

پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش: مروری بر مبانی، بهینه‌سازی فرمول‌بندی و فناوری‌های نوین

مجید میرزایی

تهران، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی مواد غیرفلزی

چکیده ...

پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش به‌عنوان یکی از کارآمدترین و اقتصادی‌ترین راهکارهای حفاظت غیرفعال، نقش کلیدی در تأخیر اشتعال، کاهش انتقال حرارت و محدود کردن گسترش شعله ایفا می‌کنند. این مقاله مروری با هدف نظام‌مهندسی دانش موجود در چهار حوزه اصلی تدوین شده است: نخست، مبانی و سازوکارهای عملکرد با تمایز دو دسته پوشش‌های منبسط‌شونده (تشکیل لایه زغالی متورم با قابلیت انبساط تا ۱۰۰ برابر) و غیرمنبسط‌شونده (سازوکار فاز گازی یا تشکیل لایه شیشه‌ای). دوم، بهینه‌سازی فرمول‌بندی مبتنی بر شواهد تجربی صنعتی که نشان می‌دهد انتخاب چسب پلیمری مناسب، نسبت بهینه اجزای اصلی و افزودنی‌های نانورسی و الیاف تقویت‌کننده تأثیر مستقیمی بر پایداری حرارتی و یکپارچگی لایه زغالی دارند. سوم، فناوری‌های نوین نظیر نانوکامپوزیت‌ها و روش سل-ژل که با ایجاد پوشش‌های شفاف و حفظ زیبایی زیرلایه، دامنه کاربرد این سامانه‌ها را به‌طور قابل توجهی گسترش داده‌اند. در بخش پایانی، با توجه به چالش‌های مرتبط با کاربرد مستقیم پوشش‌ها بر روی زیرلایه‌های حساس (آسیب‌های شیمیایی، کاهش استحکام و تغییرات ظاهری)، رویکرد «کاربرد غیرمستقیم» بر روی مواد پشتیبان به‌عنوان راهکاری کم‌تأثیر و منطبق با اصول برگشت‌پذیری پیشنهاد می‌شود. با این وجود، فقدان پژوهش‌های نظام‌مند در مقایسه مستقیم فرمول‌بندی‌های مختلف و ارزیابی پایداری طولانی‌مدت این پوشش‌ها، همچنان خلأ اساسی در دانش فعلی است.

کلیدواژه‌ها:

واژه‌های کلیدی:

پوشش‌های منبسط‌شونده،
پوشش‌های
غیرمنبسط‌شونده،
نانوکامپوزیت،
روش سل-ژل،
حفاظت غیرفعال در برابر
آتش،
بهینه‌سازی فرمول‌بندی.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

mjmirzaei@nri.ac.ir*

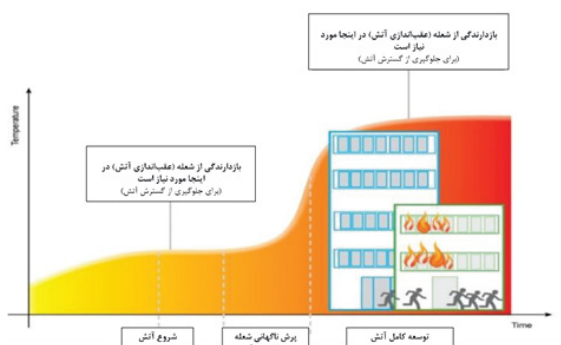
۱ مقدمه

خسارات سنگین جانی و مالی ناشی از آتش، همراه با درد و رنج انسانی و زیان‌های اقتصادی گسترده‌ای که این پدیده به همراه دارد، سبب شده است که توسعه راهکارهای کارآمد برای حفاظت در برابر حریق به یکی از اولویت‌های پژوهشی و صنعتی تبدیل شود. هدف نهایی این تلاش‌ها، مهار تلفات و کاهش آسیب‌های ناشی از آتش تا حدی قابل قبول است. در شرایط کنونی، تحولات سریع در صنعت ساختمان و پیشرفت فناوری معماری، سازه‌هایی با پیچیدگی بی‌سابقه و استفاده از اجزای سبک ولی مستحکم پدید آورده است. در چنین سازه‌هایی، طیف وسیعی از مواد اعم از آلی، معدنی، مصنوعی یا طبیعی، غالباً در برابر حرارت شدید ناشی از آتش به سرعت شعله‌ور می‌شوند یا می‌سوزند. در سوی دیگر، موادی مانند بتن و فلزات (به استثنای منیزیم و آلومینیوم) ذاتاً نمی‌سوزند، در فرایند احتراق شرکت نمی‌کنند و بخارات قابل اشتعال از خود متصاعد نمی‌سازند. با این حال، این نکته حائز اهمیت است که چنین موادی نیز تنها برای بازه زمانی مشخصی می‌توانند در برابر حرارت تاب‌آوری کنند؛ چراکه استحکام و شکل‌پذیری آن‌ها در دماهای بالا به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد و در نتیجه، اعضای سازه‌ای در معرض آتش ممکن است تغییر شکل دهند یا حتی به کلی فرو بریزند. مدت زمانی که هر سازه می‌تواند در شرایط حریق دوام آورد، تا میزان زیادی به دمای پیش‌بینی شده آتش وابسته است و این دما نیز خود تابعی از نوع و مقدار مواد سوختنی موجود و وضعیت تهویه است [۱]. هرچند هیچ پوششی نمی‌تواند محافظت ابدی در برابر آتش فراهم آورد، اما کاربرد صحیح آن‌ها می‌تواند روند گسترش شعله را به تأخیر انداخته یا یکپارچگی سازه را برای مدتی حفظ کند و بدین ترتیب زمان ارزشمندی را برای اجرای اقدامات ایمنی و اطفای حریق فراهم سازد. از این رو، نه تنها ثبت و تحلیل این فجایع، بلکه تبدیل درس‌های آن‌ها به دستورالعمل‌های فنی و اجرایی برای حفاظت غیرفعال، ضرورتی جدی است. در ادامه موضوع بازدارندگی آتش در فرآورده‌های چوبی و فلزی، بر اساس آنچه در منابع علمی آمده است، مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲ تمایز پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش

یکی از موضوعات همواره بحث‌برانگیز در زمینه مهار آتش، تمایز قائل شدن میان پوشش‌های ضدحریق و پوشش‌های مقاوم در برابر آتش است. اگرچه این دو اصطلاح گاه به جای یکدیگر به کار می‌روند، اما کاربرد و سازوکار عملکرد آن‌ها در مراحل

مختلف حریق تفاوت اساسی دارد. شکل ۱ سیر تحول آتش در محفظه‌ای بسته را نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که هر دسته از پوشش‌ها در کدام بازه زمانی بیشترین نقش را ایفا می‌کنند [۲]. پیش از وقوع پدیده فلش‌اور (اشتعال همگانی در محوطه)، ویژگی‌های ذاتی مواد نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت‌یابی آتش دارند. در این مرحله، پوشش‌های ضدحریق هستند که با تأثیر بر عواملی چون زمان اشتعال، نرخ گسترش شعله، میزان آزادسازی گرما، شدت تولید دود و غلظت گازهای سمی، واکنش ماده در برابر حریق را مهار یا تعدیل می‌کنند. در مقابل، پس از عبور از نقطه فلش‌اور و ورود به فاز آتش کاملاً توسعه‌یافته، حفاظت از سازه در برابر فروپاشی بر عهده پوشش‌های مقاوم در برابر آتش است. آتش‌سوزی‌های پس از فلش‌اور که دمایی بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند، برای یکپارچگی سازه‌ها بسیار مخاطره‌آمیز تلقی می‌شوند [۳]. به عبارت دیگر، پوشش‌های ضدحریق عمدتاً به منظور مدیریت واکنش مواد در برابر آتش طراحی شده‌اند و کاربرد اصلی آن‌ها بر روی مواد قابل اشتعال نظیر چوب، اسفنج، منسوجات، کابل‌های برق و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف است. هدف این پوشش‌ها، کندکردن فرایند احتراق یا جلوگیری از اشتعال این مواد است. در مقابل، پوشش‌های مقاوم در برابر آتش (یا محافظ در برابر آتش) برای تأمین مقاومت ذاتی سازه در برابر حریق به کار می‌روند و عمدتاً از مواد غیرقابل اشتعال در برابر حرارت شدید محافظت می‌کنند. ارزیابی عملکرد هر یک از این دو دسته، مستلزم به‌کارگیری عوامل آزمایشی متفاوتی است. برای مواد قابل اشتعال، شاخص‌هایی چون حد اکسیژن مورد نیاز برای احتراق، سرعت گسترش شعله در سطح، مدت زمان تأخیر در اشتعال، شدت حرارت خروجی، مقدار دود تولیدشده و غلظت گازهای سمی مورد سنجش قرار می‌گیرند. در حالی که برای مواد غیرقابل اشتعال، سه معیار عایق‌بودن حرارتی، حفظ یکپارچگی فیزیکی و ظرفیت باربری در برابر حرارت از اولویت بالاتری برخوردارند.



شکل ۱ مراحل توسعه آتش در محفظه بسته [۲].

قابل اشتعال طراحی می‌شوند. این پوشش‌ها بر اساس نقشی که در تشدید آتش و دود ایفا نمی‌کنند، در کلاس‌های A، B یا C رده‌بندی می‌شوند. نرخ گسترش شعله در این پوشش‌ها تابعی از نوع زیرلایه و ضخامت لایه خشک است. در مقابل، پوشش‌های منبسط‌شونده در اثر حرارت دچار تورم شده و لایه زغالی چندسلولی پدید می‌آورند. این لایه زغالی به‌عنوان سد عایق، انتقال حرارت و جرم میان فاز متراکم و فاز بخار را کند می‌کند و ضخامت آن می‌تواند تا ۵۰ برابر ضخامت اولیه پوشش افزایش یابد. پوشش‌های ضدحریق در دو نوع رنگی و لاک شفاف در بازار عرضه می‌شوند و بسته به زیرلایه هدف، واکنش متفاوتی در برابر آتش نشان می‌دهند. حوزه‌های کاربرد این پوشش‌ها شامل صنعت ساخت‌وساز، حمل‌ونقل، پوشش دیوار و سقف و سایر زمینه‌هایی است که محصولات باید الزامات کلاس‌های ایمنی در برابر آتش را برآورده کنند.

فرایند احتراق پوشش‌های سطحی عموماً از طریق سازوکار رادیکال آزاد توصیف می‌شود، که در آن رادیکال‌های H[•] و OH[•] به عنوان حامل‌های زنجیره در واکنش‌های ناحیه شعله شرکت می‌کنند. عملکرد پوشش‌های ضدحریق در حفاظت از زیرلایه، به سازوکار مواد بازدارنده شعله وابسته است [۶]. برای نمونه، فرمول‌بندی‌های حاوی ترکیبات هالوژنه عمدتاً در فاز گازی اثر می‌کنند. این ترکیبات با تشکیل یک لایه بخار هالوژن در ناحیه شعله، تولید رادیکال‌های آزاد بسیار واکنش‌پذیر را مختل کرده، روند انتشار شعله را متوقف می‌سازند. اما اشکال اساسی این ترکیبات، آزادسازی گازهای سمی و خوردنده در هنگام سوختن و در نتیجه نایمنی زیست‌محیطی آن‌هاست. در سوی دیگر، بازدارنده‌های شعله فسفردار بسته به نوع ترکیب و چسب پلیمری، سازوکار متفاوتی دارند. این مواد اغلب در فاز متراکم عمل کرده، لایه زغالی محافظی پدید می‌آورند که سدی فیزیکی در برابر انتقال حرارت از شعله به زیرلایه و انتشار گازها ایجاد می‌کند. همچنین برخی از ترکیبات فسفردار در فاز بخار نیز مؤثرند و می‌توانند رادیکال‌های پرنرژی شعله را مهار کنند. بازدارنده‌های شعله منبسط‌شونده از سه جزء اصلی تشکیل شده‌اند: منبع اسید، منبع کربن (زغال‌ساز) و منبع گاز (عامل دمنده). گاهی هر سه نقش در یک ترکیب واحد جمع می‌شود. سازوکار این پوشش‌ها بدین صورت است که در دمای بالا، واکنش تجزیه گرماگیر رخ داده، پوشش متورم می‌شود و لایه زغالی بسیار متخلخل، ضخیم و پایدار با رسانایی حرارتی بسیار پایین (عایق حرارتی) پدید می‌آید. سایر بازدارنده‌های شعله مانند اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی نیز از طریق خنک‌سازی (با آزادسازی آب)، رقیق‌سازی یا حذف سوخت‌های قابل

همچنین انتخاب روش آزمون مناسب به نوع ماده، کاربرد نهایی و حتی منطقه جغرافیایی و استانداردهای ملی حاکم بر آن کشور بستگی دارد؛ از این رو استانداردهای آزمایش برای پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش در نقاط مختلف جهان یکسان نیست.

۳ پوشش‌های ضدحریق

پوشش‌های آلی متداول به‌طور ذاتی قابلیت اشتعال بالایی دارند و در معرض حرارت، ضمن ذوب شدن و چکیدن، می‌توانند آسیب قابل‌توجهی به زیرلایه وارد آورند. از این رو، انتظار می‌رود پوششی که به‌منظور حفاظت در برابر آتش فرموله می‌شود، نه تنها سوخت قابل‌توجهی به آتش نیفزاید، بلکه هم‌زمان گسترش شعله و تولید دود را نیز محدود کند. پوشش‌های ضدحریق از دیرباز به عنوان یکی از ساده‌ترین، قدیمی‌ترین و کارآمدترین روش‌ها برای محافظت از مواد در برابر حریق شناخته شده‌اند. مزیت این رویکرد در آن است که بدون ایجاد تغییر شیمیایی در زیرلایه، صرفاً با تشکیل لایه محافظ، شار حرارتی ورودی به زیرلایه را تغییر داده، فرایند تخریب حرارتی، اشتعال یا احتراق را به تأخیر می‌اندازد یا مهار می‌کند [۴]. پوشش ضدحریق ایده‌آل باید معیارهایی چون گسترش شعله حداقلی، تولید ناچیز دود و گازهای سمی، سهولت در اجرا، مقاومت سایشی مطلوب، چسبندگی کافی به زیرلایه و هزینه اقتصادی را برآورده سازد. فرمول‌بندی‌های سنتی این پوشش‌ها غالباً بر پایه آلکیدی‌های کلردار، رزین‌های اپوکسی برومینه همراه با هیدروکسید آلومینیوم، یا ترکیبی از پارافین کلردار و اکسید آنتیموان تهیه می‌شوند. با این حال، در بازار امروز، طیف گسترده‌ای از مواد بازدارنده شعله به دو شکل افزودنی و واکنشی و در دسته‌های مختلف (هالوژنه، فسفردار، نیتروژنه، معدنی، اکسیدی، منبسط‌شونده و نانوپرکننده‌ها) در دسترس است که می‌توان آن‌ها را در فرمول‌بندی پوشش به کار برد. انتخاب نوع بازدارنده شعله بسته به چسب پلیمری مورد استفاده در پوشش و کاربرد نهایی آن قابل سفارشی‌سازی است. پوشش‌های ضدحریق از نظر ظاهری مشابه رنگ‌های معماری بوده و اغلب به شکل حلالی عرضه می‌شوند و با روش‌های رایجی همچون قلم‌مو، غلتک یا پاشش قابل اجرا هستند. بر اساس رفتار در هنگام حرارت‌دیدگی، پوشش‌های ضدحریق به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: پوشش‌های غیرمنبسط‌شونده و پوشش‌های منبسط‌شونده [۵]. دسته نخست عمدتاً جنبه تزئینی - معماری دارند و با دارا بودن افزودنی‌های بازدارنده شعله، برای کاهش نرخ گسترش شعله و میزان تولید دود در زیرلایه‌های

اشتعال و اکسیژن عمل می‌کنند.

۴ ارزیابی قابلیت بازدارندگی آتش در مواد قابل اشتعال

مواد قابل اشتعال به‌طور ذاتی مستعد آتش‌گیری سریع هستند و در مرحله پیش از فلش‌اور، نرخ رشد و گسترش شعله در آن‌ها چشمگیر است. مدت زمان وقوع فلش‌اور، چه در عرض چند ثانیه و چه به‌تدریج، مستقیماً به سرعت رشد آتش بستگی دارد. در میان طیف گسترده مواد قابل اشتعال مورد استفاده در صنعت ساختمان، چوب پرمصرف‌ترین است و پس از آن پلیمرها (شامل پلاستیک‌ها و لاستیک‌ها)، اسفنج‌ها، منسوجات، کابل‌ها و کامپوزیت‌های تقویت‌شده قرار دارند. برای محدود کردن رشد و گسترش آتش در چوب، سه روش اصلی به کار می‌رود: کاربرد لاک‌ها و رنگ‌های شفاف، استفاده از پوشش‌های واکنشی منبسط‌شونده رنگی و اشباع سطحی چوب با مواد بازدارنده. در نظام طبقه‌بندی اروپایی (Euro-Class)، ارزیابی واکنش مواد در برابر آتش بر پایه شاخصی به نام نرخ رشد آتش (FIGRA) انجام می‌شود. این شاخص بیانگر زمانی است که ماده‌ای در آزمون مرجع استاندارد BS EN ۱۴۳۹۰ طول می‌کشد تا به نقطه فلش‌اور برسد. افزون بر این، روش‌های آزمون دیگری نیز برای تعیین درجه‌بندی اروپایی پوشش‌های ضدحریق کاربرد دارند: آزمون تک‌آیتم سوز (SBI) مطابق با BS EN ۱۳۸۲۳ (۲۰۰۲)، آزمون پنل تابشی برای پوشش‌های کف بر اساس EN ISO ۹۲۳۹-۱ (۲۰۰۲)، و همچنین آزمون شعله کوچک (BS EN ۱۱۹۲۵-۲، ۲۰۰۲) یا کالری‌متر بمبی (BS EN ISO ۱۷۱۶) [۷]. در بریتانیا، پیش از هماهنگ‌سازی با استانداردهای اروپایی، دو روش آزمون اصلی برای مواد قابل اشتعال مورد استفاده قرار می‌گرفت: آزمون انتشار آتش (BS۴۷۶، بخش ۶، ۱۹۸۹) و آزمون گسترش سطح شعله (BS۴۷۶، بخش ۷، ۱۹۸۷). روش نخست برای سنجش سهم نسبی محصول در تشدید آتش طراحی شده است و نتیجه آن به‌صورت شاخص انتشار آتش (I) همراه با سه زیرشاخص a1، i2 و i3 گزارش می‌شود. هر چه مقدار این شاخص بالاتر باشد، نقش آن ماده در رشد و شدت‌یابی آتش بیشتر است. روش دوم گسترش جانبی شعله را در امتداد سطح نمونه اندازه‌گیری می‌کند؛ نمونه در زاویه قائم نسبت به پنل تابشی با شدت بالا نصب می‌شود. بر اساس میزان و نرخ گسترش شعله، نمونه در یکی از دسته‌های ۱ تا ۴ جای می‌گیرد که دسته ۱ مطلوب‌ترین و دسته ۴ نامطلوب‌ترین وضعیت را نشان می‌دهد. در ایالات متحده و بسیاری از استانداردهای بین‌المللی، روش‌های ASTM E84 (نسخه ۲۰۱۰) و ISO5660

بیشترین کاربرد را برای آزمون مواد قابل اشتعال دارند. عملکرد سامانه پوشش ضدحریق به عوامل متعددی وابسته است که از آن جمله می‌توان به ضخامت لایه پوشش، چگالی آن، نوع زیرلایه، ساختار کامپوزیت و جنس پنل اشاره کرد. برای هر محصول جدید، لازم است نمونه‌های معرف تحت آزمون قرار گیرند تا تأثیر هر یک از این عوامل متغیر به‌درستی لحاظ شده و ارزیابی جامعی از رفتار ماده در برابر آتش به‌دست آید.

۵ چوب به‌عنوان زیرلایه قابل اشتعال

چوب از دیرباز به‌دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی چون سازگاری با محیط زیست، زیبایی طبیعی، تجدیدپذیری و انعطاف‌پذیری در کاربردهای مختلف، یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی و تزئینی به‌شمار می‌رود. این ماده بر اساس ساختار تشریحی خود به دو دسته کلی چوب‌های سخت و نرم طبقه‌بندی می‌شود که از نظر درصد ترکیبات سه‌گانه سلولز، همی‌سلولز و لیگنین با یکدیگر تفاوت دارند. طیف وسیعی از فرآورده‌های چوبی از جمله پنل‌های مبتنی بر چوب جامد (مانند تخته خرده‌چوب، تخته سخت، تخته فیبر و تخته سه‌لا)، الوارهای سازه‌ای، الوارهای چندلایه چسبی، روکش‌ها و کفپوش‌های چوبی، به‌طور گسترده در ساخت‌وساز، کف‌پوش‌ها و مبلمان منازل، مدارس و ادارات سراسر جهان به کار می‌روند. با وجود این مزایا، چوب کاستی‌های اساسی نیز دارد که از آن جمله می‌توان به قابلیت اشتعال بالا، پایداری ابعادی ضعیف (تغییر شکل در برابر رطوبت و دما) و مقاومت کم در برابر عوامل زیستی مخرب اشاره کرد. این نواقص زمانی که چوب به‌عنوان ماده سازه‌ای به کار می‌رود، باید مورد توجه ویژه قرار گیرند. به‌دلیل اشتعال‌پذیری بالای چوب و نقشی که در تغذیه آتش به‌عنوان سوخت ایفا می‌کند، این ماده در رده مصالح ضعیف از نظر ایمنی در برابر حریق طبقه‌بندی می‌شود. احتراق شعله‌ور چوب عمدتاً توسط سلولز موجود در دیواره سلولزی آن پشتیبانی می‌شود [۸]. در چوب تیمار شده با مواد بازدارنده شعله، پنج سازوکار اصلی برای مهار آتش شناسایی شده است: نخست، تسریع فرایند آب‌زدایی و کربن‌دار کردن سطح که منجر به ایجاد لایه عایق حرارتی می‌شود؛ دوم، اعمال اصلاحات شیمیایی در مسیر گرماکافت چوب؛ سوم، جذب گرمای محیط از طریق واکنش‌های گرماگیر؛ چهارم، مهار احتراق شعله‌ور در فاز گازی؛ و پنجم، افزایش رسانایی حرارتی چوب به‌منظور دفع سریع‌تر گرما از سطح [۹]. اعمال تیمار بازدارندگی معمولاً یا از طریق پوشش سطحی با روش‌های رنگ‌آمیزی، پاشش یا غوطه‌وری انجام می‌شود یا با بهره‌گیری از روش خلأ تحت فشار یا

تیمار پلاسما، مواد بازدارنده به عمق ساختار چوب نفوذ داده می‌شوند [۱۰]. در هر دو حالت، هدف جلوگیری از اشتعال و مهار گسترش شعله است. نکته قابل توجه آنکه سه جزء اصلی چوب بازه‌های دمایی متفاوتی برای تجزیه دارند: همی سلولز در گستره ۲۰۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد، سلولز در گستره ۲۴۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و لیگنین در گستره ۲۸۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شوند. در اثر حرارت، چوب دچار تخریب و احتراق شده و محصولاتی چون گازهای فرار، قیرها (از جمله لووگلوکوزان) و زغال کربنی تولید می‌کند. مطالعات گسترده‌ای بر روی رفتار آتش‌سوزی فرآورده‌های چوبی و روش‌های آزمون آن انجام شده است. بازدارنده‌های شعله سنتی مانند ترکیبات بور، اسیدهای معدنی و نمک‌های معدنی (از جمله فسفات مونوآمونیم، فسفات دی‌آمونیم، فسفات گوانیل‌اوره، فسفات گوانیدین، پلی‌فسفات آمونیم و فسفات ملامین) می‌توانند خواص ضدحریق چوب را به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشند. با این حال، با افزایش آگاهی‌های زیست‌محیطی و نگرانی‌های مرتبط با ایمنی مصرف‌کننده، تمایل به استفاده از سامانه‌های مبتنی بر بور و فرمالدئید رو به کاهش است. نمک‌های معدنی نیز اگرچه مؤثرند، اما می‌توانند عوارض جانبی نظیر افزایش رطوبت‌پذیری، کاهش استحکام (و در نتیجه بی‌ثباتی ابعادی)، تخریب تدریجی چوب، خوردگی اتصال‌دهنده‌های فلزی، مشکلات چسبندگی و افزایش سایش را به همراه داشته باشند. در شرایط کنونی، بازدارنده‌های شعله مبتنی بر فسفر، نیتروژن، سیلیکون و افزودنی‌های زغال‌ساز، همچنان راهکارهای برجسته و امیدوارکننده‌ای برای حل معضل اشتعال‌پذیری چوب و نیز رعایت ملاحظات زیست‌محیطی به‌شمار می‌روند [۱۱]. کالری متر مخروطی رایج‌ترین روش آزمایشگاهی در مقیاس کوچک برای ارزیابی اشتعال‌پذیری چوب است. در مطالعه‌ای، شی و چو عملکرد منوکسیدکربن شش گونه چوب را تحت شرایط حرارتی خارجی متفاوت و با رطوبت‌های گوناگون و در شرایط اشتعال خودبه‌خودی در کالری متر مخروطی بررسی کردند. اشتعال خودبه‌خودی پدیده‌ای پیچیده است که در آن ماده قابل اشتعال بدون حضور جرقه یا شعله خارجی و صرفاً بر اثر گرمایش داخلی مشتعل می‌شود. این نوع اشتعال در مقایسه با اشتعال با جرقه، شباهت بیشتری به روند واقعی آتش‌سوزی دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که ضخامت چوب تأثیر اندکی بر حداکثر نرخ انتشار منوکسیدکربن دارد، اما زمان رسیدن به این حداکثر با افزایش ضخامت به تأخیر می‌افتد. همچنین با افزایش شار حرارتی خارجی، حداکثر نرخ انتشار CO کاهش می‌یابد، هرچند این کاهش در گستره ۵۰ تا ۷۵

کیلووات بر مترمربع چندان چشمگیر نیست. میانگین بازده CO نیز با شار حرارتی خارجی، ضخامت و چگالی رابطه معکوس نشان داد. محققان نتیجه گرفتند که هم شعله و هم رطوبت موجود در چوب می‌توانند نرخ انتشار CO را کاهش دهند، چراکه انرژی مصرف‌شده برای تبخیر آب با افزایش رطوبت بیشتر می‌شود. در پژوهشی دیگر، اثر شار حرارتی متغیر و غلظت‌های مختلف اکسیژن (۲۰/۹، ۱۸، ۱۶ و ۱۵ درصد) بر زمان اشتعال و نرخ کاهش جرم چوب مورد بررسی قرار گرفت تا عوامل جنبشی نظیر انرژی فعال‌سازی و ضریب فرکانس استخراج شوند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش غلظت اکسیژن، نرخ کاهش جرم افزایش می‌یابد، اما زمان اشتعال، انرژی فعال‌سازی و ضریب فرکانس کاهش می‌یابند. در نهایت، شار حرارتی بحرانی مورد نیاز برای اشتعال طیف گسترده‌ای از محصولات چوبی بین ۱۰ تا ۱۳ کیلووات بر مترمربع برآورد شده است. چگالی، ضخامت و محتوای رطوبت از مهم‌ترین عوامل هستند که بر این خواص وابسته به ماده تأثیر می‌گذارند. در ارزیابی رفتار آتش‌گیری چوب، یکی از عوامل کلیدی که تعیین‌کننده میزان باقی‌مانده مقطع مقاوم پس از حریق است، نرخ پیشروی زغال‌شدگی در عمق ماده نام دارد. این نرخ که بر حسب واحد زمان سنجیده می‌شود، تابعی از عوامل متعددی نظیر گونه چوب، تراکم، رطوبت داخلی، نفوذپذیری، ترکیب شیمیایی و همچنین جهت الیاف نسبت به منبع حرارت است. برای نمونه، در چوب تیمارشده با مواد بازدارنده شعله، نرخ زغال‌شدگی با میزان شار حرارتی اعمال‌شده در کالری متر مخروطی رابطه‌ای مستقیم و خطی دارد، درحالی‌که با افزایش چگالی چوب، این نرخ کاهش می‌یابد [۱۲]. از نظر ساختاری، چوب زغال‌شده را می‌توان به دو ناحیه مجزا تقسیم کرد: نخست، لایه گرماکافت که منطقه فعال تخریب حرارتی و تشکیل زغال است و دوم، لایه زغالی که ناحیه‌ای از کربن ترک‌خورده و فاقد استحکام یا سفتی قابل ملاحظه است. مرز میان این دو ناحیه، خط زغال‌شدگی نامیده می‌شود و عمق زغال‌شدگی به‌عنوان فاصله میان سطح بیرونی قطعه چوبی و این خط تعریف می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که جبهه پیشروی لایه زغال عمدتاً در گستره دمایی ۲۸۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد [۱۲]. در پژوهشی تجربی، بایکیرچر و همکاران با استفاده از کالری متر مخروطی و آزمون کوره استاندارد ISO 834 (که منحنی زمانی-دمای آتش سلولزی را شبیه‌سازی می‌کند)، به بررسی تأثیر پوشش‌های منبسط‌شونده (در دو نوع شفاف و رنگی) بر نرخ زغال‌شدگی، کاهش جرم و تغییرات دمایی چوب نروژی پرداختند. یافته‌های این تحقیق نشان داد که اعمال پوشش منبسط‌شونده در مقایسه با نمونه

در مطالعه‌ای وزن‌سنجی حرارتی در اتمسفر هوا، نمونه‌های چوب تیمار شده با غلظت‌های مختلف DAP (تا ۲۰ درصد) و با نرخ‌های حرارتی ۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه، تجزیه سه‌مرحله‌ای (تجزیه چوب، فاز القا و اکسایش زغال) را نشان دادند. عوامل جنبشی برآورد شده مستقل از نرخ حرارت بودند اما با غلظت DAP تغییر می‌کردند، هرچند انرژی فعال‌سازی مراحل مختلف - به جز مرحله تجزیه سلولز - تقریباً ثابت باقی ماند [۱۳].

در پژوهشی دیگر، عملکرد آتش‌سوزی چوب داگلاس صنوبر تحت تیمار هم‌زمان با عصاره‌های طبیعی و مخلوط اسیدبوریک و بوراکس مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از این تیمار دوگانه، بهره‌مندی هم‌زمان از مقاومت زیستی عصاره‌های طبیعی و خاصیت بازدارندگی آتش بورات‌ها بود. نتایج نشان داد که هر دو نمونه چوب تیمار شده، عملکرد ضدحریق عالی از خود نشان می‌دهند [۱۴]. تومارک و کاودار نیز تأثیر پودر بور، مخلوط اسیدبوریک و بوراکس و بازدارنده شعله تجاری مبتنی بر مخلوط سنگ آهک و روغن سیلیکون را بر شاخص اکسیژن چوب کاج اسکاتلندی، هم در حالت تازه و هم پس از فرایند شستشو (برای سنجش پایداری تیمار)، بررسی کردند. شاخص اکسیژن حداقل درصد اکسیژن مورد نیاز برای ادامه احتراق شعله‌ور در شرایط آزمایشگاهی است. نمونه‌های چوب نخست با خلأ تیمار شده، سپس تحت شستشو قرار گرفتند. نتایج نشان داد که چوب تیمار شده با بازدارنده‌های شعله بیشترین مقدار شاخص اکسیژن را داراست و فرایند شستشو تغییر چندانی در آن ایجاد نمی‌کند. هرچند در نمونه‌های تیمار شده، مقدار شاخص اکسیژن تا حدودی تحت تأثیر شستشو قرار گرفت که به عدم اتصال شیمیایی مواد نگه‌دارنده به چوب نسبت داده شد (شکل ۳) [۱۵].

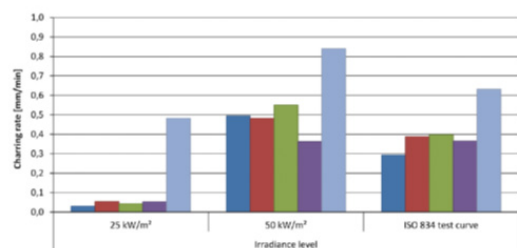
۶-۲ ترکیبات مبتنی بر فسفر

استفاده از ترکیبات حاوی نیتروژن و اسید فسفریک به‌عنوان بازدارنده شعله در تیمار چوب، موضوع پژوهش‌های متعددی بوده است. در این میان، روش تیمار نقشی تعیین‌کننده در کارایی نهایی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که تیمار با پرس حرارتی در مقایسه با روش خشک‌کردن حرارتی، خواص چوب را بهبود می‌بخشد. همچنین مقدار و واکنش‌پذیری عاملی بازدارنده‌های شعله در حضور فرمالدئید، برای نمونه در سامانه‌های دی‌سیانیدی آمید-فرمالدئید-اسید فسفریک یا ملامین-دی‌سیانیدی آمید-فرمالدئید-اسید فسفریک، بر کارایی ضدحریق می‌افزاید. آزادسازی گرماگیر آب در طی تراکم اسید فسفریک نیز با خنک‌کردن چوب و رقیق‌سازی گازهای گرماکافت فرار،

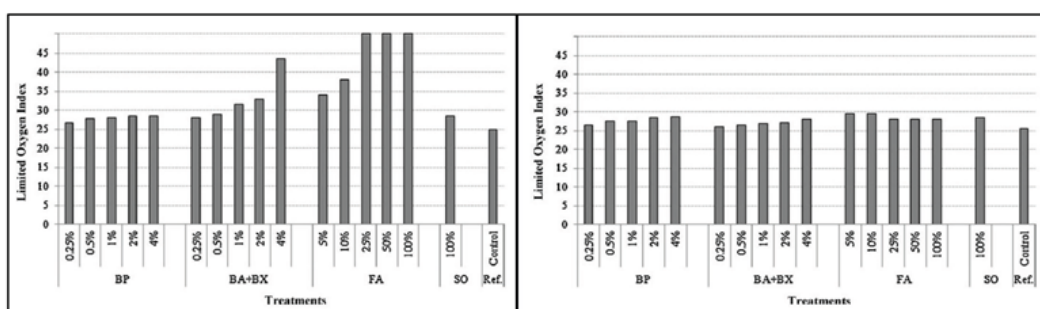
چوب بدون پوشش (مرجع)، در تمام سطوح تابش حرارتی و نیز در شرایط آتش سلولزی استاندارد، نرخ زغال‌شدگی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (شکل ۲). به عبارت دیگر، پوشش‌های منبسط‌شونده علاوه بر آنکه شروع فرایند زغال‌شدگی را به تأخیر می‌اندازند، سرعت پیشروی زغال در عمق چوب را نیز به میزان قابل توجهی پایین می‌آورند. این ویژگی در کاربردهای مهندسی و حفاظتی به‌ویژه برای افزایش زمان مقاومت سازه‌های چوبی در برابر آتش از اهمیت بالایی برخوردار است [۲].

۶ پوشش‌های بازدارنده شعله ۶-۱ ترکیبات بور

در میان ترکیبات مورد استفاده برای کاهش اشتعال‌پذیری چوب، بورات‌ها جایگاه ویژه‌ای دارند. اسید بوریک و بوراکس که هر دو در آب حل می‌شوند، پرمصرف‌ترین بازدارنده‌های شعله در فرآورده‌های چوبی محسوب می‌شوند. افزون بر خاصیت ضدحریق، فرمول‌بندی‌های حاوی بور به‌دلیل توانایی در افزایش مقاومت چوب در برابر حملات قارچی و حشرات، عمر مفید الوارها را نیز بهبود می‌بخشند. آثار و کشکین در پژوهشی، اثر اشباع چوب صنوبر اولوداغ با مخلوط اسیدبوریک و بوراکس (طبق استاندارد ASTM D1413-99 و با استفاده از فن خلأ) را بر قابلیت اشتعال آن بررسی کردند. ارزیابی اشتعال‌پذیری بر اساس استاندارد ASTM E160-50 نشان داد که اشباع با ترکیبات بور در مقایسه با نمونه‌های تنها لاک‌شده، کاهش چشمگیری در اشتعال‌پذیری ایجاد می‌کند. محققان نتیجه گرفتند که اعمال تیمار بور پیش از پوشش لاک، دمای احتراق را پایین آورده، ایمنی سازه چوبی را افزایش می‌دهد. در ادامه، آن‌ها تأثیر همین تیمار را بر خواص احتراقی الوارهای چندلایه ساخته شده از بلوط اروپایی و صنوبر لومباردی نیز مورد آزمون قرار دادند. در هر دو مورد، کمترین میزان احتراق در مجاورت منبع شعله در نمونه‌های تیمار شده با بور مشاهده شد که ناشی از برهم‌کنش مواد اشباع‌کننده با ساختار شیمیایی چوب است.



شکل ۲ نرخ زغال‌شدگی چوب پوشش‌داده شده با پوشش منبسط‌شونده و چوب بدون پوشش در معرض شرایط مختلف آزمون [۲].



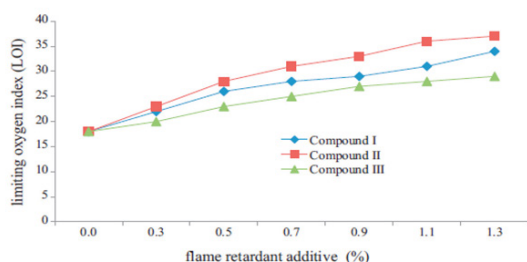
شکل ۳ شاخص اکسیژن (OI) چوب تیمار شده با بازدارنده شعله، قبل و پس از فرایند شستشو [۱۵].

زیرلایه را افزایش می‌دهد. رسوب سفید دی‌اکسید سیلیکونی که سطح زغال را می‌پوشاند، همچون سپری در برابر تابش حرارتی عمل کرده و نرخ اکسایش زغال را کاهش می‌دهد [۲۲]. در پژوهشی تجربی، گرکسا و لوبکه اثر چهار ماده هیدروکسید منیزیم، فسفات مونو آمونیوم، هیدروکسید آلومینیوم و اسیدبوریک را بر اشتعال پذیری تخته خرده چوب در کالری متر مخروطی با تابش خارجی ۵۰ کیلووات بر مربع مورد بررسی قرار دادند. ترکیب حاوی هیدروکسید منیزیم، فسفات مونو آمونیوم و اسیدبوریک در مقایسه با نمونه‌ای که در آن اسیدبوریک با هیدروکسید آلومینیوم جایگزین شده بود، نرخ آزادسازی حرارت و تولید دود کمتری از خود نشان داد. توضیح این پدیده آن است که فسفر و نیتروژن با هم‌افزایی، مسیر گرماکافت را به سمت تولید زغال و آب بیشتر و مواد فرار قابل اشتعال کمتر هدایت می‌کنند، در حالی که بور موجود ذوب شده و سدی شیشه‌مانند بر سطح چوب پدید می‌آورد که زغال را تثبیت کرده، مانع انتقال جرم می‌شود. همچنین بازدارنده‌های شعله منبسط‌شونده مبتنی بر گرافیت قابل انبساط، در مقایسه با پلی فسفات آمونیوم با همان میزان بارگذاری، نرخ آزادسازی حرارت و کاهش جرم کمتری را برای تخته خرده چوب به همراه داشتند. به‌طور کلی، بازدارنده‌هایی که قادر به تشکیل لایه زغالی هستند، تأثیر بسزایی در بازدارندگی شعله چوب دارند و وجود این لایه

به مهار آتش کمک می‌کند [۱۶]. در پژوهشی مشابه، سوبیاکتو و همکاران نشان دادند که ترکیب تیمار اسید فسفریک با پیش‌گرمایش و متراکم‌سازی سطح چوب، خواص ضدحریق را بهبود می‌بخشد. در این روش، رزین تری‌متیلول ملامین-فرمالدئید همراه با اسید فسفریک روی سطح چوب اعمال شده، سپس پیش‌گرمایش و در ادامه پرس گرم انجام می‌شود. اشباع تحت فشار پوشش، بدون آنکه استحکام خمشی چوب کاهش یابد، خاصیت ضدحریق آن را افزایش داد [۱۷]. همچنین نشان داده شد که فسفر و آمیدها هنگامی که به سلولز متصل می‌شوند، در مقایسه با تیمار با پنتاکسید فسفر یا آمین، بازده زغال را افزایش داده و نرخ کاهش وزن را کاهش می‌دهند [۱۸]. استیونس و همکاران با اصلاح خاک اره کاج با استفاده از ترکیبات آلکیل و فیل کلروفسفر در حضور پیریدین، موفق به کاهش ۹۰ درجه سانتی‌گرادی دمای بیشینه نرخ گرماکافت و افزایش ۲۹ درصدی تشکیل زغال شدند. فیل فسفات‌ها کارایی بیشتری نسبت به آنالوگ‌های آلکیل خود داشتند و ترتیب اثربخشی (فسفات < فسفونات < فسفینات) به اسیدیته و پایداری حرارتی نسبت داده شد [۱۹]. در مطالعه‌ای دیگر، اشباع چوب با بازدارنده شعله ارگانو فسفروس همراه با ماده نگه‌دارنده مبتنی بر مس، شاخص نرخ رشد آتش (FIGRA) را ۱۵ درصد دیگر کاهش داد [۲۰].

۶-۳ سامانه‌های پوشش حاوی بازدارنده‌های شعله هم‌افزا

در سال‌های اخیر، ترکیبات حاوی سیلیکون و فسفر و نیز مخلوط‌های سه‌جزئی سیلیکون، فسفر و نیتروژن، توجه گسترده‌ای در حوزه بازدارندگی آتش به خود جلب کرده‌اند. سازوکار هم‌افزایی در این سامانه‌ها حاصل جمع اثرات مجزای هر یک از اجزا است: فسفر با کاتالیز کردن واکنش‌های زغال‌سازی، زمینه را برای تشکیل لایه محافظ فراهم می‌کند؛ نیتروژن با آزادسازی گازهای غیرقابل احتراق، نقش رقیق‌کننده سوخت‌های فرار را ایفا می‌کند و سیلیکون با استقرار لایه محافظ بر روی زغال در حال شکل‌گیری، پایداری حرارتی



شکل ۴ شاخص اکسیژن (OI) چوب پوشش داده شده با لاک حاوی ترکیبات سیکلودی فسفازان [۲۱].

اکسیژن و کاهش فرارشدن سوخت، از تداوم چرخه احتراق نیز جلوگیری می‌کند. پدیده انبساط در نتیجه استفاده از سامانه‌های پوشش بازدارنده شعله روی چوب، می‌تواند تشکیل زغال و انباشت گرما را کاهش داده، زمان شروع احتراق را به تأخیر اندازد [27]. گاردنر و تامسون در پژوهشی، اشتعال‌پذیری فراورده‌های جنگلی شامل تخته‌های اره‌شده، تخته سه‌لا، تخته سخت و تخته خرده چوب را مطابق با استاندارد ASTM E906 (روش آزمون نرخ آزادسازی حرارت و دود مرئی) مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، از بازدارنده شعله منبسط‌شونده برای تیمار تخته سه‌لا به روش اشباع تحت فشار استفاده شد. یافته‌ها نشان داد که در نمونه‌های تخته اره‌شده تیمار شده، زمان اشتعال با افزایش چگالی تغییر نکرد (زیرا شارهای حرارتی ۲۰ و ۴۰ کیلووات بر متر مربع اعمال شده بودند). اما در تخته سه‌لا، اشباع تحت فشار با بازدارنده شعله، زمان اشتعال را افزایش داد. همچنین پوشش‌های بازدارنده شعله، خواص آزادسازی حرارت هر دو نوع نمونه را کاهش دادند، هرچند میزان این کاهش به شار حرارتی اعمالی وابسته بود [28]. چو و همکاران نیز تأثیر پودر گرافیت مصنوعی، ماده‌ای معدنی به نام سریسیت و مخلوط این دو را بر روی تخته سه‌لا بررسی کردند. فرمول‌بندی پوشش منبسط‌شونده شامل ۱۹/۸ درصد بازدارنده شعله، ۱۵ درصد عامل آب‌زدایی، ۱۸ درصد عامل کف‌ساز، ۷/۲ درصد چسب رزین و ۴۰ درصد حلال بود. نتایج نشان داد که اگر نسبت سریسیت در ترکیب بازدارنده آتش از ۷۵ درصد فراتر رود، مخلوط حاصله کمترین درجه اشتعال‌پذیری ممکن را بر اساس استاندارد تایوان CNS 7614 به دست می‌آورد. نکته جالب آنکه برای کارایی سریسیت در مهار احتراق، وجود عوامل کربنی‌کننده مانند گرافیت ضرورتی ندارد [29].

رفتار سوختن تخته کتان پوشش داده‌شده با پوشش منبسط‌شونده نیز با استفاده از کالری‌متر مخروطی و آزمون تک‌آیتم سوز (SBI) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که این پوشش‌ها به‌طور قابل‌توجهی زمان اشتعال را افزایش داده، نرخ

زغالی، عملکرد ماده را در مواجهه با گرمای خارجی به‌طور چشم‌گیری نسبت به حالتی که چنین لایه‌ای وجود ندارد، تغییر می‌دهد. محققان نتیجه گرفتند که سامانه‌های بازدارنده شعله منبسط‌شونده پتانسیل لازم برای بهبود واکنش چوب در برابر آتش را دارا هستند [23].

کربنات‌ها و بی‌کربنات‌ها به‌عنوان بازدارنده‌های شعله با کارایی بسیار بالا در فاز گازی شناخته می‌شوند. کربنات پتاسیم که دمای تجزیه نسبتاً بالایی (۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) دارد، به‌عنوان کاتالیزور آب‌زدایی چوب عمل کرده، تولید زغال، آب و دی‌اکسیدکربن را افزایش می‌دهد. با این حال، این ترکیب به‌ویژه در غلظت‌های بالا نمی‌تواند به‌طور مؤثر از بسپارزدایی چوب جلوگیری کند و همچنین باعث تولید منوکسیدکربن می‌شود. از این رو، کربنات پتاسیم تنها در غلظت‌های پایین به کار می‌رود [24]. تأثیر نمک‌های معدنی مختلفی چون Na_2WO_4 ، Na_2SnO_3 و Na_2MoO_4 بر تجزیه حرارتی و خواص ضدحریق چوب نیز مورد بررسی قرار گرفته است. تیمار با این نمک‌ها سبب افزایش شاخص اکسیژن نمونه‌های چوبی شد که ناشی از افزایش مقدار زغال تشکیل‌شده روی سطح بود. انرژی فعال‌سازی نمونه‌ها نیز در هر دو مرحله زغال‌سازی و کلسینه‌شدن پس از تیمار کاهش یافت. این بازدارنده‌ها با کاتالیز کردن واکنش آب‌زدایی، منجر به تولید بیشتر آب، دی‌اکسیدکربن و زغال و در مقابل کاهش بخارات قابل اشتعال مانند لووگلوکوزان و لووگلوکز شدند [25].

۷ پوشش‌های منبسط‌شونده (Intumescent)

پوشش‌های منبسط‌شونده، چه به شکل رنگی و چه به صورت شفاف، به‌عنوان یکی از کارآمدترین راهکارها برای بازدارندگی آتش در فراورده‌های چوبی معرفی شده‌اند. عملکرد این دسته از پوشش‌ها بدین صورت است که در مواجهه با حرارت، دچار تورم شده، به زغال تبدیل می‌شوند و اسفنجی کربنی پدید می‌آورند که سطح زیرین را در برابر آتش عایق می‌کند. این لایه زغالی افزون بر خاصیت عایق‌بودن، با محدود کردن نفوذ

جدول ۱ داده‌های کالری‌متر مخروطی برای تخته خاک اره [26].

نمونه	حداکثر نرخ آزادسازی گرما (kW/m^2)	زمان رسیدن به حداکثر HRR (ثانیه)	میانگین HRR (kW/m^2)	کل گرمای آزاد شده (MJ/m^2)	نرخ تولید دود (m^3/s)	مجموع دود تولیدی (m^3/m^2)	شاخص رشد آتش (kW/sm^2)
SB-APP	۱۲۲۰۰	۴۰	۲۹۰۲	۴۰۴	۳۱۰	۴۰۱	۵۰۳
SB-AP-P/5A	۱۲۴۰۸	۶۰	۲۴۰۵	۳۰۳	۲۲۹	۲۰۰	۳۰۱
SB-AP-P/5A	۵۰۰۱	۵۰	۸۰۵	۱۰۱	۲۱۵	۱۰۹	۱۰۴

آزادسازی حرارت تخته کتان را کاهش می‌دهند. همچنین تأیید شد که نتایج تجربی با پیش‌بینی‌های عددی مبتنی بر حل‌های تحلیلی برای مواد زغال‌شونده و نرخ سوختن در آزمون SBI، از جمله ضریب کسری و نسبت شار حرارتی در سطح مشترک پوشش منبسط‌شونده و لایه زغالی، همخوانی خوبی دارد. گرچه پوشش‌های منبسط‌شونده به‌طور معمول برای حفاظت از سازه‌های فولادی به کار می‌روند و کاربرد آن‌ها روی چوب نیز در برخی مطالعات و حتی محصولات تجاری دیده می‌شود، اما در حال حاضر استفاده گسترده از این پوشش‌ها برای حفاظت از فرآورده‌های چوبی و مبتنی بر چوب رواج نیافته است.

آزادسازی حرارت کمتری داشته، زمان رسیدن به این اوج را به تأخیر می‌اندازد. افزودن نانورس‌های اصلاح‌شده، بهبود بیشتری ایجاد کرد، اما نوع و مقدار نانورس نقشی تعیین‌کننده داشت. برای نمونه، ۳ درصد Cloisite 30B و ۵ درصد Cloisite 10A عملکرد بهتری نسبت به سایر سطوح بارگذاری نشان دادند. مطالعات طیف‌سنجی تأیید کرد که نانورس اصلاح‌شده، طول عمر ساختارهای زغالی فسفروکربنی را افزایش می‌دهد [۳۲]. در حوزه نانوپوشش‌های فلزی، رسانایی حرارتی بالای پوشش‌های حاوی نانونقره برای بهبود انتقال حرارت در چوب و افزایش بازدارندگی آتش مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که تیمار نانونقره قابلیت چشمگیری در بهبود برخی از خواص ضدحریق در محصولات چوب جامد دارد. به نظر می‌رسد این پوشش‌ها با کاهش انباشت گرما (که به سرعت منتقل می‌شود)، تخریب حرارتی و کربن‌دارکردن را به تأخیر می‌اندازند [۳۳]. نانولاستونیت نیز به‌عنوان افزودنی چندمنظوره در چوب معرفی شده است. گروه پژوهشی یادشده، کارایی نانوالیاف ولاستونیت را در بهبود دوام و خواص ضدحریق چوب صنوبر و کامپوزیت‌های چوب جامد گزارش کرده‌اند. اشباع چوب با ۱۰ درصد نانولاستونیت، هم خاصیت ضدحریق و هم پایداری ابعادی را افزایش داد. ولاستونیت به‌عنوان ماده معدنی، با ایجاد سدی فیزیکی غیرقابل نفوذ در برابر نفوذ شعله به ساختار چوب عمل می‌کند [۳۴]. در پژوهشی نوآورانه، نانوصفحات نیتريد بور شش‌ضلعی با استفاده از روش ساده لایه‌برداری فاز مایع با نیروی برشی سنتز شدند و به‌عنوان پوشش‌های چوبی بدون چسب و مقاوم در برابر اکسایش و آتش به‌کار رفتند. به‌دلیل نفوذپذیری و گسیل حرارتی بسیار پایین ذاتی این نانوصفحات، پوشش حاصل مقاومت استثنایی در برابر آتش و اکسایش تا دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد از خود نشان داد [۳۵].

۱۰ مطالعه موردی فرمول‌بندی بهینه پوشش منبسط‌شونده برای سازه‌های فولادی

مقاله وختیوا و همکاران [۳۶]، نمونه‌ای برجسته از پژوهشی است که این شکاف را پر کرده، پلی میان دانش نظری و تولید صنعتی ایجاد می‌کند. این مطالعه با هدف دستیابی به پوشش منبسط‌شونده‌ای طراحی شد که بتواند درجه مقاومت حریق R120 (حداقل ۱۲۰ دقیقه) را برای سازه‌های فولادی باربر تأمین کرده، در عین حال از نظر اقتصادی برای تولید انبوه نیز مقرون‌به‌صرفه باشد. تمایز اصلی این پژوهش نسبت به بسیاری از مطالعات مشابه، در رویکرد گام‌به‌گام و چندسطحی آن نهفته است. محققان مسیر خود را از آزمون‌های ساده آزمایشگاهی

آزادسازی حرارت تخته کتان را کاهش می‌دهند. همچنین تأیید شد که نتایج تجربی با پیش‌بینی‌های عددی مبتنی بر حل‌های تحلیلی برای مواد زغال‌شونده و نرخ سوختن در آزمون SBI، از جمله ضریب کسری و نسبت شار حرارتی در سطح مشترک پوشش منبسط‌شونده و لایه زغالی، همخوانی خوبی دارد. گرچه پوشش‌های منبسط‌شونده به‌طور معمول برای حفاظت از سازه‌های فولادی به کار می‌روند و کاربرد آن‌ها روی چوب نیز در برخی مطالعات و حتی محصولات تجاری دیده می‌شود، اما در حال حاضر استفاده گسترده از این پوشش‌ها برای حفاظت از فرآورده‌های چوبی و مبتنی بر چوب رواج نیافته است.

۹ پوشش‌های نانو کامپوزیتی

در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از نانوذرات در ساختار پوشش‌های ضدحریق، افق‌های جدیدی را در بهبود عملکرد این سامانه‌ها گشوده است. با این حال، چالش اصلی در کاربرد نانوذرات، دستیابی به پراکندگی یکنواخت آن‌ها در ماتریس پوشش است. اصلاح سطح نانوذرات، گامی ضروری برای افزایش سازگاری و حصول پراکندگی همگن به شمار می‌رود. یکی از مزایای مهم نانوپرکننده‌ها در مقایسه با هم‌تایان میکرونی خود، بارگذاری مورد نیاز بسیار پایین‌تر است که از منظر صنعتی و اقتصادی مزیتی بزرگ محسوب می‌شود. در تحقیقی، پودر نانورسی مرکب از مونت‌موریلونیت و نانوالیاف سلولز به‌عنوان پوشش ضدحریق شفاف برای چوب به کار گرفته شد. ارزیابی عملکرد آتش با کالری‌متر مخروطی در شار تابشی ۳۵ کیلووات بر متر مربع نشان داد که چوب پوشش‌داده‌شده با این نانوپودر، افزایش چشمگیری در زمان اشتعال داشته، کل حرارت آزادشده ۳۳ درصد و حداکثر میانگین نرخ انتشار حرارت ۴۶ درصد کاهش یافت. این بهبودها ناشی از عملکرد توأمان محافظ حرارتی و سد گازی است که تخریب حرارتی چوب و انتشار گازهای قابل اشتعال فرار را به تأخیر می‌اندازد [۳۰]. در پژوهشی دیگر، فوفا و همکاران اثر پوشش‌دهی چوب صنوبر با نانوذرات دی‌اکسیدتیتانیوم و/یا نانورس را بر واکنش به آتش و نفوذپذیری بخار آب بررسی کردند. نتایج کالری‌متر مخروطی در مقیاس کوچک حاکی از آن بود که این تیمارها نه‌تنها عملکرد واکنش به آتش را بهبود نمی‌بخشند، بلکه تأثیر منفی نیز بر جای می‌گذارند [۳۱]. چوانگ و همکاران به بررسی افزودن نانورس‌های تجاری (Cloisite 10A، Cloisite 30B و Cloisite 15A) در بارگذاری‌های ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد به پوشش منبسط‌شونده تخته سه‌لا پرداختند. نتایج کالری‌متر مخروطی نشان داد که پوشش منبسط‌شونده در مقایسه با تخته سه‌لا بدون پوشش، نرخ اوج

جدول ۲ اجزای تشکیل دهنده رنگ منبسط شونده و درصد هر یک [۳۶].

IFR	چسب پلیمری	APP	MA	PE	TiO ₂	افزودنی ها	لایه
پایه آبی	۱۰	۲۵	۸	۱۰	۱۲	۵	۳۰
پایه حلالی	۱۰	۲۶	۱۰	۱۰	۹	۳	۳۲

نظیر اندازه گیری ضریب انبساط حجمی در کوره با دمای ۳۴۰ درجه سانتی گراد، آزمون مشعل با دمای شعله ۹۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، تحلیل وزنسنجی حرارتی آغاز کردند. اما آنچه این تحقیق را از بسیاری کارهای مشابه متمایز می کند، اعتبارسنجی نهایی یافته ها از طریق آزمون های آتش در مقیاس کامل، مطابق با استانداردهای ملی (DSTU B V.1.1-14:2007) و (DSTU B V.1.1-13:2007) است که با استانداردهای اروپایی EN 1365-4:1999 و EN 1365-3:1999 هم خوانی دارد. در این آزمون ها، ستون ها و تیرهای فولادی I شکل با سطح مقطع مشخص (ضریب مقطع میان ۴/۲ تا ۶/۴ میلی متر) در معرض منحنی زمانی-دمای استاندارد سلولز (مطابق با ISO 834) قرار گرفتند و نقطه حدی نهایی بر اساس رسیدن دمای میانگین فولاد به ۵۰۰ درجه سانتی گراد تعریف شد [۳۶]. نخستین و شاید بنیادین ترین یافته این پژوهش، بازتعریف نقش چسب پلیمری

در سامانه منبسط شونده است. در نگاه سنتی، چسب تنها عاملی برای فیلم سازی و تأمین چسبندگی تلقی می شود، اما وختی و همکاران به روشنی نشان دادند که چسب پلیمری در واقع چهارمین جزء جدایی ناپذیر سامانه بازدارنده شعله محسوب می شود و مستقیماً بر دمای تخریب، گرانیروی مذاب، یکنواختی لایه زغالی و در نهایت مقاومت حریق تأثیر می گذارد. برای اثبات این ادعا، هشت نوع چسب مختلف (چهار نوع پایه آبی و چهار نوع پایه حلال) در فرمول بندی ثابت و با ضخامت یکسان (۱/۵±۰/۱۵ میلی متر) با یکدیگر مقایسه شدند (جدول ۲ و ۳) [۳۶]. نتایج این مقایسه تفاوت های چشم گیری را آشکار ساخت. پوشش هایی که از کوپلیمرهای وینیل استات غیرهالوژنه (مانند EZ 3010 و EZ 3112) استفاده کرده بودند، لایه زغالی متراکم، یکنواخت و با چسبندگی بالا به فولاد ایجاد کردند. ریشه این عملکرد برتر را باید در سازوکار تخریب دومرحله ای این پلیمرها جستجو کرد: نخست فرایند استیل زدایی در گستره ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد و سپس شکست زنجیره های پلی انی در گستره ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد (شکل ۵). این تخریب تدریجی به تشکیل زغالی با پایداری حرارتی تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد منجر می شود. در سوی دیگر، پوشش های حاوی استایرن آکریلات ها (چون AC80 در پایه حلال و H211 در پایه آب) با مشکل جدی ذوب و چکیدن در سطوح عمودی مواجه بودند و لایه زغالی سبک، اسفنجی و ناپایداری تولید می کردند. تخریب یک مرحله ای این پلیمرها در گستره ۳۴۰

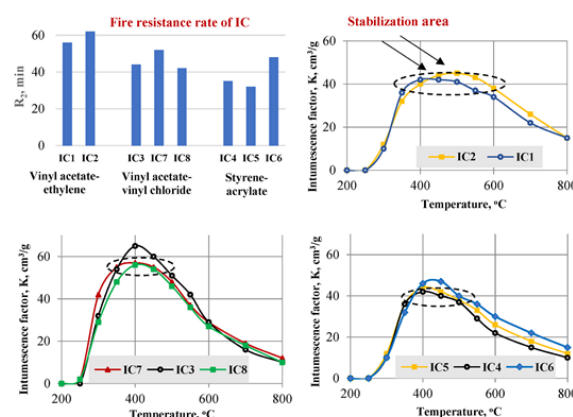
جدول ۳ نتایج مطالعه ویژگی های بازدارندگی آتش برای نمونه های پوشش منبسط شونده [۳۶].

T _d	K ₂	R ₂ دقیقه	K ₂ cm ³ /g	R ₂ دقیقه	K ₂ cm ³ /g	پلیمر	پوشش ضد حریق
پایه آبی							
۲۴۹	۴۲	۵۶	۳۸	۳۵	۴۲	EZ 3010	IC1
۲۵۶	۴۶	۶۲	۴۰	۴۱	۴۵	EZ 3112	IC2
۲۱۱	۲۳	۴۴	۲۴	۳۰	۶۴	CEZ 3031	IC3
۲۳۱	۲۱	۳۵	۱۸	۲۸	۳۵	H211	IC4
پایه حلالی							
۲۰۷	۵	۳۲	۱۵	۲۳	۴۰	AC80	IC5
۲۲۹	۳۴	۴۸	۲۵	۳۶	۴۳	AC80+AC4	IC6
۲۰۰	۳۸	۵۲	۴۶	۴۱	۵۶	VAGH	IC7
۲۰۸	۳۰	۴۴	۲۶	۳۷	۶۲	VYHH	IC8

کمتری (حدود ۳۵ تا ۴۰ سانتی‌متر مکعب بر گرم) نشان می‌دهد، پایداری حرارتی زغال را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (جدول ۴ و ۵). داده‌های تحلیل TGA این ادعا را تأیید می‌کند (جدول ۶ و شکل ۶). برای فرمول‌بندی با نسبت ۲:۱:۱، دمای تخریب ۶۰ درصد جرم (T60٪) حدود ۴۵۸ درجه سانتی‌گراد ثبت شد، در حالی که این دما برای نسبت ۳/۵:۱:۱/۵ به ۵۹۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت (تفاوتی به میزان ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد). همچنین جرم باقی‌مانده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد برای نسبت ۳/۵:۱:۱/۵ حدود ۳۰ تا ۳۷ درصد بود، در حالی که برای نسبت ۲:۱:۱ به ۲۴ تا ۲۸ درصد کاهش می‌یافت. بنابراین، برای تأمین R60 و بالاتر در ضخامت ۱/۶ تا ۱/۸ میلی‌متر، نسبت ۳/۵:۱:۱/۵ ضروری تشخیص داده شد. محققان همچنین تأکید می‌کنند که برای دستیابی به R120، ضخامت خشک پوشش باید از ۳/۵ میلی‌متر فراتر رود و نسبت اجزا نیز در همان محدوده ۳/۵:۱:۱/۵ حفظ شود. افزون بر این، محتوای بهینه چسب پلیمری در سامانه (صرف نظر از نوع)

جدول ۴ ترکیب (درصد وزنی) و مقاومت در برابر آتش برای نمونه‌های مختلف پوشش منبسط‌شونده مورد مطالعه [۳۶].

پوشش ضدحریق	APP	MA	PE	TiO ₂	R _p دقیقه
IC2-1	۱۲	۱۹	۱۹	۱۲	۲۱
IC2-2	۱۹	۱۶	۱۶	۱۰	۳۱
IC2-3	۳۳	۱۱	۱۴	۸	۳۷
IC2-4	۴۲	۱۱	۱۲	۷	۳۴
IC2-5	۴۹	۱۰	۱۰	۷	۲۵
IC3-1	۳۸	۹	۶	۹	۳۷
IC3-2	۳۵	۹	۱۲	۹	۴۱
IC3-3	۳۳	۸	۱۷	۹	۳۶
IC3-4	۳۱	۸	۲۱	۸	۳۱
IC3-5	۳۰	۸	۲۵	۷	۲۶
IC4-1	۳۸	۶	۹	۹	۳۵
IC4-2	۳۵	۱۰	۱۱	۸	۳۸
IC4-3	۳۵	۱۲	۹	۹	۳۱
IC4-4	۳۲	۲۱	۸	۷	۲۶
IC4-5	۳۰	۲۵	۸	۷	۲۲

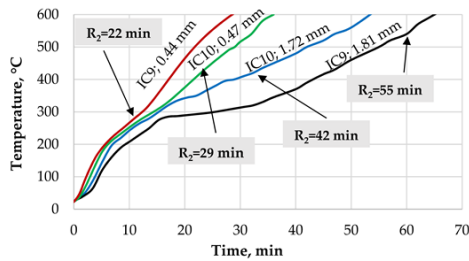


شکل ۵ ضریب انبساط K (سانتی‌متر مکعب بر گرم) بر حسب دمای T (درجه سانتی‌گراد) برای ترکیبات منبسط‌شونده مورد مطالعه [۳۶].

تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد و زغال حاصل در دماهای بالای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به سرعت اکسید شده، فرو می‌پاشد. پوشش‌های حاوی وینیل‌استات‌های هالوژنه نیز اگرچه بالاترین ضریب انبساط را نشان دادند، اما لایه زغالی شکننده با حفره‌های درشت و نواحی سوختگی موضعی داشتند و به‌دلیل آزادسازی گازهای سمی و خورنده (از جمله HCl) برای کاربردهای صنعتی مدرن قابل قبول نبودند [۳۶].

بر پایه این یافته‌ها، محققان راهنمای عملی ساده اما حیاتی ارائه می‌دهند: برای دستیابی به مقاومت حریق در دسته R30 (۳۰ دقیقه)، استفاده از استایرن‌آکریلات‌ها با ضخامت ۰/۴ تا ۰/۵ میلی‌متر کافی و اقتصادی است، اما برای تأمین R60 و بالاتر، استفاده از کوپلیمرهای وینیل‌استات غیرهالوژنه با ضخامت ۱/۶ تا ۱/۸ میلی‌متر الزامی است. این تمایز که ریشه در تفاوت بنیادین سازوکار تخریب حرارتی دو خانواده پلیمری دارد، یکی از کاربردی‌ترین دستاوردهای این پژوهش برای صنعت تولید پوشش‌های ضدحریق به‌شمار می‌رود [۳۶].

دومین محور اصلی این مطالعه، تعیین نسبت بهینه سه جزء اصلی سامانه منبسط‌شونده یعنی پلی‌فسفات‌آمونیم (APP)، ملامین (MA) و پنتا اریتریتول (PE) بود. محققان با آزمودن بیش از پانزده فرمول‌بندی مختلف به این نتیجه رسیدند که نسبت ۲:۱:۱ (APP:MA:PE) معادل حدود ۲۰ درصد APP، ۱۰ درصد MA و ۱۰ درصد PE در فرمول‌بندی وزنی-بالاترین ضریب انبساط (حدود ۴۵ تا ۵۰ سانتی‌متر مکعب بر گرم) را در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد فراهم می‌کند و برای مقاومت حریق R30 در ضخامت کم مناسب است. اما در مقابل، نسبت ۳/۵:۱:۱/۵ (APP:MA:PE) معادل حدود ۳۵ درصد APP، ۱۰ درصد MA و ۱۵ درصد PE اگرچه ضریب انبساط اندکی



شکل ۶ نتایج آزمون‌های آتش مطابق با استاندارد DSTU B V.1.1-14:2007 برای ستون‌های فولادی پوشش داده شده با پوشش‌های منبسط‌شونده مورد مطالعه [۳۶].

Nanoclay) است-به نانورسی گفته می‌شود که قابلیت لایه‌لایه‌شدگی (Exfoliation) بالایی در آن محیط پلیمری خاص داشته باشد. در پوشش‌های پایه‌آبی با چسب وینیل‌استات، نانورس‌های Optigel WA و Claytone HY و همچنین Garamite 7305 در مقادیر ۰/۳ تا ۰/۶ درصد بهترین عملکرد را داشتند. به‌عنوان نمونه، افزودن ۰/۵ درصد Garamite 7305 به نمونه IC13، ضریب انبساط را از ۴۵ به ۵۲ سانتی‌متر مکعب بر گرم افزایش داد و مقاومت حرئق را از ۳۴ به ۴۴ دقیقه رساند (حدود ۳۰ درصد بهبود). در پوشش‌های پایه‌حلال با چسب استایرن‌آکریلات، نانورس‌های اصلاح‌شده با مواد آلی آب‌گریز در مقادیر ۰/۳ درصد مؤثرتر بودند و افزایش مقاومت حرئق تا بیش از ۴۵ درصد ثبت شد (جدول ۷ و ۸). اما فراتر از این مقادیر بهینه، نانورس به جای کمک، به‌عنوان مانعی فیزیکی عمل کرده، انبساط را مهار می‌کند. یکی از نتایج بسیار ارزشمند برای کاربرد صنعتی، بهبود چشمگیر مقاومت محیطی بود. نمونه‌های حاوی نانورس پس از ۳۰۰ روز قرارگیری در رطوبت نسبی ۸۰ درصد (شرایط شتابیده) کاهش مقاومت حرئق کمتر از ۳ درصد داشتند، در حالی که نمونه بدون نانورس بیش از ۱۰ درصد افت نشان داد. برای نمونه IC13 حاوی Garamite 7305، افت مقاومت پس از پیری صفر درصد ثبت شد. همچنین نانورس‌ها به‌عنوان اصلاح‌کننده رئولوژی عمل کرده، مشکل چکیدن پوشش‌های استایرن‌آکریلاتی روی سطوح عمودی را به میزان قابل توجهی کاهش دادند-مزیتی که در اجرای پوشش روی تیرها و ستون‌های فولادی اهمیت عملی فراوانی دارد (شکل ۷) [۳۶].

چهارمین و آخرین بخش این مطالعه به چالش پوشش‌های با ضخامت بالا (بیش از ۳ میلی‌متر) اختصاص داشت که برای تأمین R90 و R120 ضروری هستند (جدول ۹ و ۱۰ و ۱۱). در چنین ضخامت‌هایی، لایه زغالی به‌دلیل وزن خود دچار ریزش و جدا شدن از سطح فولاد می‌شود. محققان چهار نوع

جدول ۵ ضریب انبساط K (سانتی‌متر مکعب بر گرم) برای پوشش‌های منبسط‌شونده اندازه‌گیری شده در گستره دمایی ۲۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد [۳۶].

مؤلفه	میزان، %	$\text{cm}^3/\text{g}, K_{\max}$	$^{\circ}\text{C}, T_{\max}$
APP	۱۲	۲۶	۴۵۰
	۴۹-۴۲	۴۶-۳۲	۴۲۰
	۳۳-۱۹	۱۰۸-۶۷	۵۰۰
PE	۶	۶۰	۴۰۰
	۲۵-۲۱	۴۴-۳۹	۴۰۰
	۱۷-۱۲	۵۲-۴۸	۴۵۰
MA	۶	۱۱۲	۴۲۰
	۱۲-۱۰	۸۸-۷۸	۵۰۰
	۲۵-۲۱	۴۸-۳۵	۴۵۰

حدود ۹ تا ۱۱ درصد وزنی پلیمر خالص تعیین شد. کمتر از این مقدار، زغال شکننده و نامنظم می‌شود و چسبندگی کافی ندارد؛ بیشتر از آن نیز گرانیروی مذاب افزایش یافته و فرایند انبساط مهار می‌شود [۳۶].

سومین دستاورد مهم این پژوهش، بررسی تأثیر افزودنی‌های نانورسی بر عملکرد پوشش بود. چهار نوع نانورس (Op- tigel WA آب‌دوست، Claytone HY آب‌دوست، La- ponite EP آب‌دوست و Garamite7305 اصلاح‌شده با مواد آلی آب‌گریز) بر روی دو خانواده چسب (وینیل‌استات و استایرن‌آکریلات) مورد آزمون قرار گرفتند. یافته کلیدی این بخش، معرفی مفهوم «نانورس هم‌ساز» (Cognate)

جدول ۶ نتایج تحلیل وزن‌سنجی حرارتی (TGA) برای نمونه‌های پوشش منبسط‌شونده [۳۶].

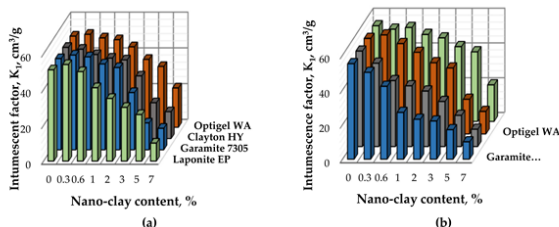
پوشش ضد حرئق	$^{\circ}\text{C} T_d$	$^{\circ}\text{C} T_{10}$	$^{\circ}\text{C} T_{50}$	$^{\circ}\text{C} T_{80}$	%m
IC2-2	۲۰۴	۳۰۴	۴۰۰	۴۵۸	۲۴
IC2-3	۲۱۰	۳۳۱	۴۷۵	۵۳۸	۳۵
IC3-2	۲۲۴	۳۴۵	۵۰۳	۵۲۳	۳۱
IC3-3	۲۱۰	۳۲۹	۴۹۷	۵۶۳	۲۴
IC4-1	۲۰۱	۳۲۷	۵۰۵	۵۰۵	۲۵
IC4-2	۲۰۸	۳۲۵	۵۳۷	۵۹۳	۳۷

جدول ۷ ترکیب (بر حسب جزء وزنی) پوشش‌های منبسط‌شونده [۳۶].

پوشش ضدحریق	نانو-رس	APP/MA/PE/ TiO ₂	افزودنی‌ها	چسب EZ 3010	چسب AC80+AC4
IC11	بدون نانو-رس	۱	۰،۰۰۸	۰،۰۲۷	-
IC12	Optigel WA	۱	۰،۰۰۸	۰،۰۲۷	-
IC13	Garamite 7305	۱	۰،۰۰۸	۰،۰۲۷	-
IC14	Claytone HY	۱	۰،۰۰۸	۰،۰۲۷	-
IC15	Laponite EP	۱	۰،۰۰۸	۰،۰۲۷	-
IC16	بدون نانو-رس	۱	۰،۰۰۵	-	۰،۰۶۱
IC17	Optigel WA	۱	۰،۰۰۵	-	۰،۰۶۱
IC18	Garamite 7305	۱	۰،۰۰۵	-	۰،۰۶۱
IC19	Claytone HY	۱	۰،۰۰۵	-	۰،۰۶۱
IC20	Laponite EP	۱	۰،۰۰۵	-	۰،۰۶۱

زمانی-دمایی ثبت شده نشان می‌داد که دمای فولاد پس از ۱۲۰ دقیقه همچنان زیر ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند. به عنوان گواه نهایی بر موفقیت این پژوهش، پوشش توسعه‌یافته (با نام تجاری ICX) با پوشش مرجع جهانی Nullifire SC801-120 مقایسه شد. نتایج نشان داد که در ضخامت ۳/۶۵ میلی‌متر برای مقطع با ضریب ۱۰ میلی‌متر، پوشش ICX مقاومت R120 را تأمین می‌کند و در ضخامت ۴/۹ میلی‌متر حتی به دسته R150 نیز دست می‌یابد، در حالی که پوشش مرجع در این ضخامت صرفاً برای R120 تأیید شده بود [۳۶].

این مطالعه تأکید می‌کند که انتخاب چسب پلیمری، نسبت اجزای سامانه منبسط‌شونده، نوع و مقدار نانورس و الیاف تقویت‌کننده - نه به عنوان متغیرهای مستقل، بلکه به عنوان عوامل درهم‌تنیده یک شبکه پیچیده- باید در چارچوب رویکردی منظم و با تأیید نهایی از طریق آزمون‌های بزرگ-مقیاس مورد توجه قرار گیرند.



شکل ۷ ضریب انبساط (K، بر حسب سانتی‌متر مکعب بر گرم) برای پوشش‌های منبسط‌شونده مورد مطالعه بر حسب میزان نانورس (درصد) در پوشش: (الف) IC11 تا IC15؛ (ب) IC16 تا IC20 [۳۶].

الیاف (الیاف معدنی Lapinus، الیاف شیشه Cem-fil، بازالت، پلی‌پروپیلن و سلولز) را آزمایش کردند. بهترین نتیجه با مخلوط ۱:۱ الیاف معدنی و الیاف شیشه (در مجموع حدود ۳ درصد وزنی پوشش) حاصل شد. نمونه IC24 که حاوی این مخلوط الیاف بود، مقاومت حریق ۶۲ دقیقه را در آزمون کوره آزمایشگاهی نشان داد (در مقایسه با ۵۴ دقیقه برای نمونه بدون الیاف) و خصوصیات زغال آن یکنواخت و بدون جدا شدن از زیرلایه توصیف شد (شکل ۸ و ۹). در آزمون بزرگ-مقیاس روی ستون‌های فولادی با ضریب مقطع ۴/۲ میلی‌متر، همین پوشش توانست مقاومت حریق R120 را تأمین کند. منحنی

جدول ۸ مقاومت در برابر آتش ورق‌های فولادی محافظت‌شده با پوشش‌های منبسط‌شونده مورد مطالعه (الف) [۳۶].

ضدحریق	پوشش	IC20	IC19	IC18	IC17	IC16	IC15	IC14	IC13	IC12	IC11	دقیقه	دقیقه	دقیقه
	R1	۲۵	۲۲	۲۹	۲۷	۲۲	۲۷	۳۹	۴۴	۴۱	۳۴			
	R1	۲۳	۲۱	۲۸	۲۵	۲۰	۲۲	۳۷	۴۴	۳۸	۲۰			
	% ΔAR	۸	۶	۶	۷	۹	۱۱	۵	۰	۷	۱۲			

جدول ۹ نسبت (بر حسب جزء وزنی) اجزای تشکیل دهنده پوشش منبسط شونده [۳۶].

پوشش ضدحریق	APP	PE	MA	EZ 3112	TiO ₂	نانو رس	MC	GF	افزودنی‌ها
IC21	۳،۵	۱،۶	۱،۱	۲،۲	۱،۰	۰،۱	-	-	۰،۵
IC22	۳،۵	۱،۶	۱،۱	۲،۲	۱،۰	۰،۱	-	۰،۳	۰،۵
IC23	۳،۵	۱،۶	۱،۱	۲،۲	۱،۰	۰،۱	۰،۳	-	۰،۵
IC24	۳،۵	۱،۶	۱،۱	۲،۲	۱،۰	۰،۱	۰،۱۵	۰،۱۵	۰،۵

تنها از این راه می‌توان به فرمول‌بندی دست یافت که هم از نظر فنی کارآمد و هم از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد. برای پژوهشگران حوزه پوشش‌های ضدحریق، این مطالعه نقشه راه عملی ارائه می‌دهد: از آزمون ساده ضریب انبساط در کوره آزمایشگاهی گرفته تا تأیید نهایی در آتش‌سوزی تمام‌عیار بر روی ستون‌های فولادی [۳۶].

۱۱ چشم‌انداز و جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در دهه‌های اخیر در زمینه پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش از درک عمیق‌تر سازوکارهای شیمیایی و فیزیکی تا توسعه فرمول‌بندی‌های صنعتی با مقاومت R120 و فراتر از آن همچنان شکاف‌ها و چالش‌های مهمی وجود دارد که جهت‌گیری پژوهش‌های آینده را ترسیم می‌کنند. در ادامه، مهم‌ترین چشم‌اندازها و اولویت‌های پژوهشی پیش‌رو ارائه می‌شود. توسعه پوشش‌های هوشمند و پاسخگو به دما: پژوهش‌های

کنونی عمدتاً بر روی فرمول‌بندی‌های با انبساط خطی و غیرقابل کنترل متمرکز هستند. یکی از جهت‌گیری‌های هیجان‌انگیز آینده، طراحی پوشش‌هایی است که بتوانند ضریب انبساط خود را بر اساس نرخ افزایش دما به‌طور پویا تنظیم کنند. به عبارت دیگر، پوششی که در برابر آتش‌سوزی‌های با نرخ رشد آهسته، انبساط تدریجی و در برابر فلش‌اورهای ناگهانی، انبساط سریع و کنترل‌شده از خود نشان دهد. این رویکرد نیازمند سنتز پلیمرهای جدید با دمای انتقال شیشه‌ای قابل برنامه‌ریزی یا استفاده از شبکه‌های پلیمری با اتصال‌های برگشت‌پذیر (مانند پیوندهای هیدروژنی دینامیک یا پیوندهای دی‌سولفیدی) است. پوشش‌های همه‌کاره با قابلیت حذف آسان (برگشت‌پذیری کامل): یکی از چالش‌های جدی به‌ویژه در کاربردهای حساس (نظیر زیرلایه‌های با ارزش تاریخی یا تجهیزات دقیق)، نبود پوشش‌هایی با قابلیت حذف کامل و بدون باقی‌مانده است. پژوهش‌های آینده باید بر روی طراحی چسب‌ها و افزودنی‌هایی متمرکز شوند که در پاسخ به محرک خارجی خاص (مانند حلال

جدول ۱۰ نتایج آزمون‌های آتش برای پوشش‌های منبسط‌شونده مورد مطالعه [۳۶].

مقاومت در برابر آتش، دقیقه	K	ویژگی‌های زغال‌واره	پوشش ضدحریق / ضخامت پوشش
۳۲	۱۴	شکننده، با ترک‌های متعدد و نشانه‌های قابل‌مشاهده از تخریب	IC21 ۲،۱ میلی‌متر
۴۴	۲۶	شکننده، ناهموار، با حفره‌های متعدد، عمدتاً جداشده از بستر	IC22 ۲،۱ میلی‌متر
۵۴	۳۶	محکم، با ترک‌های متعدد، تا حدی جداشده از بستر	IC23 ۱،۹ میلی‌متر
۶۲	۳۲	محکم، یکنواخت، بدون جدایش از بستر	IC24 ۱،۹ میلی‌متر
۵۹	۳۸	محکم، یکنواخت، تا حدی جداشده از بستر	Nullfire SC801-120 ۲،۱ میلی‌متر

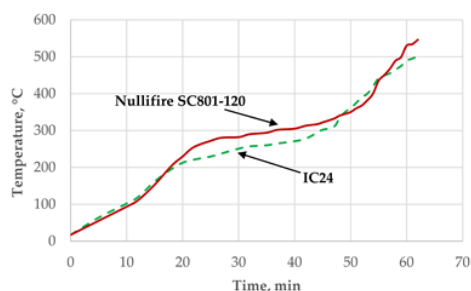
جدول ۱۱ داده‌های به‌دست‌آمده از گواهی‌نامه‌های انطباق برای پوشش منبسط‌شونده توسعه‌یافته ICX و پوشش موجود Nullfire SC801-120.

حداقل ضخامت پوشش، که در آن دما کمتر از 500°C است، میلی‌متر		ضریب مقطع δ ، میلی‌متر	ضریب مقطع δ ، میلی‌متر	مقاومت در برابر آتش، R، دقیقه
Nullfire SC801-120	ICX			
۱,۰۲	۱,۱۲	۱۰۰	۱۰,۰	۶۰
۱,۷۸	۱,۹۵	۲۰۰	۵,۰۰	
۲,۳۲	۲,۲۷	۳۲۴	۳,۱۰	
۲,۲۴	۲,۳۳	۱۰۰	۱۰,۰	۹۰
۳,۶۶	۳,۵۳	۲۰۰	۵,۰۰	
۴,۶۶	۴,۱۹	۳۲۴	۳,۱۰	
۳,۲۰	۳,۶۵	۱۰۰	۱۰,۰	۱۲۰
۵,۲۰	۵,۲۰	۲۰۰	۵,۰۰	
N/A	۶,۱۰	۳۲۴	۳,۱۰	
N/A	۴,۹۱	۱۰۰	۱۰,۰	۱۵۰
N/A	۶,۲۸	۱۶۰	۶,۲۵	

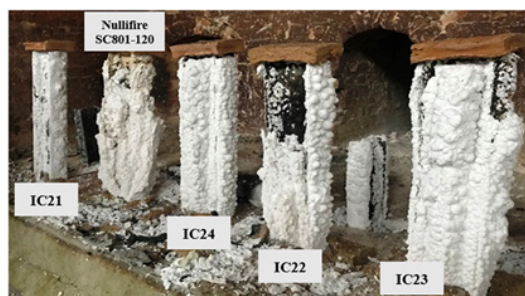
(مانند فیتات‌ها، اسیدفیتیک و نانوذرات سلولزی) است. چالش اصلی در این مسیر، دستیابی به پایداری حرارتی قابل مقایسه با پوشش‌های نفتی و نیز حفظ خواص مکانیکی و چسبندگی در شرایط مرطوب است.

پوشش‌های فوق‌نازک با کارایی بالا (ضخامت کمتر از ۲۰۰ میکرون): در بسیاری از کاربردهای صنعتی و نیز کاربردهای حساس، هر میلی‌متر ضخامت پوشش می‌تواند مسئله‌ساز باشد - چه از نظر وزن، چه از نظر پنهان شدن جزئیات زیرلایه و چه از نظر هزینه. پژوهش در مورد سامانه‌های منبسط‌شونده با نسبت انبساط بسیار بالا (بیش از ۲۰۰ برابر) و پوشش‌های

خاص، تغییر pH، یا میدان الکتریکی) بدون آسیب به زیرلایه، از سطح جدا شوند. این ویژگی به‌طور چشمگیری دامنه کاربرد پوشش‌های ضدحریق‌رادر حوزه‌های حساس گسترش خواهد داد. پوشش‌های زیست‌پایه و کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر: با وجود حرکت به سمت حذف هالوژن‌ها، بسیاری از فرمول‌بندی‌های کنونی همچنان از ترکیبات فسفردار و چسب‌های مبتنی بر پلیمرهای نفتی استفاده می‌کنند که در انتهای چرخه عمر خود مشکل‌ساز هستند. جهت‌گیری آینده به سمت استفاده از پلیمرهای زیست‌پایه (مانند لیگنین، نشاسته اصلاح‌شده، کیتوزان و پلی لاکتیک اسید) و بازدارنده‌های شعله طبیعی



شکل ۹ دمای ستون فولادی بر حسب زمان قرارگیری در معرض آتش در شرایط آزمون تعیین‌شده در استاندارد DSTU B V.1.1-14:2007 [۳۶].



شکل ۸ تصویر نمونه‌ها پس از آزمون آتش انجام‌شده مطابق با روش توصیف‌شده در استاندارد DSTU B V.1.1-14:2007 [۳۶].

درک عمیق‌تر از سازوکارهای شیمیایی و فیزیکی، به تدوین قواعد عملی برای طراحی فرمول‌بندی‌های کارآمد انجامیده است. نخستین و بنیادین‌ترین یافته این مرور، تمایز روشن میان دو دسته پوشش‌های منبسط‌شونده و غیرمنبسط‌شونده بر اساس مرحله عملکرد (پیش و پس از فلش‌اور) و سازوکار حاکم (فاز متراکم در برابر فاز گازی) است. پوشش‌های منبسط‌شونده با تشکیل لایه زغالی متورم، به دلیل قابلیت انبساط تا ۱۰۰ برابر ضخامت اولیه و ایجاد سدی فیزیکی و حرارتی با رسانایی بسیار پایین، گزینه برتر برای حفاظت طولانی‌مدت سازه‌ها در برابر آتش کاملاً توسعه‌یافته محسوب می‌شوند. در مقابل، پوشش‌های غیرمنبسط‌شونده با سازوکار رادیکال‌گیر در فاز گازی یا تشکیل لایه شیشه‌ای در فاز متراکم، برای کاربردهایی که به ضخامت کم و هزینه پایین نیاز دارند (مانند کلاس R30) مناسب‌ترند. دومین دستاورد مهم این مرور، بازتعریف نقش چسب پلیمری است. بر خلاف نگاه سنتی که چسب را صرفاً عاملی برای فیلم‌سازی و چسبندگی تلقی می‌کند، شواهد تجربی نشان می‌دهد که چسب پلیمری چهارمین جزء جدایی‌ناپذیر سامانه بازدارنده شعله است و مستقیماً بر دمای تخریب، گرانروی مذاب، یکنواختی و پایداری حرارتی لایه زغالی تأثیر می‌گذارد. کوپلیمرهای وینیل‌استات غیرهالوژنه به دلیل تخریب دومرحله‌ای (استیل‌زدایی و سپس شکست زنجیره‌های پلی‌انی) برای مقاومت‌های حریق بالا (R60 و بیشتر) مناسبند، در حالی که استایرن‌آکریلات‌ها برای کلاس R30 در ضخامت کم کافی و اقتصادی هستند. سومین یافته کلیدی، تأثیر مستقیم نسبت اجزای اصلی (APP/MA/PE) بر کارایی نهایی است. نسبت ۲:۱:۱ بالاترین ضریب انبساط را فراهم می‌کند و برای ضخامت‌های کم (۰/۴-۰/۵ میلی‌متر) و مقاومت R30 بهینه است. نسبت ۳/۵:۱:۱/۵ اگرچه ضریب انبساط کمتری دارد، اما به دلیل افزایش چشمگیر دمای تخریب ۶۰ درصد جرم (T60٪ تا ۵۹۳ درجه سانتی‌گراد)، پایداری حرارتی بسیار بالاتری ایجاد کرده و برای دستیابی به R60 و R120 ضروری است. در حوزه فناوری‌های نوین، دو رویکرد برجسته هستند. نخست، پوشش‌های نانوکامپوزیتی که با افزودن نانورس‌های هم‌ساز (۰/۳-۰/۶ درصد) و نانوصفحات نیتريدبور، ضمن افزایش مقاومت حریق تا ۵۰ درصد، پایداری محیطی را نیز بهبود می‌بخشند. دوم، روش سل-ژل که امکان تولید پوشش‌های هیبریدی شفاف و بسیار نازک را فراهم می‌کند-ویژگی که برای کاربردهایی که حفظ ظاهر اصلی زیرلایه (به ویژه چوب) اهمیت دارد، حیاتی است. با این حال، هیچ فناوری بدون چالش نیست. کاربرد مستقیم پوشش‌های ضدحریق بر روی زیرلایه‌های حساس (نظیر چوب‌های تاریخی

هیبریدی که ترکیبی از سازوکار سل-ژل و نانوذرات را با هم به کار می‌برند، می‌تواند به پوشش‌هایی با ضخامت کمتر از ۰/۲ میلی‌متر منجر شود که همان محافظت پوشش ۲ میلی‌متری سنتی را فراهم می‌کنند.

ارزیابی استاندارد شده پایداری طولانی‌مدت و پیری تسریع‌شده: یکی از نقاط کور دانش فعلی، نبود پروتکل استاندارد و جهانی برای پیش‌بینی عمر مفید پوشش‌های ضدحریق در شرایط محیطی مختلف (رطوبت، اشعه فرابنفش، نوسانات دما، نشست گرد و غبار و آلاینده‌ها) است. پژوهش‌های آینده باید به سمت تدوین روش‌های پیری شتابیده معتبر حرکت کنند که بتوانند با دقت بالایی، کاهش کارایی پوشش را در بازه‌های ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سال پیش‌بینی کنند. این امر برای پذیرش گسترده‌تر این پوشش‌ها در کاربردهای زیرساختی و حساس حیاتی است.

مطالعات نظام‌مند مقایسه‌ای فرمول‌بندی‌ها بر روی زیرلایه‌های متنوع: در حال حاضر، مقایسه نتایج پژوهش‌های مختلف به دلیل تفاوت در روش‌های آزمون، ضخامت پوشش، نوع زیرلایه و شرایط پیری بسیار دشوار است. ایجاد بانک داده باز و استاندارد از عملکرد صدها فرمول‌بندی مختلف بر روی زیرلایه‌های استاندارد (فولاد، آلومینیوم، چوب با گونه‌های مشخص، پلیمرهای رایج، منسوجات و کاغذ) با استفاده از روش‌های آزمون یکسان، نیاز اساسی برای پیشرفت سریع‌تر این حوزه است. چنین بانک داده‌ای می‌تواند با بهره‌گیری از یادگیری ماشین، به پیش‌بینی فرمول‌بندی‌های بهینه برای کاربردهای خاص کمک کند.

کاربردهای نوظهور در بسته‌بندی هوشمند و ذخیره‌سازی حساس: اگرچه تمرکز اصلی این مرور بر روی پوشش‌های سازه‌ای و حفاظتی بود، اما یکی از چشم‌اندازهای امیدوارکننده، استفاده از نسل جدید پوشش‌های فوق‌نازک، شفاف و زیست‌تخریب‌پذیر در بسته‌بندی‌های هوشمند (برای محافظت از اقلام حساس در برابر آتش در حین حمل‌ونقل) و تجهیزات ذخیره‌سازی آرشیوی (قفسه‌ها، کابینت‌ها و جعبه‌های نگهداری) است. پژوهش در این حوزه نیازمند همکاری میان‌رشته‌ای بین شیمی دانان پلیمر، مهندسان حریق و متخصصان حفاظت است.

۱۲ نتیجه‌گیری

پوشش‌های ضدحریق و مقاوم در برابر آتش، امروزه به یکی از پایه‌های اصلی حفاظت غیرفعال در صنایع گوناگون از جمله ساختمان، حمل‌ونقل، هوافضا و تأسیسات زیربنایی تبدیل شده‌اند. این مقاله مروری تلاش کرد تا تصویری نظام‌مند از دانش فنی موجود در این حوزه ترسیم کند و نشان دهد که چگونه

ضدحریق و مقاوم در برابر آتش امروزه به بلوغ قابل توجهی رسیده‌اند، اما همچنان زمینه برای نوآوری گسترده است. حرکت به سمت پوشش‌های هوشمند پاسخگو به دما، زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر، فوق‌نازک با نسبت انبساط بالای ۲۰۰، همراه با تدوین پروتکل‌های استاندارد برای ارزیابی پایداری طولانی‌مدت، جهت‌گیری‌های اصلی پژوهش در دهه آینده را تشکیل می‌دهند.

یا منسوجات ارزشمند) با خطراتی چون تخریب شیمیایی، لیف-لیف‌شدن، شوره‌زدگی، کاهش استحکام و تغییرات ظاهری همراه است. از این رو، رویکرد «کاربرد غیرمستقیم» بر روی مواد پشתיبان، مبلمان ذخیره‌سازی و تجهیزات جانبی به‌عنوان راهکاری کم‌تأثیر و منطبق با اصول برگشت‌پذیری و حداقل مداخله پیشنهاد می‌شود. در مجموع، پوشش‌های

مراجع

- Mariappan T., Recent Developments of Intumescent Fire Protection Coatings for Structural Steel: A Review, *Journal of Fire Sciences*, 34, 120-163, **2016**.
- Mariappan T., Fire Retardant Coatings, *New Technologies in Protective Coatings*, 28, 101-122, **2017**.
- White R., Dietenberger M., Fire Safety of Wood Construction. Wood Handbook-Wood as an Engineering Material, General Technical Report FPL-GTR-190, US Department of Agriculture, Forest Service, *Forest Products Laboratory*, **2010**.
- Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S., Multiscale Experimental Approach for Developing High-Performance Intumescent Coatings, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 4500-4508, **2006**.
- Verburg G.B., et al., Water-Resistant, Oil-Based, Intumescent Fire-Retardant Coatings. I. Developmental Formulations, *Journal of the American Oil Chemists Society*, 41, 670-674, **1964**.
- Wilkie C.A., Morgan A.B., Fire Retardancy of Polymeric Materials, *CRC Press, USA*, **2024**.
- Östman B.A.L., Mikkola E., European Classes for the Reaction to Fire Performance of Wood-Based Panels, *Fire and Materials*, 34, 315-330, **2010**.
- Goldsmith F., Fire Retardant Coatings: An Evaluation of Fire-Retardant Coatings as a Means of Protecting Wood Panels, *Wood* 493, **2011**.
- Hirata T., Kawamoto S., Nishimoto T., Thermogravimetry of Wood Treated with Water-Insoluble Retardants and a Proposal for Development of Fire-Retardant Wood Materials, *Fire and Materials*, 15, 27-36, **1991**.
- Pabeliña K.G., Lumban C.O., Ramos H.J., Plasma Impregnation of Wood with Fire Retardants, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 272, 365-369, **2012**.
- Li Q., Jiang P., Wei P., Synthesis, Characteristic, and Application of New Flame Retardant Containing Phosphorus, Nitrogen, and Silicon, *Polymer Engineering & Science*, 46, 344-350, **2006**.
- Mačiulaitis R., Lipinskas D., Lukošius K., Singularity and Importance of Determination of Wood Charring Rate in Fire Investigation, 12, 42-47, **2006**.
- Branca C., Di Blasi C., Semi-Global Mechanisms for the Oxidation of Diammonium Phosphate Impregnated Wood, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 91, 97-104, **2011**.
- Baysal E., Altinok M., Colak M., Ozaki S.K., Toker H., Fire Resistance of Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*) Treated with Borates and Natural Extractives, *Bioresource Technology*, 98, 1101-1105, **2007**.
- Tomak E.D., Cavdar A.D., Limited Oxygen Index Levels of Impregnated Scots Pine Wood, *Thermochimica Acta*, 573, 181-185, **2013**.
- Getto H., Ishihara S., Functionally Graded Wood in Fire Endurance with Basic Nitrogen Compounds and Phosphoric Acid, *Fire and Materials*, 22, 77-83, **1998**.
- Subyakto, Kajimoto T., Hata T., Ishihara S., Kawai S., Getto H., Improving Fire Retardancy of Fast Growing Wood by Coating with Fire Retardant and Surface Densification, *Fire and Materials*, 22, 207-212, **1998**.
- Lee H.L., Chen G.C., Rowell R.M., Thermal Properties of Wood Reacted with a Phosphorus Pentoxide-Amine System, *Journal of Applied Polymer Science*, 91, 2465-2481, **2004**.
- Stevens R., Van Es D.S., Bezemer R., Kranenbarg A., The Structure-Activity Relationship of Fire Retardant Phosphorus Compounds in Wood, *Polymer Degradation and Stability*, 91, 832-841, **2006**.
- Marney D., Russell L., Combined Fire Retardant and Wood Preservative Treatments for Outdoor Wood Applications: A Review of the Literature, *Fire Technology*, 44, 1-14, **2008**.
- Abd El-Wahab H., Abd El-Fattah M., Abd El-Khalik N., Sharaby C.M., Synthesis and Performance of Flame Retardant Additives Based on Cyclodiphosph(V) Azane Derivatives Incorporated into Polyurethane Varnish, *Progress in Organic Coatings*, 74, 615-621, **2012**.
- Kandola B., Horrocks A., Price D., Coleman G., Flame-Retardant Treatments of Cellulose and Their Influence on the Mechanism of Cellulose Pyrolysis, *Journal of Macromolecular Science Part C: Polymer Reviews*, 36, 721-794, **1996**.
- Grexa O., Poutch F., Manikova D., Martvonova H., Bartekova A., Intumescence in Fire Retardancy of Lignocellulosic Panels, *Polymer Degradation and Stability*, 82, 373-377, **2003**.
- Dobele G., Urbanovich I., Zhurins A., Kampars V., Meier D., Application of Analytical Pyrolysis for Wood Fire Protection Control, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79, 47-51, **2007**.
- Qu H., Wu W., Wu H., Jiao Y., Xu J., Thermal Degradation and Fire Performance of Wood Treated with Various Inorganic Salts, *Fire and Materials*, 35, 569-576, **2011**.
- Yuan L., Chen X., Hu Y., Combination Effect of 4-Picolinic Acid with 5A Zeolite on Ammonium Polyphosphate Flame-Retarded Sawdust Board, *Journal of Fire Sciences*, 32, 230-240, **2014**.

27. Richardson L., Cornelissen A., Fire-Resistant Coatings for Roof/Ceiling Deck Timbers, *Fire and Materials*, 11, 191-194, **1987**.
28. Gardner W., Thomson C., Ignitability and Heat-Release Properties of Forest Products, *Fire and Materials*, 15, 3-9, **1991**.
29. Chou C.S., Lin S.H., Wang C.I., Preparation and Characterization of the Intumescent Fire Retardant Coating with a New Flame Retardant, *Advanced Powder Technology*, 20, 169-176, **2009**.
30. Carosio F., Cuttica F., Medina L., Berglund L.A., Clay Nanopaper as Multifunctional Brick and Mortar Fire Protection Coating: Wood Case Study, *Materials & Design*, 93, 357-363, **2016**.
31. Fufa S.M., Steen-Hansen A., Jelle B.P., Hovde P.J., Reaction to Fire and Water Vapour Resistance Performance of Treated Wood Specimens Containing TiO₂ and Clay Nanoparticles, *Fire and Materials*, 38, 717-724, **2014**.
32. Chuang C.S., Tsai K.C., Yang T.H., Ko C.H., Wang M.K., Effects of Adding Organo-Clays for Acrylic-Based Intumescent Coating on Fire-Retardancy of Painted Thin Plywood, *Applied Clay Science*, 53, 709-715, **2011**.
33. Taghiyari H.R., Fire-Retarding Properties of Nano-Silver in Solid Woods, *Wood Science and Technology*, 46, 939-952, **2012**.
34. Haghghi Poshtiri A., Taghiyari H.R., Naghi Karimi A., The Optimum Level of Nano-Wollastonite Consumption as Fire-Retardant in Poplar Wood (*Populus nigra*), *International Journal of Nano Dimension*, 4, 141-151, **2013**.
35. Liu J., Kutty R.G., Zheng Q., Eswariah V., Sreejith S., Liu Z., Hexagonal Boron Nitride Nanosheets as High-Performance Binder-Free Fire-Resistant Wood Coatings, *Small*, 13, 1602456, **2016**.
36. Vakhitova L., Kalafat K., Vakhitov R., Drizhd V., Improving the Fire-Retardant Performance of Industrial Reactive Coatings for Steel Building Structures, *Heliyon*, 10, **2024**.

