

Effects of fire-retardant additives for acrylic coating on flame-retardancy of painted poplar wood

Zahra Elahi Fard¹, Davood Rasouli^{*2}, Taghi Tabarsa³,
Mohammad Reza Mastery Farahani⁴

1. M.Sc. Graduate in Wood Preservation and Modification, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: zahra.sa5988@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: rasouli@gau.ac.ir
3. Professor, Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: tabarsa@gau.ac.ir
4. Associate Prof., Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: fa_ma@yahoo.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 07.06.2023
Revised: 07.29.2023
Accepted: 07.30.2023

Keywords:
Acrylic coating,
Fire resistance,
Flame retardant,
Painted poplar wood,
Tensile strength

ABSTRACT

Background and Objectives: Wood, being a renewable and environmentally friendly material, boasts distinctive mechanical, physical, and aesthetic properties that have contributed to its widespread utilization in the construction, furniture, and decorative industries. Nonetheless, wood is vulnerable to degradation caused by a variety of living and non-living factors. Substantial efforts have been invested in improving the durability of wood, with measures such as applying protective paints to safeguard against weathering and moisture. Nevertheless, it is important to note that both wood and polymer-based paints possess flammability characteristics. To mitigate this concern, flame retardant materials have been integrated into paint formulations to decrease their flammability. The objective of this study is to examine the impact of flame retardants on the fire resistance and color alterations of acrylic coatings when applied to pine wood.

Materials and Methods: This study focuses on investigating the influence of flame retardant materials, namely zinc borate, di-ammonium phosphate, nano silica, and nanoclay, incorporated into acrylic paint formulations at concentrations of 10% and 20%, as well as their binary combinations at a concentration of 20%. The primary objective is to evaluate the fire resistance of these formulations when applied to colored pine wood. Additionally, the study analyzes the tensile strength of the paint film, assesses color changes in the wood samples, and examines their fire resistance properties.

Results: Based on the findings of this study, it was observed that the inclusion of zinc borate and di-ammonium phosphate had no noticeable impact on the tensile strength of the paint film. Conversely, the presence of nanoclay significantly enhanced the film's tensile strength, while the addition of nanosilica led to a noticeable reduction in this particular characteristic. In terms of color changes, the samples incorporating zinc borate and di-ammonium phosphate demonstrated the least significant alterations. Furthermore, the introduction of flame retardant materials into the paint formulation improved the fire resistance, with di-ammonium phosphate and nanoclay displaying superior performance in this aspect. Significantly, the conducted tests revealed negligible differences between

the 10% and 20% concentrations of the flame retardant materials in several aspects. Of particular note, the combination treatments involving di-ammonium phosphate-zinc borate and di-ammonium phosphate-nanoclay exhibited superior results in terms of color changes and fire resistance.

Conclusion: The study findings indicate that di-ammonium phosphate and zinc borate had minimal negative impacts on the tensile strength of the paint film and the observed color changes in both the wood samples and the paint film. Additionally, these two flame retardant materials demonstrated superior performance in enhancing fire resistance. Based on these results, it is highly recommended to incorporate di-ammonium phosphate and zinc borate as flame retardants in acrylic paint formulations designed specifically for wood surfaces.

Cite this article: Elahi Fard, Zahra, Rasouli, Davood, Tabarsa, Taghi, Mastery Farahani, Mohammad Reza. 2023. Effects of fire-retardant additives for acrylic coating on flame-retardancy of painted poplar wood. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 30 (2), 55-70.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2023.21513.2023

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تأثیر استفاده از مواد کندسوزکننده در ساختار پوشش آکرلیکی بر کندسوزشوندگی چوب صنوبر رنگ‌شده

زهرا الهی فرد^۱، داود رسولی*^۲، تقی طبرسا^۳، محمدرضا ماستری فراهانی^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد حفاظت و اصلاح چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: zahra.sa5988@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: rasouli@gau.ac.ir
۳. استاد گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: tabarsa@gau.ac.ir
۴. دانشیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: fa_ma@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۵</p> <p>تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸</p> <p>واژه‌های کلیدی: پوشش آکرلیکی، چوب صنوبر رنگ‌شده، کندسوزکننده، مقاومت به آتش، مقاومت کششی</p>	<p>سابقه و هدف: چوب به‌عنوان یک ماده تجدیدپذیر و دوستدار محیط‌زیست، دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی از نظر مکانیکی، فیزیکی و ظاهری می‌باشد که همین امر باعث استفاده گسترده آن در صنعت ساختمان، مبلمان و دکوراتیو می‌شود. چوب به‌عنوان یک ماده زیست‌تخریب‌پذیر توسط عوامل مختلف زنده و غیرزنده مورد تخریب قرار می‌گیرد. تلاش‌های زیادی برای افزایش دوام چوب صورت گرفته است. به‌عنوان مثال برای حفاظت چوب در برابر هوازگی و رطوبت، از رنگ‌ها استفاده می‌شود؛ اما از آن‌جایی که چوب و رنگ‌های پلیمری اشتعال‌پذیر هستند، با استفاده از مواد کندسوزکننده در ساختار رنگ‌ها می‌توان شدت اشتعال‌پذیری را کاهش داد. به همین منظور در این مطالعه تأثیر مواد کندسوزکننده بر مقاومت به آتش و تغییرات رنگی پوشش آکرلیکی اعمال‌شده بر روی چوب صنوبر مورد بررسی قرار گرفت.</p> <p>مواد و روش‌ها: در این پژوهش تأثیر مواد کندسوزکننده (بورات روی، دی آمونیوم فسفات، نانو سیلیکا و نانورس) در غلظت‌های ۱۰، ۲۰ درصد و ترکیب دوتایی از این مواد (۲۰ درصد) در ساختار رنگ آکرلیکی بر مقاومت به آتش چوب صنوبر رنگ‌شده مورد بررسی قرار گرفت. سپس مقاومت کششی فیلم رنگ، تغییرات رنگی نمونه‌های چوبی و هم‌چنین مقاومت به آتش آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.</p>

یافته‌ها: یافته‌های این پژوهش نشان داد که بورات روی و دی آمونیوم فسفات تأثیری بر مقاومت کششی فیلم رنگ نداشته‌اند، اما نانورس به‌طور معنی‌داری مقاومت کششی فیلم را افزایش داد این در حالی است که نانو سیلیکا باعث کاهش معنی‌دار این مقاومت شد. کم‌ترین تغییرات رنگی در نمونه‌های حاوی بورات روی و دی آمونیوم فسفات مشاهده شد. استفاده از مواد کندسوزکننده در ساختار رنگ باعث افزایش مقاومت به آتش گردید که در این بین، دی آمونیوم فسفات و نانو رس کارایی بهتری را از خود نشان دادند. در بسیاری از آزمون‌ها اختلاف قابل توجهی بین غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد مواد کندسوز مشاهده نشد. در تیمارهای ترکیبی هم ترکیب دی آمونیوم- بورات روی و دی آمونیوم- نانورس کارایی مناسب‌تری را در تغییرات رنگی و مقاومت به آتش از خود نشان دادند.

نتیجه‌گیری: در بین مواد کندسوزکننده، دی آمونیوم فسفات و بورات روی با کم‌ترین تأثیر منفی در مقاومت کششی فیلم و تغییرات رنگی نمونه‌ها و فیلم رنگ، بهترین عملکرد را نیز در افزایش مقاومت به آتش از خود نشان دادند. به همین خاطر می‌توان از این دو ماده جهت کندسوز کردن رنگ آکرلیکی مورد استفاده بر روی چوب استفاده نمود.

استناد: الهی فرد، زهرا، رسولی، داود، طبرسا، تقی، ماستری فراهانی، محمدرضا (۱۴۰۲). تأثیر استفاده از مواد کندسوزکننده در ساختار پوشش آکرلیکی بر کندسوزشوندگی چوب صنوبر رنگ‌شده. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۰ (۲)، ۵۵-۷۰.

DOI: 10.22069/JWFST.2023.21513.2023



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

چوب به‌عنوان یک ماده تجدیدپذیر و دوستدار محیط‌زیست دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی از نظر مکانیکی، فیزیکی و ظاهری می‌باشد. به همین دلیل از چوب و فرآورده‌های چوبی به‌طور گسترده در ساخت سازه‌ها، دیوارپوش، کفپوش، مبلمان و ... استفاده می‌شود (۱)؛ اما این ماده پرکاربرد معایب زیادی مانند تخریب توسط عوامل بیولوژیک، هوازگی، آتش و عدم ثبات ابعادی در برابر رطوبت را نیز دارد. روش‌های مختلفی جهت حفاظت چوب در برابر این عوامل ارائه شده است. استفاده از پوشش‌های پلیمری یکی از این راه‌کارهاست. به کمک رنگ‌ها می‌توان مقاومت به هوازگی، مقاومت به رطوبت و خصوصیات ظاهری و زیبایی چوب را بهبود بخشید. رنگ‌های شفاف به دلیل حفظ بافت و ظاهر چوب، از محبوبیت بیش‌تری در این زمینه برخوردار می‌باشند (۲). رنگ‌های آکرلیکی یکی از متداول‌ترین رنگ‌های شفاف مورد استفاده برای چوب می‌باشند. اشتعال‌پذیری یکی از معایب مهم چوب بوده که باعث می‌شود در محل‌هایی که از آن استفاده‌شده خطر آتش‌سوزی را افزایش یابد. هم‌چنین پلیمرهای مورد استفاده به‌عنوان پوشش نیز به‌راحتی دچار حریق می‌شوند (۳). برای حفاظت چوب در برابر آتش عمدتاً از مواد کندسوزکننده استفاده می‌شود. عملکرد این مواد براساس محدود کردن رادیکال‌های آزاد، ایجاد لایه زغالی، رقیق کردن گازهای قابل اشتعال، تولید فوم یا ایجاد محدودیت در انتقال اکسیژن و گرما می‌باشد. به‌عنوان مثال نانورس به دلیل پایداری حرارتی بالا باعث کاهش نرخ آزاد شدن حرارت و هم‌چنین موجب افزایش دود و گاز مونواکسید می‌گردد (۴). بورات روی نیز با تولید زغال، انتقال حرارت را کاهش و دسترسی به اکسیژن را محدود می‌سازد (۵). ترکیبات کندسوزکننده فسفری یکی از مؤثرترین کندسوزکننده‌ها برای پوشش‌های شفاف

می‌باشند. این دسته از مواد موجب ایجاد زغال بیش‌تر و محدود شدن رادیکال‌های آزاد می‌گردند (۶). هم‌چنین استفاده هم‌زمان ترکیبات کندسوزکننده فسفری با بورات روی اثر هم‌افزایی مناسبی را در پوشش‌های آماس‌کننده از خود نشان می‌دهند (۷). نانوسیلیکاها نیز باعث کاهش نفوذپذیری گازها به ساختار رنگ و افزایش تشکیل زغال در طی فرآیند سوختن می‌گردند (۸).

مواد کندسوزکننده را می‌توان به دو شکل، تیمار چوب‌آلات با این مواد و یا استفاده در ساختار پوشش‌های آماس‌کننده به‌کار برد. در روش تیمار چوب‌آلات با این مواد ممکن است برخی از ویژگی‌های کاربردی چوب تحت تأثیرگذار قرار گیرد به‌عنوان مثال ممکن است شاهد تغییرات رنگی، کاهش دوام و استحکام مکانیکی و یا تداخل در عملکرد چسب‌های مورد استفاده باشیم (۸). استفاده در ساختار پوشش‌های آماس‌کننده یکی از روش‌های مؤثر و کارآمد جهت محافظت بستر مورد استفاده در برابر آتش می‌باشد. این پوشش‌ها زمانی که در معرض حرارت قرار می‌گیرند منبسط شده و لایه‌ای ضخیم فومی شکل تشکیل و می‌توانند به‌عنوان یک مانع‌کننده فیزیکی از بستر در برابر آتش و حرارت محافظت نمایند. به‌طور عمده این نوع پوشش‌های آماس‌کننده از ترکیب عامل ایجادکننده گاز، منبع کربن و منبع اسید با رزین ساخته می‌شوند؛ اما از آنجایی که میزان بالایی از مواد کندسوزکننده در ساختار رزین استفاده می‌شود، پوشش‌های ساخته‌شده رنگ کدر و غیرشفاف خواهند داشت که همین امر باعث ایجاد محدودیت‌هایی جهت استفاده بر روی چوب و فرآورده‌ای چوبی می‌گردد. جهت حل این مشکل تلاش‌هایی جهت تولید پوشش‌های آماس‌کننده شفاف صورت گرفته است. یان و همکاران از طریق استری کردن فسفر حلقوی با بورات روی و استفاده آن در رزین آمینی پوشش شفاف آماس‌کننده تولید کردند

نمونه‌های ۲۰ درصدی ماده کندسوزکننده استفاده گردید. رنگ‌های حاوی دو نوع ماده کندسوزکننده نیز (سطح ۲۰ درصد) از ترکیب ۱۰ درصدی از مواد کندسوزکننده تهیه شدند. جهت بررسی تأثیر ماده کندسوزکننده در ساختار رنگ‌ها از نمونه‌های چوبی رنگ‌شده بدون ماده کندسوزکننده به‌عنوان نمونه‌های مرجع و شاهد (control) استفاده گردید.

به‌منظور پوشش‌دهی نمونه‌های چوبی، از میزان ۱۸۰ گرم رنگ در هر مترمربع (بر اساس وزن خشک رنگ) استفاده و توزیع و پخش آن بر روی چوب به‌وسیله قلم‌مو در طی دو مرحله انجام گرفت. در ادامه نمونه‌های رنگ‌شده جهت خشک شدن به مدت ۲۴ ساعت در محیط بسته و عاری از گردوغبار قرار داده شدند.

جهت بررسی تأثیر مواد کندسوزکننده بر ویژگی‌های رزین رنگ، فیلم رنگ آکرلیک حاوی مواد کندسوزکننده تهیه و مقاومت کششی آن مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور از صفحه‌های شیشه‌ای با ابعاد ۲۰×۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. فیلم رنگ حاوی مواد کندسوزکننده با غلظت‌های مختلف (۱۰، ۲۰ و ۲۰ درصد ترکیبی) با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر بر روی صفحه‌های شیشه‌ای تشکیل و مقاومت کششی نمونه‌هایی به عرض ۱ و طول ۸ سانتی‌متر و با سرعت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه توسط دستگاه ستام STM1 مورد ارزیابی قرار گرفت.

جهت بررسی تغییرات رنگی نمونه‌های چوبی رنگ‌شده از استاندارد ASTM D2244 (دستگاه TES A135) بر اساس سیستم CIE-lab استفاده شد. تغییرات رنگی (ΔE) نمونه‌های حاوی ماده کندسوزکننده نسبت به نمونه‌های شاهد بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

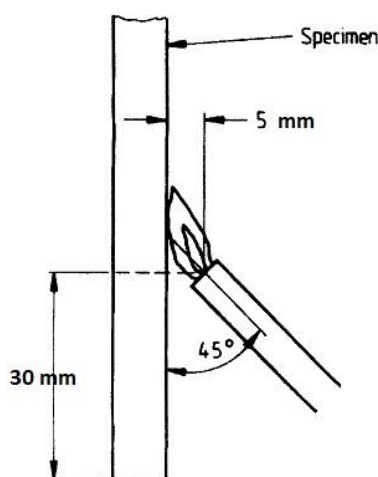
(۶). هم‌چنین از استرهای فسفات مبتنی بر اسید فیتیک به‌عنوان کندسوزکننده در پوشش شفاف آماس‌کننده برای چوب استفاده و مشخص گردید در حالت بهینه این دسته از مواد می‌توانند اثر کندسوزکنندگی به‌همراه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مناسبی را داشته باشند (۹). با توجه به اهمیت و کاربرد پوشش‌های شفاف و به‌خصوص پوشش شفاف آکرلیکی در صنعت چوب در این پژوهش، تأثیر چند ماده کندسوزکننده بر خصوصیات رنگی و هم‌چنین تأثیر آن‌ها در کاهش اشتعال‌پذیری چوب صنوبر رنگ‌شده مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از نمونه‌های چوبی فاقد عیب به ابعاد ۱۵×۱۰×۲ سانتی‌متر (L×R×T) به‌دست آمده از سه‌پایه درخت صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides*)، به‌عنوان بستر رنگ استفاده شد. رنگ آکرلیکی بر پایه آب از شرکت الوان (ALCO-3112) با ۴۳ درصد ماده جامد، مواد کندسوزکننده شامل نانوسیلیکا (NS)، نانورس اصلاح‌شده (NC)، بورات‌روی (ZB) و دی‌آمونیم فسفات (DAP) به ترتیب از شرکت‌های فن‌آوری‌های نوین فدک (ایران)، اکسیر (اتریش)، کیمیا نوین (ایران) و والاس (انگلستان) تهیه گردیدند. جهت اصلاح ساختار رنگ با مواد کندسوزکننده، ابتدا محلول و یا سوسپانسیون ۱۰ درصدی از مواد کندسوزکننده در آب تحت همزن مغناطیسی به مدت ۲۴ ساعت تهیه شد. سوسپانسیون نانو مواد بعد از همزن مغناطیسی، به مدت ۵ دقیقه تحت اولتراسونیک ۱۰۰ وات قرار گرفتند. در ادامه محلول‌ها و سوسپانسیون‌های آماده جهت رسیدن به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی ماده کندسوزکننده در ساختار رنگ آکرلیکی مورد استفاده قرار گرفتند. لازم به ذکر است در نمونه‌های حاوی تنها ۱۰ درصد ماده کندسوزکننده، از آب مقطر جهت رسیدن به غلظت یکسان رنگ با

ثابت گاز خروجی قرار داده شدند سپس فاکتورهای مدت زمان شعله‌وری پس از حذف شعله، درصد کاهش وزن، مدت زمان گداخت و میزان سطح اندازه‌گیری گردید (۱۰).

آزمون مقاومت به آتش مطابق استاندارد BS۴۷۶ و با نحوه قرارگیری نمونه و شعله مطابق شکل ۱ انجام شد برای این منظور نمونه‌ها به مدت ۱۲۰ ثانیه در معرض شعله آتش به طول ۳۵ میلی‌متر و با فشار



شکل ۱- نحوه قرارگیری نازل آتش در آزمون مقاومت به آتش (۱۰).

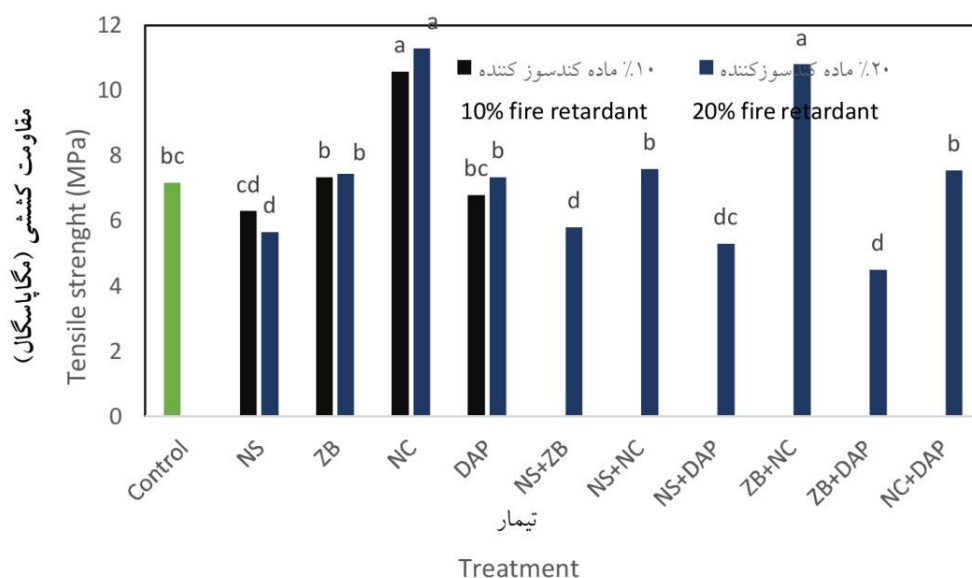
Figure 1. Placement method of the fire nozzle in the fire resistance test (10).

مشخص است استفاده از برخی از مواد کندسوزکننده مانند نانوسیلیکا تأثیر منفی در مقاومت کششی رنگ حاصل داشته است به طوری که استفاده ۲۰ درصدی از این ماده موجب کاهش معنی‌دار مقاومت کششی شده است. درحالی‌که بورات روی و دی آمونیم فسفات تأثیری مثبت و یا منفی بر مقاومت کششی نداشته است. از سوی دیگر استفاده از نانو رس در سطوح ۱۰ و ۲۰ درصد به طور معنی‌داری مقاومت کششی را افزایش داده است. اثر تقویت‌کنندگی نانورس در نمونه‌های ترکیبی با بورات روی و حتی نانو سیلیکا نیز مشهود می‌باشد.

نتایج آزمون‌های مربوطه مقاومت کششی، میزان روشنایی و شاخص‌های تست آتش در تیمارها به وسیله آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه با طرح کاملاً تصادفی بررسی و در صورت معنی‌دار شدن میانگین داده‌ها به وسیله آزمون دانکن مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

تأثیر مواد کندسوزکننده بر مقاومت کششی رنگ اصلاح‌شده در شکل ۲ ارائه شده است نتایج بررسی آماری نشان داد که اختلاف تیمارها در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۱). همان‌گونه که

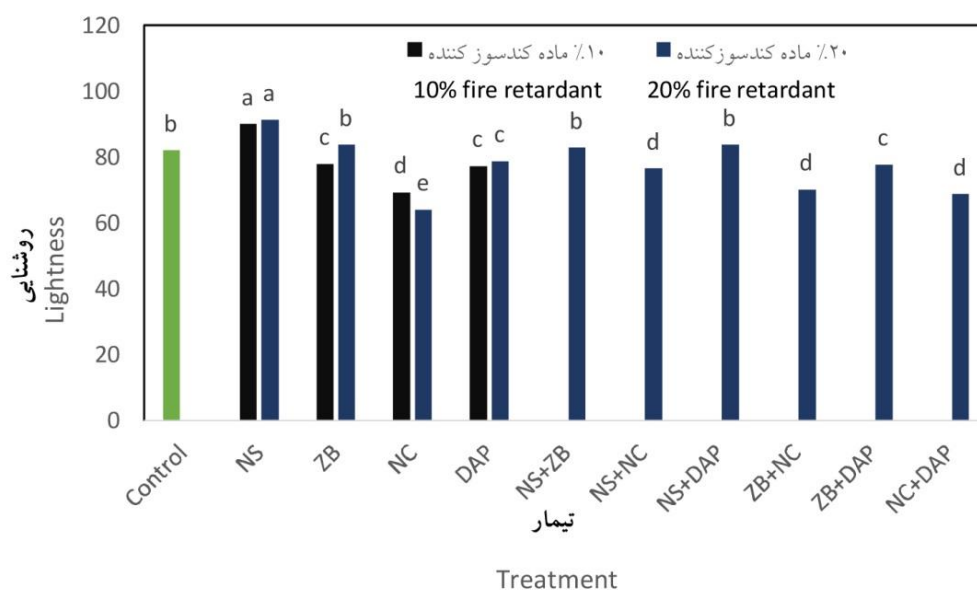


شکل ۲- مقاومت کششی فیلم رنگ در تیمارها.

Figure 2. The tensile strength of the paint film in the treatments.

نتایج آزمون رنگ‌سنجی نشان داد که میزان روشنایی نمونه‌های چوبی رنگ‌شده بر اساس نوع ماده کندسوزکننده تغییرات معنی‌داری داشته است (شکل ۳) به طوری که تجزیه واریانس یک‌طرفه نشان داد که اختلاف معنی‌داری در بین تیمارها در سطح ۹۹ درصد وجود دارد استفاده از نانوسیلیکا در سطوح ۱۰ و ۲۰ درصد موجب افزایش معنی‌دار روشنایی نمونه‌ها گردیده است (جدول ۱). درحالی‌که سطوح ۱۰ درصد بورات روی و سطوح ۱۰ و ۲۰ درصد نانورس و دی‌آمونیم فسفات باعث تیره‌تر شدن معنی‌دار رنگ نمونه‌ها گردیده است که در این بین نانورس به مقدار بیش‌تری روشنایی نمونه‌ها را کاهش داده است. در نمونه‌های ترکیبی حاوی ۲۰ درصد ماده کندسوزکننده، تنها تیمارهای حاوی نانو سیلیکا- بورات روی و نانوسیلیکا- دی‌آمونیم فسفات مقدار روشنایی برابر با نمونه‌های شاهد داشتند و سایر تیمارهای ترکیبی دارای میزان روشنایی کم‌تری بودند.

از آنجایی‌که سطوح نانو ذرات سیلیکا غنی از پیوندهای هیدروژنی می‌باشد به همین خاطر این ذرات تمایل زیادی به ایجاد پیوند هیدروژنی در بین خود و در نتیجه کلوخه شدن دارند. همین امر سبب می‌شود رنگ‌های حاوی این ماده از نظر خواص مکانیکی ضعیف‌تر باشند (۱۱). خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانورس مستقیماً تحت تأثیر میزان لایه‌لایه‌ای شدن (intercalation/ exfoliation) ذرات نانورس در ساختار نانوکامپوزیت حاصل باشد که این امر تحت تأثیر فاکتورهای زیادی، از جمله نوع و میزان استفاده از نانورس، ویسکوزیته و درجه کریستالیت پلیمر، برهمکنش پلیمر و نانوذرات و ... باشد (۱۲). افزایش قابل توجه مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی نانورس بیانگر آن است که میزان لایه‌لایه‌ای شدن نانو ذرات رس با تبدیل به لایه‌های سیلیکاتی و برهمکنش مناسب آن‌ها با رزین آکرلیکی به‌خوبی اتفاق افتاده است.

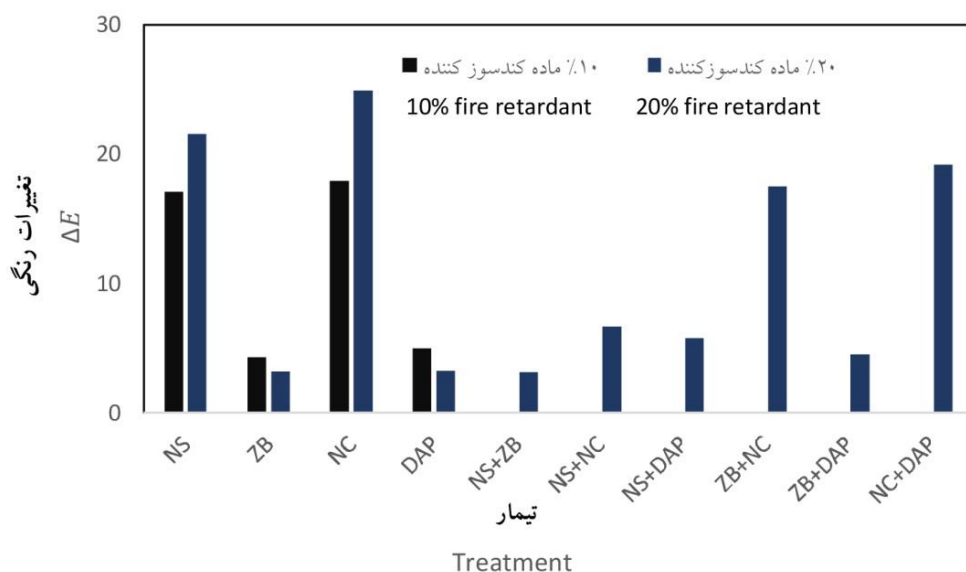


شکل ۳- تأثیر نوع ماده کندسوزکننده در میزان روشنایی نمونه‌ها.

Figure 3. The effect of the flame retardant materials on the lightness of the samples.

است. نکته قابل توجه در خصوص تغییرات رنگی کم‌تر نمونه حاوی کندسوزکننده نانورس- نانوسیلیکا می‌باشد دلیل این امر می‌تواند ناشی از اثر خشی‌کنندگی این دو ماده در کنار هم در تغییرات شاخص‌های رنگی باشد به‌عنوان مثال همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد (شکل ۳) استفاده از نانوسیلیکا موجب افزایش روشنایی و استفاده از نانورس موجب کاهش روشنایی می‌گردد بنابراین حضور این دو ماده در کنار هم باعث کاهش تغییرات روشنایی و در نتیجه تغییرات رنگی شده است.

شکل ۴ میزان تغییرات رنگی نمونه‌های حاوی ماده کندسوزکننده نسبت به نمونه‌های شاهد را نشان می‌دهد همان‌گونه که مشخص است استفاده از نانوسیلیکا و نانورس در سطوح ۱۰ و ۲۰ درصد باعث تغییر رنگ بیش‌تر نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد گردیده است. این در حالی است که حضور دو ماده بورات‌روی و دی‌آمونیم فسفات در ساختار رنگ تأثیر منفی کم‌تری در تغییر رنگ نمونه‌ها داشته است. در مواد کندسوزکننده ترکیبی نیز به‌خوبی اثر نانورس در افزایش تغییرات رنگی نمونه‌های حاوی نانورس- بورات‌روی و نانورس- دی‌آمونیم فسفات مشخص

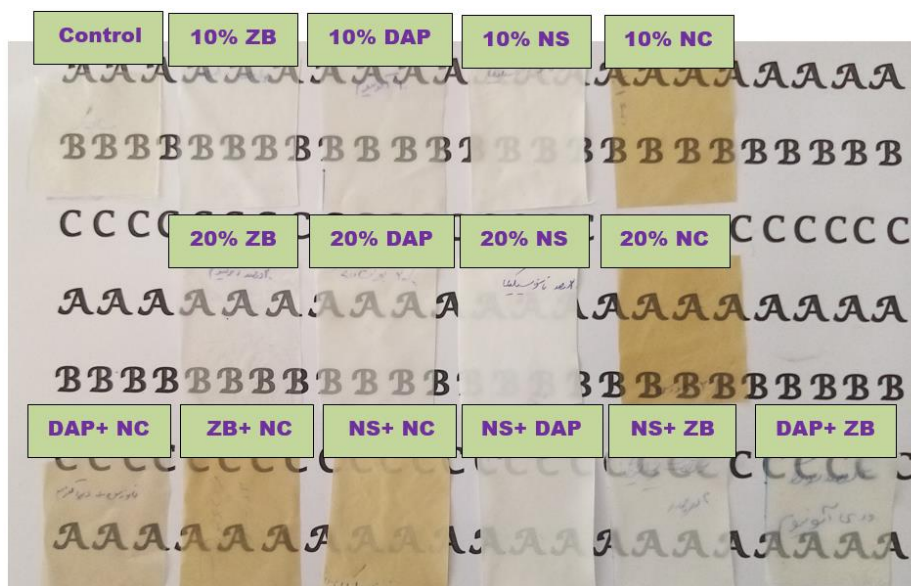


شکل ۴- تأثیر نوع ماده کندسوزکننده در میزان تغییرات رنگی نمونه‌ها.

Figure 4. The effect of the flame retardant materials on the color changes of the samples.

این در حالی است که در نمونه‌های حاوی نانورس میزان شفافیت مطلوب‌تر بوده؛ اما رنگ این نمونه‌ها متفاوت از رنگ نمونه‌های شاهد می‌باشد. کم‌ترین تغییرات رنگی و میزان شفافیت در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ بورات روی و دی آمونیوم و هم‌چنین ترکیبی این دو ماده در مقایسه با نمونه‌های شاهد مشاهده می‌شود.

در شکل ۵ تصاویر فیلم رنگ آکرلیکی حاوی مواد کندسوزکننده با ضخامت در حدود ۲۰۰ میکرون ارائه شده است. همان‌گونه که پیداست شفافیت نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا از بقیه تیمارها کم‌تر می‌باشد به طوری که در نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد نانوسیلیکا متن پشت فیلم رنگ به سختی دیده می‌شود.



شکل ۵- تصاویر فیلم رنگ‌های حاوی مواد کندسوزکننده.

Figure 5. The images of paint film containing flame retardant additives.

در جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های مورد بررسی در آزمون آتش ارائه گردیده است. همان‌گونه که مشخص است به‌غیر از شاخص سطح کربونیزه، در سایر شاخص‌ها اختلاف معنی‌داری بین تیمارها در سطح ۹۹ درصد مشاهده می‌شود.

جدول ۱- تجزیه واریانس مقاومت کششی، میزان روشنایی و شاخص‌های مقاومت به آتش.

Table 1. Variance analysis of tensile strength, lightness, and fire resistance indexes.

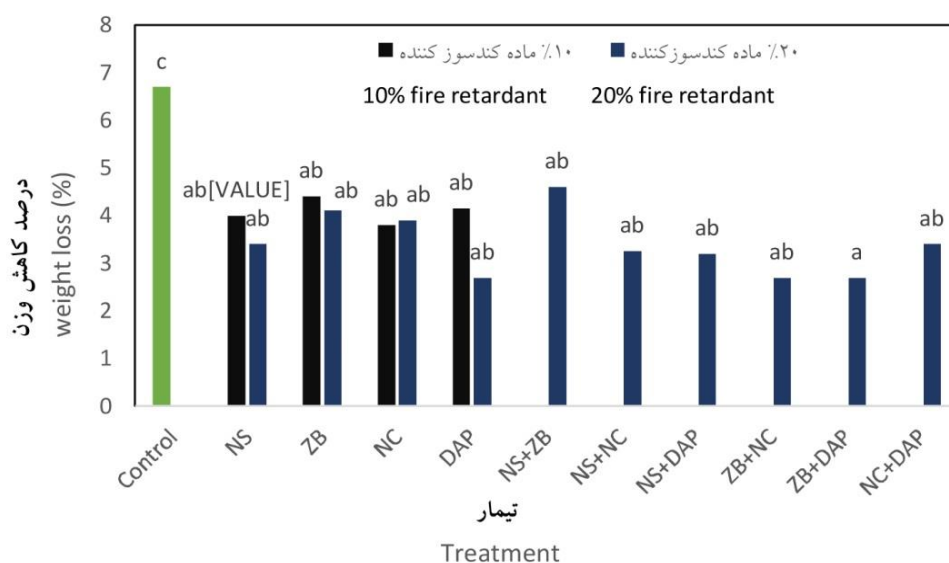
معناداری Significant	فاکتور F	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of Squares	
0.00**	23.842	18.644	14	261.009	مقاومت کششی Tensile strength
0.00**	101.67	1794.7	14	25125.8	روشنایی Lighting
0.004**	3.185	2.841	14	39.779	کاهش وزن Weight loss
0.001**	3.857	45	14	630	افروختگی Glowing
0.000**	327.943	8934.619	14	12084.667	سوختن پس از حذف شعله Combustion without flame resource
0.394 ^{ns}	1.104	78.03	14	1092.466	سطح کربونیزه Carbonized area

** معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹ درصد و ^{ns} عدم معناداری

** Significant at the 99% probability level, ^{ns} not significant

در بین تیمارها بیش‌ترین کاهش وزن بعد از آزمون آتش در تیمار شاهد (فاقد کندسوزکننده) مشاهده می‌شود (شکل ۶). علت این امر ناشی از تخریب حرارتی بیش‌تر آن‌ها می‌باشد. حضور مواد کندسوزکننده جدا از نوع و میزان باعث گردیده در بین تیمارها بیش‌ترین کاهش وزن بعد از آزمون آتش در تیمار شاهد (فاقد کندسوزکننده) مشاهده می‌شود (شکل ۶). علت این امر ناشی از تخریب حرارتی بیش‌تر آن‌ها می‌باشد. حضور مواد کندسوزکننده جدا از نوع و میزان باعث گردیده

کاهش وزن کم‌تری را در نمونه‌ها مشاهده نماییم. در بین تیمارها، بهترین عملکرد مربوط به نمونه‌های ۲۰ درصد ترکیبی دی آمونیم فسفات- بورات‌روی بوده و سایر تیمارها هم از وضعیت مطلوبی برخوردار بوده و از نظر آماری مشابه هم بودند.

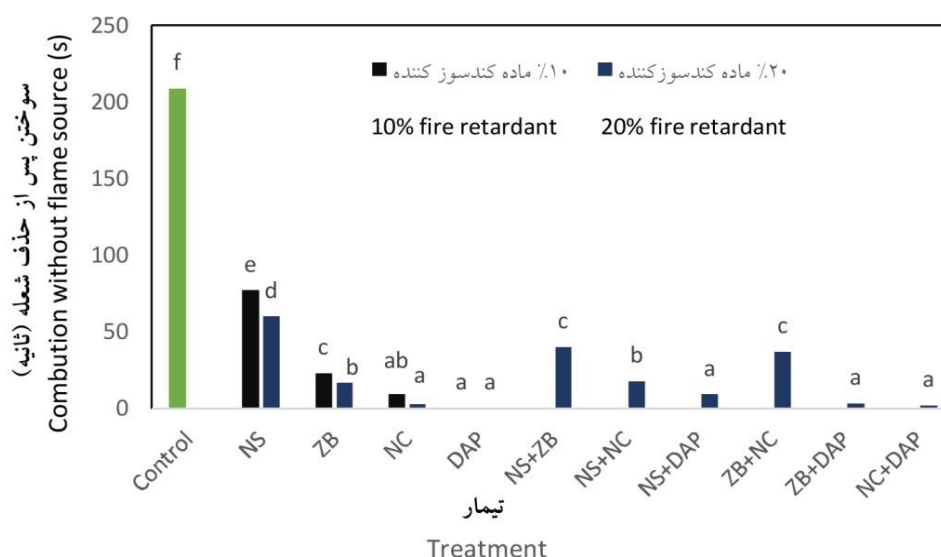


شکل ۶- تأثیر نوع ماده کندسوزکننده در کاهش وزن نمونه‌ها پس از آزمون آتش.

Figure 6. The effect of the flame retardant materials on the weight loss of the samples after the fire test.

فسفات و نانورس و ترکیبی دی آمونیم فسفات با سایر کندسوزکننده‌ها کم‌ترین مدت زمان سوختن را داشته‌اند درحالی‌که نانوسیلیکا در این خصوص کارآمدی کم‌تری را داشته و حتی این عملکرد در سطوح ترکیبی نیز تأثیر خود را به‌جا گذاشته است.

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود بیش‌ترین زمان سوختن پس از حذف شعله متعلق به تیمار شاهد می‌باشد. استفاده از مواد کندسوزکننده به‌طور معنی‌داری مدت‌زمان سوختن پس از حذف شعله را کاهش داده است. در این بین برخی از تیمارها مانند سطوح ۱۰ و ۲۰ درصدی دی آمونیوم

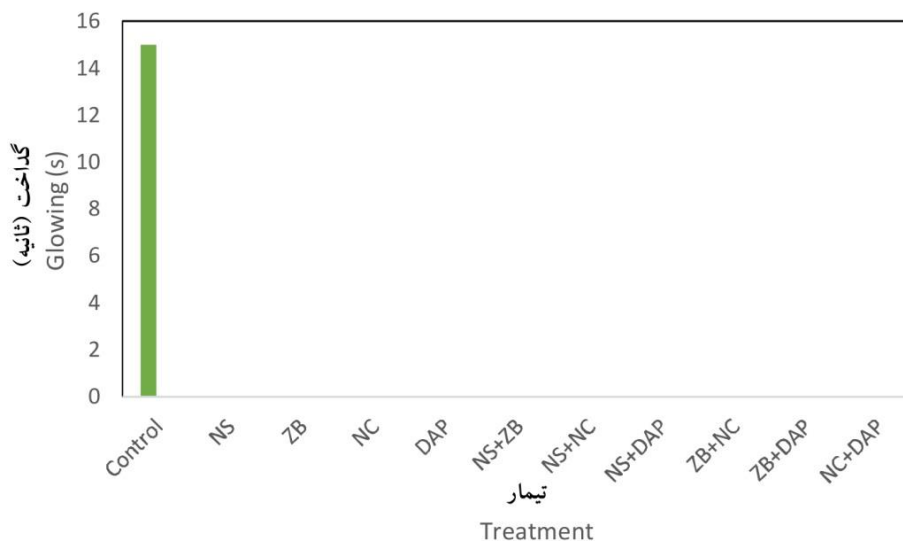


شکل ۷- تأثیر نوع ماده کندسوزکننده در مدت زمان سوختن پس از حذف شعله چراغ.

Figure 7. The effect of the flame retardant materials on combustion without flame source.

رؤیت می‌گردد درحالی‌که با افزوده شدن ماده کندسوزکننده، این پدیده بر روی نمونه‌ها مشاهده نمی‌گردد.

در شکل ۸ مدت زمان افروختگی پس از خاموش شدن نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است تنها در نمونه‌های فاقد کندسوزکننده افروختگی

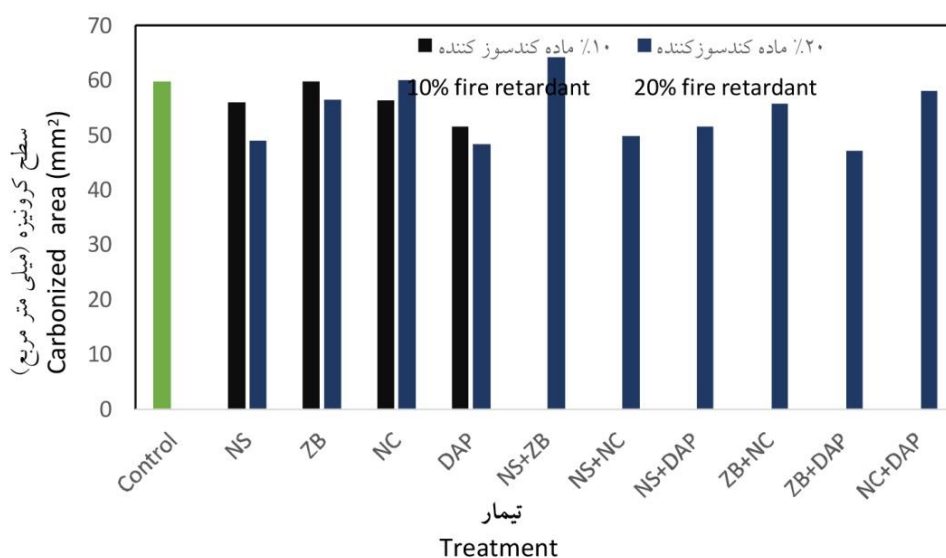


شکل ۸- تأثیر نوع ماده کندسوزکننده در مدت زمان افروختگی پس از خاموش شدن شعله.

Figure 8. The effect of the flame retardant materials on glowing without a flame source.

فرآیند سوختن و کربونیزه شدن تقریباً محدود به منطقه حضور شعله بوده و گسترش شعله به سایر مناطق محدود و غیرمعنی‌دار بوده است.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین تیمارها با همدیگر وجود ندارد (شکل ۹). با توجه به حضور شعله (به مدت ۱۲۰ ثانیه) بر روی سطح نمونه‌های آزمونی، می‌توان استنباط کرد که

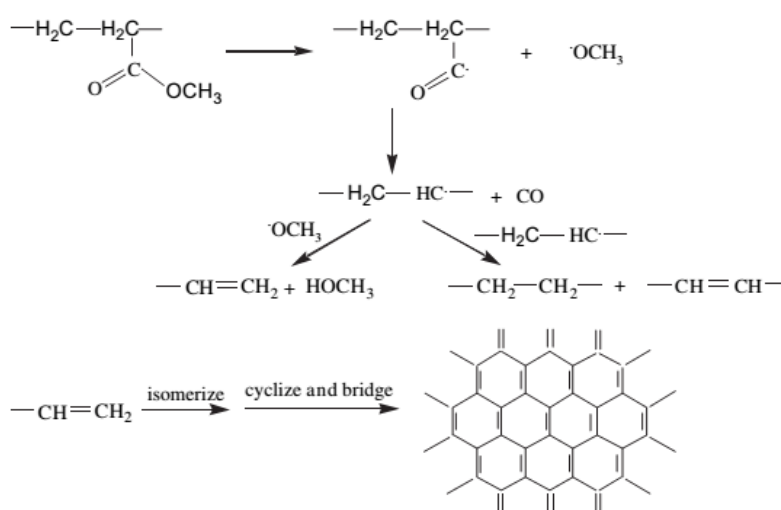


شکل ۹- تأثیر نوع ماده کندسوزکننده بر میزان سطح کربونیزه نمونه‌ها.

Figure 9. The effect of the flame retardant materials on carbonized area.

دماهای بالا به‌عنوان کاتالیزور عمل نموده و موجب تجزیه رزین آکرلیک گردند. به‌طوری‌که آن‌ها باعث ایجاد ترکیبات حلقوی در اثر تشکیل کتون‌ها و انیدریدهای حلقوی در فرآیند تجزیه رزین آکرلیک می‌شوند و این ترکیبات در نهایت باعث ایجاد شبکه زغالی سه‌بعدی پیوسته می‌گردد (شکل ۹) (۱۱، ۱۳ و ۱۴).

رزین آکرلیک به دلیل داشتن ویژگی کربونیزه شدن به‌عنوان یک رزین مهم در پوشش‌های کندسوزشونده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مکانیسم تخریب حرارتی این رزین بستگی به ساختار مولکولی و نحوه تخریب حرارتی آن دارد. در واقع تشکیل میزان و نوع زغال وابستگی زیادی به نوع واکنش‌هایی صورت گرفته دارد. آمونیوم فسفات‌ها می‌توانند در



شکل ۱۰- تصویر شماتیک از تخریب رزین آکرلیک در حضور آمونیوم فسفات‌ها.

Figure 10. Schematic outline of the thermal degradation of acrylic resin in the presence of ammonium phosphates.

عرضی عمل می‌نماید و بدین طریق با تشکیل زغال بیش‌تر اثر حفاظتی در برابر شعله از خود نشان می‌دهد (۵). نانورس از طریق چند مکانیسم می‌تواند مقاومت به آتش را افزایش دهد. این ماده باعث کاهش نرخ آزادسازی گرما و هم‌چنین افزایش میزان دود و CO می‌گردد. در فرآیند سوختن، نانوذرات رس به سطح پلیمر مهاجرت کرده و با ایجاد لایه‌های سیلیکاتی با دانسیته بالا، تخریب قسمت‌های داخلی‌تر را کاهش می‌دهند. هم‌چنین این ماده با ایجاد لایه متراکم از زغال، نفوذ اکسیژن و حرارت را نیز محدود می‌نماید (۴ و ۱۷).

نانوسیلیکا به‌دلیل داشتن پایداری شیمیایی و حرارتی بالاتر موجب تقویت و ایجاد شبکه در ساختار زغال و تثبیت زغال تشکیل‌شده می‌گردد و بدین‌ترتیب بازدارندگی بیش‌تر در برابر شعله فراهم می‌سازد. هم‌چنین این ماده می‌تواند با ایجاد شبکه Si-O-Si لایه‌ای محافظ شبیه به سرامیک در سطح ایجاد نماید (۱۵). استفاده از بورات‌روی در ساختار پلیمرها، موجب کاهش نرخ آزادسازی گرما و تولید بخار آب در برابر آتش می‌گردد (۱۶). در واقع بورات‌روی با جذب حرارت تجزیه و به آب، اکسید روی و تری اکسید برون تبدیل می‌شود. تری اکسید برون در زغال تشکیل‌شده به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده

نتیجه گیری

گزینه‌های بهتری برای کندسوزکردن بودند؛ زیرا آن‌ها تأثیر منفی بر مقاومت کششی رنگ نداشتند و از سوی دیگر موجب کم‌ترین میزان تغییرات رنگی در نمونه‌ها شدند. در خصوص غلظت ماده کندسوزکننده نیز تفاوت فاحش و قابل توجهی بین غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد مشاهده نگردید. علی‌رغم آن‌که برخی از تیمارهای ترکیبی مانند دی آمونیوم- بورات روی و دی آمونیوم- نانورس کارایی خوبی داشتند اما اثر هم‌افزایی در آن‌ها مشاهده نشد و رفتار آن‌ها نزدیک به تیمارهایی بود که حاوی یک ماده کندسوزکننده بودند.

در این مطالعه جهت کندسوزکردن رنگ آکرلیکی شفاف از چهار نوع ماده کندسوزکننده استفاده شد. علی‌رغم آن‌که هر چهار نوع ماده موجب کندسوزشدن چوب صنوبر رنگ‌شده گردیدند؛ اما تأثیر آن‌ها در مقاومت کششی فیلم و تغییرات رنگی نمونه‌ها متفاوت بود. استفاده از نانوسیلیکا باعث کاهش مقاومت کششی فیلم رنگ و همچنین تغییر رنگ بیش‌تر نسبت به نمونه‌های فاقد ماده کندسوزکننده گردید. نانورس علی‌رغم افزایش مقاومت کششی تأثیر منفی در رنگ نمونه‌ها داشت و تغییرات رنگی را افزایش داد؛ اما دی آمونیوم فسفات و بورات روی

منابع

1. Kmeťová, E., Kačík, F., Kubovský, I., & Kačíková, D. (2022). Effect of expandable graphite flakes on the flame resistance of oak wood. *Coatings*. 12 (12), 1908.
2. Akbarnezhad, M., Rasouli, D., Yousefi, H., & Mashkour, M. (2020). Weathering performance of beech wood coated with acrylic paint containing UV stabilizers of dihydroxy benzophenone and nano zinc oxide. *Drvna Industrija*. 71 (4), 403-409.
3. Chuang, C. S., Tsai, K. C., Yang, T. H., Ko, C. H., & Wang, M. K. (2011). Effects of adding organo-clays for acrylic-based intumescent coating on fire-retardancy of painted thin plywood. *Applied Clay Science*. 53 (4), 709-715.
4. Shah, A. U. R., Prabhakar, M., & Song, J. (2017). Current advances in the fire retardancy of natural fiber and bio-based composites—A review. *International J. of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 4, 247-262.
5. Bee, S. T., Sin, L. T., Cheng, B. S., Ratnam, C. T., & Rahmat, A. (2018). Electron beam irradiation of zinc borate flame retardant containing acrylonitrile-butadiene-styrene ABS composites. *J. of Polymer Research*. 25, 1-16.
6. Yan, L., Xu, Z., & Wang, X. (2019). Synergistic flame-retardant and smoke suppression effects of zinc borate in transparent intumescent fire-retardant coatings applied on wood substrates. *J. of Thermal Analysis and Calorimetry*. 136, 1563-1574.
7. Tang, S., Qian, L., Qiu, Y., & Dong, Y. (2018). Synergistic flame-retardant effect and mechanisms of boron/phosphorus compounds on epoxy resins. *Polymers for Advanced Technologies*. 29 (1), 641-648.
8. Rangavar, H., Khosro, S., & Javy, M. (2018). The effect of nano wollastonite on the fire resistance and the adhesion properties of the water-based acrylic coating on wood surfaces. *Iranian J. of Wood and Paper Science Research*. 3, 2.
9. Tian, Y., Wang, C., Ai, Y., Tang, L., & Cao, K. (2023). Phytate-based transparent and waterproof intumescent flame-retardant coating for protection of wood. *Materials Chemistry and Physics*. 294, 127000.
10. Standard British 476. (1991). Fire tests on building materials and structures. Part 12: Method of test for ignitability of products by direct flame impingement.

11. Wang, Z., Han, E., & Ke, W. (2006). Effect of acrylic polymer and nanocomposite with nano-SiO₂ on thermal degradation and fire resistance of APP-DPER-MEL coating. *Polymer Degradation and Stability*. 91 (9), 1937-1947.
12. Albdiry, M., Yousif, B., Ku, H., & Lau, K. (2013). A critical review on the manufacturing processes in relation to the properties of nanoclay/polymer composites. *J. of Composite Materials*. 47 (9), 1093-1115.
13. Drevelle, C., Duquesne, S., Le Bras, M., Lefebvre, J., Delobel, R., Castrovinci, A., & Vouters, M. (2004). Influence of ammonium polyphosphate on the mechanism of thermal degradation of an acrylic binder resin. *J. of Applied Polymer Science*. 94 (2), 717-729.
14. Duquesne, S., Magnet, S., Jama, C., & Delobel, R. (2005). Thermoplastic resins for thin film intumescent coatings—towards a better understanding of their effect on intumescence efficiency. *Polymer Degradation and Stability*. 88 (1), 63-69.
15. Xiong, M., Wu, L., Zhou, S., & You, B. (2002). Preparation and characterization of acrylic latex/nano-SiO₂ composites. *Polymer International*. 51 (8), 693-698.
16. Lu, N., Zhang, P., Wu, Y.n., Zhu, D., & Pan, Z. (2019). Effects of size of zinc borate on the flame retardant properties of intumescent coatings. *International J. of Polymer Science*.
17. Yan, L., Xu, Z., & Wang, X. (2018). Synergistic effects of organically modified montmorillonite on the flame-retardant and smoke suppression properties of transparent intumescent fire-retardant coatings. *Progress in Organic Coatings*. 122, 107-118.