند می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با دوام‌ترین پوشش، پوشش کرم فاقد نانو ذرات و حاوی نانو ذرات حتی پس از تست‌های سیکل حرارتی بوده است. اما کم‌دوام‌ترین پوشش پس از نمونه شاهد، پوشش فسفرسانس فاقد نانو ذرات و حاوی نانو ذرات بود که مورد تخریب قرار گرفته و از کمترین مطلوبیت برخوردار بود. در مجموع می‌توان گفت که پوشش کروم برای اعمال پوشش در مقابل حریق از مقاومت بالایی برخوردار بوده و مناسب است و استفاده از نانو ذرات رس تأثیر به‌سزایی بر روند افزایش مقاومت در برابر حریق ایفا می‌کند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده در خصوص اشباع چوب با رزین‌های

گروه علوم و صنایع چوب دانشگاه تهران جهت همکاری در انجام این پژوهش تشکر می‌نماید. همچنین از پیگیری هیئت تحریریه و سردبیر محترم نشریه علمی علوم و فناوری رنگ جهت پیگیری امور مربوط به داوری مقالات تقدیر می‌نماید.

چوب مطالعاتی صورت پذیرد تا مقاومت به هوازگی آنها افزایش و شستشوی سطح چوب کاهش یابد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از حمایت و همکاری آزمایشگاه‌ها و کارگاه‌های

۵- مراجع

۱. د. پارسا پزوه، م. فائزی پور، ح. تقی‌یاری، حفاظت صنعتی چوب، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، (۱۳۹۲)، ص ۶۵۷.
2. A. N. Papadopoulos, Chemical modification of solid wood and wood raw material for composites production with linear chain carboxylic acid anhydrides. a brief review. *Bioresour.* 1(2010), 1-8.
3. S. Jinshu, L. Jianzhang, Zh. Wenrui, Zh. Derong, Improvement of wood properties by urea-formaldehyde resin and nano-SiO₂, *Front. For. China.* 1(2007), 104-109.
4. G. I. Mantanis, A. N. Papadopoulos, Reducing the thickness swelling of wood based panels by applying a nanotechnology compound. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2(2010), 237-239.
5. S. N. Kartal, F. Green, C.A. Clausen, Do the unique properties of nanometals affect leachability or efficacy against fungi and termites, *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 4(2009), 490-495.
۶. د. افهامی سیسی، م. غازان، ر. اولادی، ع. کریمی مزرعه شاهی، قابلیت نفوذ نانو ولستونیت در چوب صنوبر و اثر آن بر مقاومت زیستی و ثبات ابعاد چوب. *مجله صنایع چوب و کاغذ ایران.* ۲(۱۳۹۶)، ۲۸۲-۲۶۷.
7. A. Tarmian, A. Mastouri, Water-repellent efficiency of thermally modified wood as affected by its permeability. *J. For. Res.* 3(2018), 859-867.
8. Y. Bautista, J. Gonzalez, J. Gilabert, M. J. Ibanez, V. Sanz, Correlation between the wear resistance, and the scratch resistance, for nanocomposite coatings. *Prog. Org. Coat.* 70(2011), 178-185.
9. R. R. Rodríguez, M. Estevez, S. Vargas, M. A. Mondragón, Hybrid ceramic-polymer material for wood coating with high wearing resistance mater. *Mater. Res. Innovations.* 7, 2(2003) 80-84.
۱۰. ه. غلامیان، ا. طارمیان، ک. دوست حسینی، م. آزاد فلاح، بررسی اثرگذاری رنگ‌های شفاف و نانوذرات زایکوفیل و زایکوسیل بر زاویه تماس و جذب آب در چوب صنوبر. *مجله صنایع چوب و کاغذ ایران.* ۱(۱۳۹۰)، ۲۶-۱۷.
۱۱. آ. طلایی، م. م. رضوانی، ح. دوست محمدی، بررسی مقاومت چسبندگی پوشش‌های شفاف آلکیدی و نیتروسولوزی در فرآیندهای مختلف اصلاح گرمایی چوب صنوبر. *نشریه علمی علوم و فناوری رنگ.* ۱۲(۱۳۹۷)، ۱۸۰-۱۷۱.
12. K. K. Pandey, Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood. *Polym. Degrad. Stab.* 90(2005), 9-20.
۱۳. ه. غلامیان، ا. طارمیان، ک. پورطهماسی، بررسی میکروسکوپی اثرات اصلاح سطح چوب با فرایند سلژل بر کیفیت پوشش‌دهی آن با پوشش‌های آلکیدی و پلی‌اورتان. *مجله صنایع چوب و کاغذ ایران.* ۸(۱۳۹۶)، ۵۲۰-۵۰۹.
14. H. Gholamiyan, Improvement of water and weathering resistance of wood using nanozycosil, nanozycofil and clear coatings, MSc. Thesis, Faculty of Natural Resources. University of Tehran, Iran, 2010.
15. S. D. Rajput, P. P. Mahulikar, V. V. Gite, Biobased dimer fatty acid containing two pack polyurethane for wood finished coatings. *Prog. Org. Coat.* 77(2014), 38-46.
۱۶. م. غفرانی، س. خجسته خسرو، اثر کیفیت پرداخت سطح چوب بر مقاومت چسبندگی در شفاف پوشه‌ها. *نشریه علمی علوم و فناوری رنگ.* ۴(۱۳۹۲)، ۳۳۹-۳۴۵.
17. D. Cheng, Y. Wen, X. An, X. Zhu, Y. Ni, TEMPO-oxidized cellulose nanofibers (TOCNs) as a green reinforcement for waterborne polyurethane coating (WPU) on wood. *Carbohydr. Polym.* 151(2016), 326-334.
18. Y. Babai, Investigation of the Effect of antifungal compounds of syriac juice on the natural existence of beech Wood. Master Thesis. University of Tehran, 2016.
19. A. Juita, B. Z. Dlugogorski, E. M. Kennedy, J. C. Mackie, Low temperature oxidation of linseed oil. a review. *Fire Science Reviews.* 3(2012), 1-36.
۲۰. م. محمدی آچالوبی، ح. احمدی، ک. پورطهماسی، مطالعه تیمار روغن بزرک در چوب کبوده (*Populus alba L*) به‌عنوان تیمار سنتی آثار تاریخی چوبی در برابر هوازگی. *مجله صنایع چوب و کاغذ ایران.* ۵(۱۳۹۳)، ۹۳-۱۰۶.
21. B. Bazyar, D. Parsapajouh, H. Khademi-Eslam, A. H. Hemmasi, Physical characteristics of poplar wood treated with hot linseed oil. *J. Agric. Sci.* 13(2008), 197-206.
22. M. Lazzari, O. Chiantore, Drying and oxidative degradation of linseed oil. *Polym. Degrad. Stab.* 65(1991), 303-313.
23. M. Bayramoglu, B. Onat, N. Geren, Statistical optimization of process parameters to obtain maximum thickness and brightness in chromium plating. *J. Mater. Process. Technol.* 203(2008), 277-286.
24. K. R. Newby, Functional chromium plating. *Met. Finish.* 105(2007), 182-191.
۲۵. ا. نوروزی، ب. محبی، تاثیر پوشش دهنده‌های گوناگون بر برخی از ویژگی‌های سطحی چوب راش. *نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب.* ۶۹(۱۳۹۵)، ۱۸۴-۱۷۳.
26. M. Tshabalala, L.p Sung, Wood surface modification by in-situ sol-gel deposition of hybrid inorganic-organic thin films. *J. Coat. Technol. Res.* 4(2007), 483-490.
27. S. M. Fufa, B. P. Jelle, P. J. Hovde, Effects of TiO₂ and clay nanoparticles loading on weathering performance of coated wood. *Prog. Org. Coat.* 76(2013), 1425-1429.
28. S. M. Fufa, A. Steen Hansen, B. P. Jelle, P. J. Hovde, Reaction to fire and water vapour resistance performance of treated wood specimens containing TiO₂ and clay nanoparticles. *Fire Mater.* 38(2014), 717-724.
۲۹. د. هرنیدی، ح. احمدی، م. محمدی آچالوبی، بررسی تغییرات رنگی و

۱. ساختاری چوب اصلاح شده با نانوذرات دی اکسید تیتانیم و اکسید روی به عنوان محافظ پرتو UV. نشریه علمی علوم و فناوری رنگ، ۹(۱۳۹۴)، ۲۰۷-۲۱.
۳۰. تقی زاده، ن. چاخارلو تاج بخش، بررسی اثر سیکل دمایی قبل از بارگذاری سیکلی بر روی عمر خستگی صفحات دارای تداخل و تخمین عددی عمر خستگی. نشریه مهندسی مکانیک / امیرکبیر، ۵۱(۱۳۹۸)، ۵۱-۱۰.
۳۲. ه. غلامیان، بهبود چسبندگی پوشش های رنگی به چوب با استفاده از آمایش سطحی پلاسما. نشریه علمی علوم و فناوری رنگ، ۱۴(۱۳۹۹)، ۴۷-۴۱.
31. D. Xing, and J. Li, Effects of heat treatment on thermal decomposition and combustion performance of Larix spp. Wood, *Bioresour.* 9(2014), 4274-4287.