

## رفتار آتش‌گیری، استحکام مکانیکی و پایداری ابعادی در کامپوزیت‌های آرد چوب- پلی‌اتیلن تحت تأثیر مواد دیرسوزکننده مختلف

### چکیده

اشتعال‌پذیری یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که دامنه کاربرد کامپوزیت‌های چوب پلاستیک را دچار محدودیت می‌سازد. از این رو بهبود خواص دیرسوزی این فرآورده‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر گرافیت متورم شونده (EG) و ترکیب آن با آلومنیوم‌تری‌هیدروکسید (ATH)، فسفات غیرآلی (IP) و ملامین بورات (MB) بر روی اشتعال‌پذیری کامپوزیت‌های ساخته شده از آردچوب-پلی‌اتیلن انجام شد. کامپوزیت‌ها با روش اختلاط مذاب ساخته شدند و عملکرد آتش‌گیری آن‌ها با آزمون گرماسنجی مخروطی و اندازه‌گیری شاخص اکسیژن‌حدی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر مواد دیرسوزکننده مختلف بر روی استحکام مکانیکی و جذب آب نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. آزمون گرماسنجی مخروطی نشان داد که با افزودن مواد دیرسوزکننده مقدار گرمای آزادشده و سرعت سوختن کاهش و مقدار ذغال باقی‌مانده و زمان آتش‌گیری افزایش یافت. این یافته‌ها به شکل‌گیری لایه ذغالی محافظتی به وسیله مواد دیرسوزکننده نسبت داده شد. ترکیب گرافیت متورم شونده با دیگر مواد دیرسوزکننده در مقایسه با نمونه‌هایی که تنها از گرافیت متورم شونده به‌عنوان ماده دیرسوزکننده بهره می‌بردند، نتایج بهتری را حاصل کرد. آزمون اندازه‌گیری شاخص اکسیژن‌حدی برای تعیین کمترین مقدار اکسیژن که در آن ماده در سیال مخلوط اکسیژن و نیتروژن مشتعل باقی‌می‌ماند، بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که افزودن مواد دیرسوزکننده، شاخص اکسیژن‌حدی نمونه‌ها را بهبود می‌دهد. به علاوه، در اثر حضور مواد دیرسوزکننده استحکام کششی و خمشی (مقاومت و مدول الاستیسیته) و مقاومت به ضربه فاق دار نمونه‌ها کاهش و جذب آب و واکنشیدگی ضخامت افزایش نشان داد. به‌طور کلی در میان تیمارهای مورد مطالعه، سیستم کندسوزکننده EG-ATH بالاترین پتانسیل را در بهبود دیرسوزی کامپوزیت‌ها نشان داد.

**واژگان کلیدی:** اشتعال‌پذیری، شاخص اکسیژن‌حدی، دیرسوزی، خواص مکانیکی، گرماسنجی مخروطی.

مهدی روحانی<sup>۱\*</sup>  
بهزاد کرد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار علوم و صنایع چوب و کاغذ، گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران

<sup>۲</sup> استادیار علوم و صنایع چوب و کاغذ، گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:

[mroohani@standard.ac.ir](mailto:mroohani@standard.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۱

### مقدمه

طی دو دهه گذشته، کامپوزیت‌های چوب پلاستیک جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف نظیر اتومبیل‌سازی،

مبلمان، مصالح ساختمانی و غیره پیدا کرده‌اند [۱]. در سال‌های آغازین، اطلاعات فنی درباره این فرآورده ناچیز بود و کاربرد آن در موارد خاص محدود می‌شد [۲]. با این وجود،

موناومونیوم فسفات (MAP)، دی‌آمونیم فسفات (DAP)، کلریدروی، اسید بوریک و غیره [۹] اشباع می‌شود، در پلاستیک و کامپوزیت چوب پلاستیک، مواد دیرسوزکننده مستقیماً به صورت جامد به شکل‌های مختلف پودری یا گرانولی در مرحله ذوب به فرمولاسیون ساخت اضافه می‌گردد [۱۰]. مهم‌ترین مواد افزودنی دیرسوزکننده که در ساخت کامپوزیت چوب پلاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارت‌اند از: ترکیبات غیر آلی هالوژن دار حاوی برم، کلر، فسفر یا دو یا چند یک از این عناصر. عناصر دیگری هم که اثرات دیرسوزکنندگی داشته و مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل آنتیموان، بورن، نیتروژن، سیلیس و روی هستند [۳]. ترکیبات حاصل از این عناصر مانند اسید بوریک، آمونیوم فسفات، آمونیوم بورات، آمونیوم سولفات، کلرید آمونیوم، اکسید آنتیموان، کلرید روی، دی‌سیانودی‌آمید و دکا برموفنیل‌اکسید به‌طور گسترده به عنوان عامل دیرسوزکننده مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۱، ۱۲]. با وجود نگرانی‌های زیست‌محیطی در ارتباط با ترکیبات هالوژن دار، هنوز از این مواد دیرسوزکننده به‌طور گسترده در پلی‌اولفین‌ها استفاده می‌شود [۱۳، ۱۴]. هیدروکسیدهای فلزی از دیگر مواد دیرسوزکننده‌ای هستند که برای کاربرد در پلی‌اولفین‌ها مناسب هستند [۱۵، ۱۶]. این هیدروکسیدها معمولاً بر پایه آلومینیوم و منیزیم بوده و به صورت ترکیبات هیدراته مؤثرتر عمل می‌کنند. تجزیه این ترکیبات از یک طرف منجر به تولید بخار آب می‌شود که موجب رقیق‌تر شدن گازهای قابل اشتعال شده و از طرف دیگر گرمای مورد نیاز برای دهیدراته کردن آن‌ها از گسترش آتش ممانعت می‌کند. همچنین هیدروکسیدهای فلزی از طریق جذب مواد کربنی موجب کاهش دود می‌شوند [۴، ۳]. گرافیت منبسط‌شونده از دیگر مواد دیرسوزکننده برای بهبود خواص آتش‌گیری پلی‌اولفین‌ها و کامپوزیت‌های حاصل از آن‌هاست [۱۷-۲۰]. این ترکیب متشکل از لایه‌های گرافیتی است که ماده‌ای متورم‌شونده نظیر اسیدسولفوریک یا پرمنگنات پتاسیم بین آن‌ها وارد شده است. هنگام آتش‌گیری و افزایش دما، ماده متورم‌شونده تبخیر شده و لایه‌های گرافیت را از هم باز می‌کند. گرافیت

پژوهش‌های گسترده‌ای که در زمینه سازگاری الیاف با ماده زمینه پلیمری و بهبود خواص مهندسی این فرآورده انجام گرفت، منجر به گسترش دامنه کاربرد آن در ساختمان‌سازی، صنایع کشتی‌سازی، قطعات اتومبیل و حتی صنایع هوافضا شد [۳]. اختلاط پلیمرهای گرم‌انرم با الیاف طبیعی، فرآورده جدیدی پدید می‌آورد که با غلبه بر محدودیت‌های هر کدام از مواد اولیه، مزیت‌های هر دو آن‌ها را داراست. این فرآورده برخلاف چوب و الیاف طبیعی در برابر رطوبت، حمله حشرات، پوسیدگی و تاب‌خوردگی مقاوم بوده و از طرف دیگر در مقایسه با پلیمر خالص، دارای مدول و استحکام بالاتر، پایداری ابعادی بهتر و خیز کمتر است. به‌علاوه این محصول، جلوه و ظاهری شبیه چوب داشته و به حداقل اقدامات لازم برای محافظت و نگهداری نیاز دارد. [۴] با وجود تمام مزایایی که کامپوزیت چوب پلاستیک دارد، عملکرد آن در برابر آتش به‌عنوان یک نقطه‌ضعف اساسی مطرح است [۵]. همانند اکثر مواد آلی، چوب و پلیمر در برابر آتش بسیار حساس هستند. چوب و الیاف طبیعی ماهیت غیر ترموپلاستیکی داشته و از این رو برخلاف پلیمرها، دمای تجزیه حرارتی آن‌ها پایین‌تر از دمای انتقال شیشه و دمای ذوب بوده و بدون ذوب شدن دچار تجزیه حرارتی می‌شوند [۵]. حرارت آزادشده از احتراق پلیمرهای معمول مانند پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن حدود ۳ برابر بیشتر از چوب است [۶]. به علت وجود پلیمر در ساختار کامپوزیت چوب پلاستیک، این فرآورده در مقایسه با چوب ریسک آتش‌گیری بالاتری دارد از این رو بهبود رفتار کامپوزیت چوب پلاستیک در برابر آتش، به‌منظور برآورده کردن الزامات ایمنی این فرآورده از اهمیت بسزایی برخوردار است [۷، ۸].

فرآیند آتش‌گیری از ۵ مرحله اساسی تشکیل می‌شود که عبارت‌اند از حرارت‌دهی<sup>۱</sup>، تجزیه<sup>۲</sup>، احتراق<sup>۳</sup>، اشتعال و انتشار آتش. اغلب تلاش‌ها برای بهبود رفتار آتش‌گیری، با ایجاد اختلال در هر یک از این ۵ مرحله، حاصل می‌شود [۷]. استراتژی‌های مختلفی برای این منظور به کار می‌رود. یکی از مهم‌ترین راهبردها استفاده از مواد افزودنی دیرسوزکننده در ترکیب کامپوزیت است. برخلاف چوب که معمولاً به‌وسیله محلول نمک‌های ضد آتش مانند

مورد استفاده مالئیک انیدرید پیوند شده با پلی اتیلن (PE-g-MA) محصول شرکت سیگما آلدریج با چگالی ۰/۹۱۲ گرم بر سانتی متر مکعب، ویسکوزیته ۵۰۰ سانتی پواز (در دمای ۱۴۰ درجه سانتی گراد) و حاوی ۱ درصد مالئیک انیدرید پیوند زده شده بود. همچنین از آرد چوب مخلوط پهن برگان تهیه شده از شرکت آریا سلولز به عنوان ماده پرکننده با اندازه ابعاد ۱۵۰ میکرون استفاده گردید.

### روش‌ها

#### فرآیند اختلاط و ساخت نمونه‌های آزمونی

فرآیند اختلاط مواد مطابق جدول ۱ توسط دستگاه مخلوط‌کن داخلی<sup>۳</sup> (مدل HBI System 90 ساخت شرکت آمریکایی Haake Buchler) در دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد با سرعت ۶۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. ابتدا پلی اتیلن به داخل دستگاه مخلوط‌کن ریخته شده و پس از اطمینان از ذوب شدن آن، هم‌زمان ماده سازگارکننده و کندسوزکننده اضافه شدند. پس از ثابت شدن گشتاور دستگاه، آرد چوب به ترکیب اضافه شد. آمیزه تولیدشده، پس از سرد شدن دوباره آسیاب شد. سپس به دستگاه قالب‌گیری تزریقی<sup>۴</sup> نیمه‌صنعتی (مدل EM80 ساخت شرکت ایمن ماشین) منتقل شد. در این دستگاه گرانول‌ها ابتدا ذوب شده و بعد با فشار زیاد به داخل قالب شلیک شدند. دمای سیلندر تزریق ۱۸۰ درجه سانتی گراد، فشار تزریق ۱۰۰ بار، زمان دوره تزریق ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد، در نهایت نمونه‌های آزمونی از قالب بیرون آورده شدند. برای اطمینان از شرایط یکنواخت دمایی و رطوبتی، تمام نمونه‌های آزمونی مطابق با استاندارد (ASTM D618 (۲۰۱۳) [۲۳] به مدت یک هفته در دمای ۲۳ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی ۵۰٪ قرار داده شدند تا با رطوبت و دمای محیط به تعادل برسند.

متورم شده ساختار کرم-مانندی<sup>۱</sup> را به وجود می‌آورد که به‌عنوان لایه عایق عمل می‌کند [۱۶، ۱۸].

مواد دیرسوزکننده بر اساس ماهیتشان می‌توانند به‌صورت شیمیایی یا فیزیکی عمل کنند. روش‌های شیمیایی از طریق مداخله رادیکال‌های آزاد در فرآیند سوختن و ممانعت از گسترش آتش به قسمت‌های داخلی صورت می‌گیرند. روش‌های فیزیکی با کاهش دمای محیط از طریق واکنش‌های گرماگیر، جلوگیری از انتشار آتش با جایگزینی اکسیژن با گازهای غیرقابل اشتعال و تسهیل شکل‌گیری لایه سطحی محافظتی غیرقابل نفوذ، انجام می‌شوند [۲۱، ۲۲].

معمولاً مواد دیرسوزکننده، هم‌زمان از طرق چند مکانیسم مختلف عمل می‌کنند. از آنجایی که استفاده از ترکیبات دیرسوزکننده هالوژن‌دار مشکلات زیست‌محیطی در پی دارد، این تحقیق با هدف توسعه سیستم دیرسوزکنندگی بر پایه ترکیب چند مکانیسم و بدون استفاده از ترکیبات هالوژن‌دار طراحی شده است. بر این اساس، گرافیت به‌عنوان عامل خود متورم‌شونده<sup>۲</sup> همراه با سه عامل دیرسوزکننده: آلومنیوم‌تری‌هیدروکسید به‌عنوان دیرسوزکننده هیدروکسید فلزی، ملامین بورات و فسفات غیرآلی به‌عنوان عامل محرک تشکیل لایه ذغالی مورد استفاده قرار گرفتند. انتظار می‌رود، ترکیب گرافیت متورم‌شونده با آلومنیوم‌تری‌هیدروکسید، فسفات غیرآلی و ملامین بورات لایه ذغالی متراکمی را روی سطح کامپوزیت‌ها پدید آورد که می‌تواند به‌عنوان لایه عایق از عبور گرما و گازهای تولیدشده ممانعت کند. تأثیر ترکیبات مختلف مواد دیرسوزکننده بر روی رفتار آتش‌گیری کامپوزیت‌های چوب‌پلاستیک با استفاده از آزمون گرماسنجی مخروطی و اندازه‌گیری شاخص اکسیژن حدی مورد ارزیابی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

#### مواد

در این پژوهش، از پلی اتیلن سنگین (HDPE) گرید تجاری I3 با شاخص جریان مذاب ۸ گرم بر ده دقیقه و چگالی ۰/۹۵۷ گرم بر سانتی متر مکعب، محصول شرکت پتروشیمی مارون استفاده شد. ماده جفت‌کننده

1- Worm-like

2- Self-intumescent compound

1- Hakke Internal Mixer

2- Injection Molding

جدول ۱- درصد وزنی اجزای تشکیل دهنده ترکیب تیمارهای مختلف

شماره تیمار	کد تیمار	پلی اتیلن	آرد چوب	گرافیت متورم شونده EG	هیدروکسید ATH آلومینیوم تری	فسفات غیر آلی IP	ملاچین MB پورات	روان ساز	سازگار کننده
۱	PE	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-
۲	WPC	۵۲	۴۰	-	-	-	-	۵	۴
۳	WPC+10%EG	۴۲	۴۰	۱۰	-	-	-	۵	۳
۴	WPC+5%EG+5%ATH	۴۲	۴۰	۵	۵	-	-	۵	۴
۵	WPC+5%EG+5%IP	۴۲	۴۰	۵	-	۵	-	۵	۳
۶	WPC+5%EG+5%MB	۴۲	۴۰	۵	-	-	۵	۵	۳

### اندازه‌گیری خواص آتش‌گیری

خواص آتش‌گیری کامپوزیت‌ها بر اساس استاندارد (۲۰۱۶) ASTM E 1354 [۲۴] با استفاده از دستگاه گرماسنج مخروطی (مدل Cone 2 Atlas) اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها به صورت ورقه‌ای با ابعاد  $100 \times 100 \times 3 \text{ mm}^3$  تهیه و تحت سوختن ملایم با اعمال شار گرمایی  $\text{kW/m}^2$  ۳۵ قرار گرفتند. این آزمون، اطلاعاتی نظیر حرارت آزاد شده<sup>۱</sup>، ذغال باقی‌مانده<sup>۲</sup> و زمان آتش‌گیری<sup>۳</sup> را ارائه می‌دهد. همچنین برای اندازه‌گیری میزان اشتعال‌پذیری و اثر بازدارنده‌های اشتعال روی نمونه‌ها از روش اندازه‌گیری حداقل اکسیژن مورد نیاز برای سوختن بر اساس استاندارد (۲۰۱۳) ASTM D 2863 [۲۵] استفاده شد. در این روش حداقل اکسیژن لازم در یک مخلوط نیتروژن و اکسیژن برای سوختن ۲ اینچ یا زمان ۳ دقیقه از سوختن نمونه بر حسب درصد به‌عنوان شاخص اکسیژن حدی<sup>۴</sup> در نظر گرفته شد. برای این آزمون از نمونه‌هایی با ابعاد  $3 \text{ mm}^3 \times 50$  استفاده شد. کلیه آزمون‌ها با سه تکرار برای هر تیمار انجام شد.

### اندازه‌گیری خواص مکانیکی

آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد (۲۰۱۵)

ASTM D 790 [۲۶] توسط دستگاه تست مکانیکی (اینسترون مدل ۱۱۸۶) با نرخ کرنش  $0.1$  میلی‌متر و سرعت بارگذاری  $5$  میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. ابعاد اسمی نمونه‌ها  $5 \times 13 \times 100$  میلی‌متر و طول دهانه  $80$  میلی‌متر بوده است. همچنین آزمون کشش مطابق استاندارد (۲۰۱۴) ASTM D638 [۲۷] بر روی نمونه‌های دمبلی شکل با ابعاد  $3 \times 10 \times 167$  میلی‌متر توسط دستگاه تست مکانیکی (اینسترون مدل ۱۱۸۶) انجام شد. در آزمون کشش طول دهانه  $100$  میلی‌متر و سرعت بارگذاری  $2$  میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. مقاومت به ضربه فاق‌دار نمونه‌ها بر اساس استاندارد (۲۰۱۰) ASTM D 256 [۲۸] توسط دستگاه ضربه مدل  $5102$  ساخت شرکت Zwick در دمای محیط اندازه‌گیری شد. آزمون‌های مکانیکی برای هر تیمار با  $5$  تکرار انجام شد.

### اندازه‌گیری خواص فیزیکی

برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها روند جذب آب و واکنش‌پذیری ضخامت مطابق استاندارد (۲۰۱۱) ASTM D 7031 [۲۹] مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها به مدت  $24$  ساعت در دمای  $20 \pm 1^\circ \text{C}$  در  $103$  در داخل آن خشک شدند. پس از آن وزن و ضخامت نمونه‌های خشک‌شده با ترازوی دیجیتالی با دقت  $0.001$  گرم و میکرومتر با دقت  $0.001$  میلی‌متر اندازه‌گیری شدند، سپس به مدت یک هفته ( $168$  ساعت) در آب

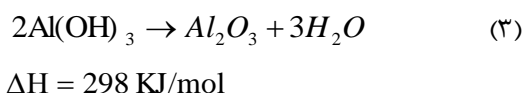
1 Heat Release Rate (HRR)

2 Char Residual (CR)

3 Time to Ignition (TTI)

4 Limiting Oxygen Index (LOI)

اضافه شدن آرد چوب به پلیمر مقدار حرارت آزاد شده کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که حرارت آزاد شده از احتراق پلیمرهای معمول مانند پلی‌اتیلن حدود ۳ برابر بیشتر از چوب است [۶] این مسئله طبیعی به نظر می‌رسد. در کامپوزیت‌های چوب پلاستیک با جایگزینی بخشی از ماده زمینه پلیمری با پرکننده‌های لیگنوسلولزی به همان نسبت مقدار حرارت آزاد شده طی احتراق کاهش می‌یابد. با اضافه شدن مواد دیرسوزکننده به فرمولاسیون کامپوزیت‌های چوب پلاستیک، کاهش مقدار حرارت آزاد شده شدت بیشتری پیدا می‌کند. حضور گرافیت و سایر دیرسوزکننده‌ها همراه با گرافیت، موجب کاهش مقدار حرارت آزاد شده طی احتراق می‌شود. این اثر کاهش در حالت استفاده هم‌زمان از دو نوع ماده دیرسوزکننده (گرافیت + سایر مواد دیرسوزکننده) شدت بیشتری پیدا می‌کند. بطوریکه کمترین مقدار حرارت آزاد شده در کامپوزیت دارای ۵ درصد گرافیت متورم‌شونده (EG) همراه با ۵ درصد آلومینیوم‌تری‌هیدروکسید (ATH) مشاهده می‌شود. لایه تشکیل شده در اثر تورم گرافیت مانع انتشار گازهای فرار حاصل از هیدرولیز شده و شدت آتش را کاهش می‌دهد. تورم گرافیت با افزایش شدید حجم آن همراه بوده و به لایه‌های داخلی فشار اعمال می‌کند [۱۴]. همچنین ATH با تشکیل ذرات پرز-مانند<sup>۱</sup> موجب تشدید شکل‌گیری لایه ذغالی متراکم بر روی سطح EG می‌شود [۱۶]. ممانعت و انسدادی که گرافیت متورم شونده ایجاد می‌کند، در نهایت منجر به کاهش حرارت آزاد شده در اثر احتراق می‌گردد. ATH (2Al(OH)<sub>3</sub>) که به‌عنوان یک دیرسوزکننده ارزان‌قیمت و کارآمد برای مواد پلاستیکی مطرح است، در دمای ۲۲۰ درجه سلسیوس شروع به تجزیه حرارتی می‌کند [۱]. این ترکیب طبق واکنش گرماگیر زیر تجزیه شده و علاوه بر مصرف انرژی محیط، آب تولید می‌کند [۱۲].



آب تولید شده طی واکنش، آزاد شده و موجب رقیق شدن گازهای قابل اشتعال می‌گردد. با کاهش غلظت

مقطر در دمای معمولی اتاق قرار داده شدند و در پایان این فاصله زمانی نمونه‌ها را از آب خارج کرده و سطح آن‌ها را با دستمال کاغذی خشک کرده و بلافاصله وزن و ضخامت آن‌ها اندازه‌گیری شد. در نهایت، میزان جذب آب و واکنش‌پذیری ضخامت با استفاده از روابط زیر محاسبه شد.

$$M = \frac{m_t - m_o}{m_o} \times 100 \quad (1)$$

M میزان جذب رطوبت در زمان غوطه‌وری t (درصد)، m<sub>o</sub> وزن خشک نمونه قبل از غوطه‌وری (گرم)، m<sub>t</sub> وزن نمونه در زمان غوطه‌وری t (گرم) است.

$$TS = \frac{T_t - T_o}{T_o} \times 100 \quad (2)$$

TS واکنش‌پذیری ضخامت در زمان غوطه‌وری t (درصد)، T<sub>o</sub> ضخامت نمونه در حالت خشک (میلی‌متر)، T<sub>t</sub> ضخامت نمونه در زمان غوطه‌وری t (میلی‌متر) است.

### تجزیه و تحلیل نتایج

نتایج با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS Version 16 در قالب طرح تجزیه واریانس یک‌طرفه در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در صورت وجود اختلاف معنی‌دار، مقایسه و گروه‌بندی میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام شد.

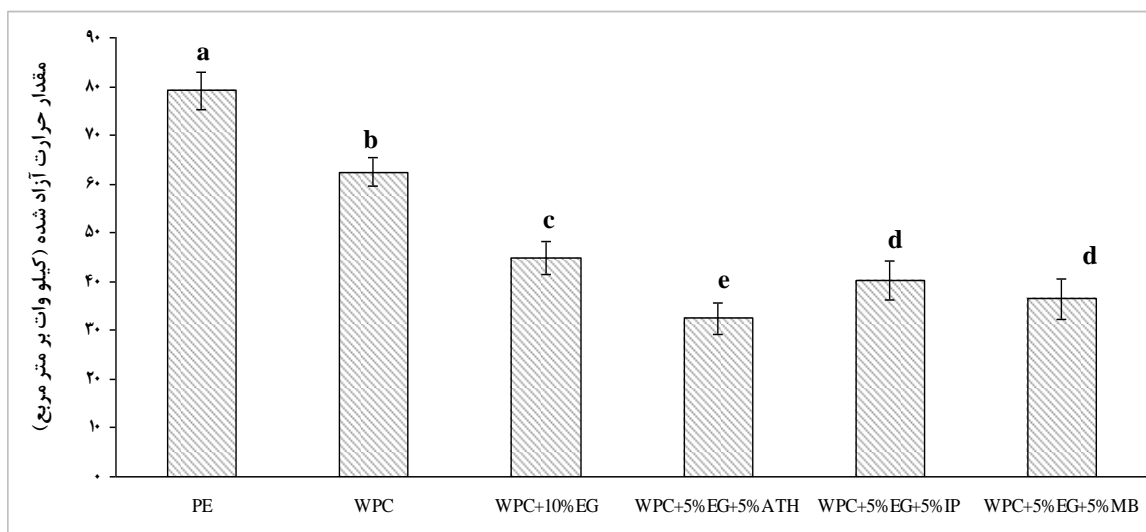
### نتایج و بحث

#### خواص آتش‌گیری

تجزیه واریانس نتایج حاصله نشان داد که تأثیر مواد دیرسوزکننده بر روی خواص آتش‌گیری کامپوزیت‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. مقدار حرارت آزاد شده تیمارهای مختلف در شکل ۱ ارائه شده است. این پارامتر مهم‌ترین شاخص مورد اندازه‌گیری در آزمون گرماسنجی مخروطی بوده و نشان‌دهنده شدت آتش است. مقدار حرارت آزاد شده در ۱ تا ۳ دقیقه ابتدایی احتراق، اطلاعات ارزشمندی درباره گسترش آتش ارائه می‌دهد و رابطه مستقیم با خطرات احتمالی ناشی از آتش‌سوزی دارد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار حرارت آزاد شده مربوط به پلی‌اتیلن خالص است. با

گرماگیر، رادیکال‌های آزاد تولید می‌کند. واکنش گرماگیر از مقدار حرارت آزاد شده می‌کاهد و رادیکال‌های آزاد در واکنش‌های پیرولیز تداخل ایجاد می‌کنند. نیتروژن و آمونیاک حاصل از تجزیه حرارتی ملامین، با گازهای قابل اشتعال مخلوط شده و آن‌ها را رقیق می‌سازند. گازهای حاصل از این ماده دیرسوزکننده به‌عنوان عامل دمش<sup>۱</sup> موجب افزایش شکل‌گیری لایه ذغالی می‌گردد [۳۲]

مخلوط اکسیژن و گازهای قابل اشتعال، مقدار حرارت آزاد شده طی واکنش احتراق کاهش می‌یابد [۱۲]. فسفات غیرآلی در ترکیب با گرافیت متورم‌شونده با تشکیل لایه ذغالی و ممانعت از رسیدن اکسیژن، مقدار حرارت آزاد شده را کاهش می‌دهد [۴]. ملامین بورات (MB) از طریق چند مکانیسم متفاوت همراه با گرافیت متورم‌شونده در فرآیند دیرسوزی مشارکت می‌کند. این ماده دیرسوزکننده هنگام تجزیه حرارتی، طی یک واکنش



شکل ۱- تأثیر مواد دیرسوزکننده مختلف بر مقدار حرارت آزاد شده کامپوزیت‌های آرد چوب- پلی اتیلن (حروف کوچک لاتین بیانگر گروه‌بندی دانکن است)

۳۱/۴ درصد مشاهده شد. بور و فسفر موجود در ملامین بورات و فسفات غیرآلی می‌توانند به‌عنوان عامل محرک افزایش تشکیل لایه ذغالی عمل کنند. این دو عنصر مسیر واکنش‌های شیمیایی منجر به تولید مونوکسید و دی‌اکسید کربن را به سمت تولید ذغال تغییر می‌دهند [۳۲]. نتیجه، تشکیل لایه‌ای محافظتی خواهد بود که دسترسی اکسیژن و خروج گازهای قابل اشتعال را با مشکل مواجه می‌سازد. همچنین مشخص شده است که بور در واکنش با گروه‌های هیدروکسیل سلولز و همی سلولز چوب ضمن تولید آب موجب افزایش تشکیل ذغال می‌شود [۳۳].

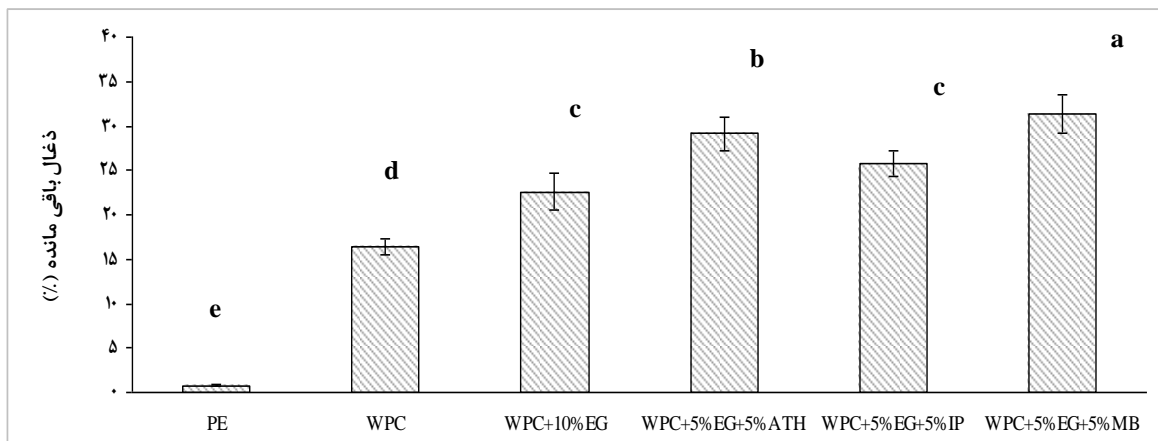
اثر مواد دیرسوزکننده مختلف بر زمان آتش‌گیری

مقدار ذغال باقی‌مانده پس از احتراق پلی اتیلن و کامپوزیت‌های حاصل از آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در زمینه تشریح مکانیسم عمل مواد دیرسوزکننده تئوری‌های مختلفی مطرح می‌شود. تئوری انسداد با فرض تشکیل لایه شیشه‌ای که موجب ممانعت از آزاد شدن گازهای فرار، جلوگیری از رسیدن اکسیژن به ماده و محافظت ماده در برابر دماهای بالا استوار است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تحت تأثیر مواد دیرسوزکننده، مقدار ذغال باقیمانده در کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. این مسئله بیانگر افزایش تشکیل لایه حفاظتی در اثر حضور مواد دیرسوزکننده است. کمترین مقدار ذغال باقیمانده در پلی اتیلن خالص برابر ۰/۸ درصد و بیشترین آن در کامپوزیت دارای ۵ درصد EG همراه با ۵ درصد MB برابر

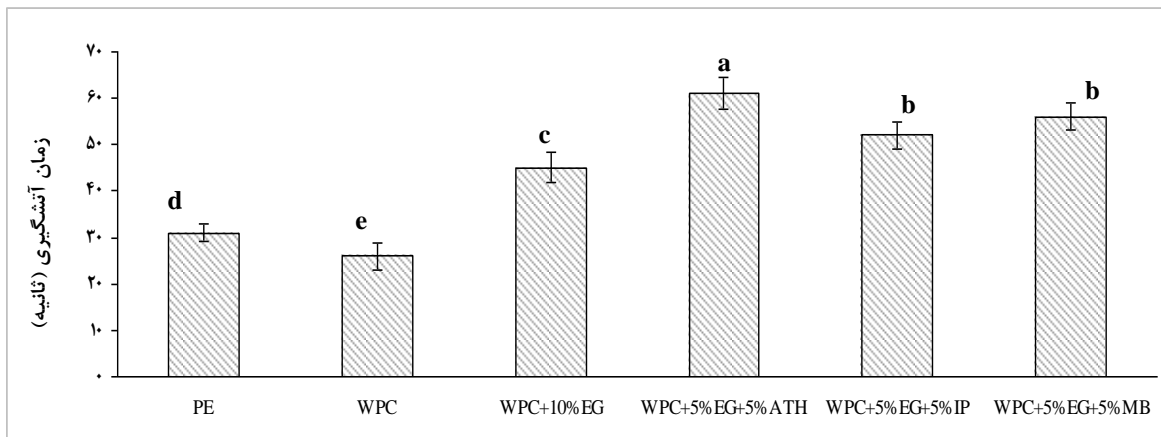
<sup>۱</sup> Blowing agent

چوب پلاستیک در مقایسه با پلی اتیلن خالص کاهش یافته است. این مسئله ناشی از تفاوت در ظرفیت گرمایی آرد چوب و پلی اتیلن است. ظرفیت گرمایی پایین تر آرد چوب ( $1/2 \text{ kJ/kg.K}$ ) در مقایسه با پلی اتیلن ( $1/9 \text{ kJ/kg.K}$ ) به این معنی است که آرد چوب به گرمای کمتری برای شروع احتراق نیاز دارد [۳۰].

پلی اتیلن و کامپوزیت‌های حاصل از آن در شکل ۳ نشان داده شده است. این پارامتر نشان دهنده مدت زمانی است که نمونه برای رسیدن به احتراق پایدار نیاز دارد و شاخصی از احتراق پذیری مواد است. از نقطه نظر بهبود خواص دیرسوزی، هر چه این زمان طولانی تر باشد، مطلوب تر است. همان گونه که مشاهده می شود، صرف نظر از تأثیر مواد دیرسوزکننده، زمان آتش گیری کامپوزیت



شکل ۲- تأثیر مواد دیرسوزکننده مختلف بر مقدار ذغال باقی مانده کامپوزیت‌های آرد چوب- پلی اتیلن



شکل ۳- تأثیر مواد دیرسوزکننده مختلف بر مدت زمان آتش گیری کامپوزیت‌های آرد چوب- پلی اتیلن

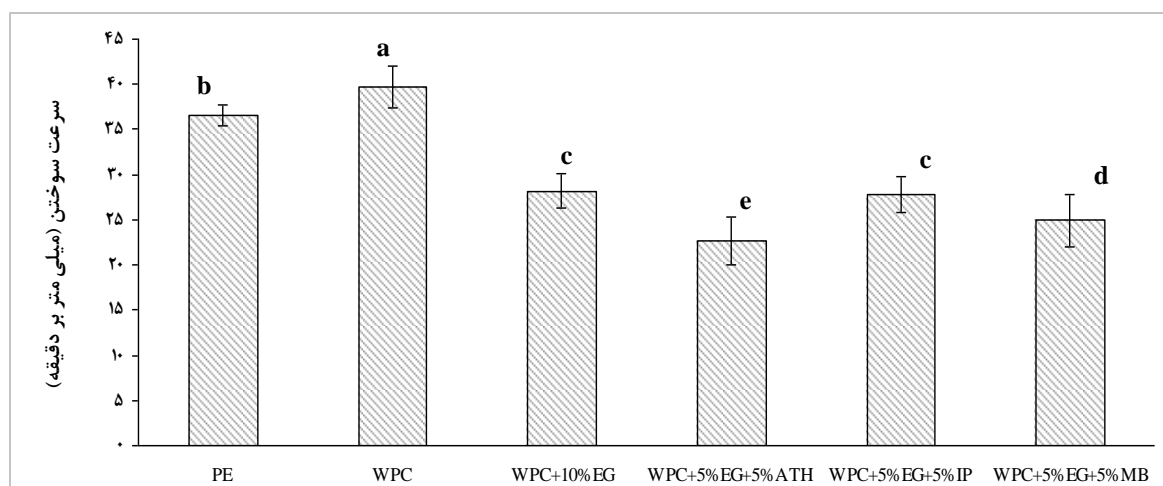
آتش گیری در چوب پلاستیک فاقد دیرسوزکننده برابر ۲۶ ثانیه و بیشترین آن در کامپوزیت دارای ۵ درصد EG همراه با ۵ درصد ATH برابر ۶۱ ثانیه مشاهده شد. زمان آتش گیری کامپوزیت حاوی EG و MB (۵۶ ثانیه) و

از این رو، حساسیت و آسیب پذیری کامپوزیت چوب پلاستیک نسبت به پلی اتیلن خالص در این زمینه بیشتر است. زمان آتش گیری کامپوزیت‌ها با حضور مواد دیرسوزکننده افزایش نشان داد. به طوری که کمترین زمان

می‌دهد، به طوری که بیشترین سرعت سوختن در کامپوزیت چوب پلاستیک فاقد دیرسوزکننده (۳۹/۴ mm/min) و بیشترین آن در کامپوزیت دارای ۵ درصد EG همراه با ۵ درصد ATH (۲۲/۷ mm/min) مشاهده شد. در مورد پارامترهای سرعت سوختن و زمان آتش‌گیری، هدایت حرارتی نقش مهمی را بازی می‌کند. هدایت حرارتی بالا موجب افزایش زمان آتش‌گیری و کاهش سرعت سوختن می‌شود. در صورتی که نمونه در معرض منبع حرارتی خارجی قرار گیرد، برای مواد با هدایت حرارتی بالاتر، انتقال دما از قسمت‌های گرم شده به سایر قسمت‌ها با سهولت بیشتری صورت گرفته و موجب کاهش دمای موضعی می‌شود و از این طریق سرعت سوختن را کاهش و زمان آتش‌گیری را افزایش می‌دهد. آلومنیوم تری هیدروکسید با هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی بالا از جمله مواد دیرسوزکننده‌ای است که با این مکانیسم عمل می‌کند. این ماده دیرسوزکننده از طریق آزاد کردن مقادیر قابل توجهی آب طی تخریب حرارتی نیز می‌تواند در کاهش سرعت سوختن مشارکت داشته باشد [۳۳]. می‌توان پایین تر بودن سرعت سوختن و بالاتر بودن زمان آتش‌گیری کامپوزیت‌های حاوی EG و ATH را نسبت به سایر تیمارها به این مسئله نسبت داد؛ که با یافته‌های Garcia و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی دارد [۳۱].

کامپوزیت حاوی EG و IP (۵۲ ثانیه) طولانی‌تر از زمان آتش‌گیری کامپوزیتی است که از EG به تنهایی به عنوان عامل دیرسوزکننده (۴۵ ثانیه) بهره می‌برد. افزایش زمان آتش‌گیری در کامپوزیت‌ها در اثر حضور مواد دیرسوزکننده از طریق چند مکانیسم مختلف صورت می‌گیرد. ATH بر اساس تئوری هدایت گرمایی عمل می‌کند. این تئوری بر پایه افزایش رسانایی گرمایی کامپوزیت استوار است که منجر به پخش یکسان انرژی گرمایی در سراسر ماده شده و از تجمع گرما و احتراق ممانعت می‌کند. تأثیر افزایش آلومنیوم تری هیدروکسید بر روی زمان آتش‌گیری در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است [۳۰، ۳۳]. مکانیسم دیگری که موجب طولانی‌تر شدن زمان آتش‌گیری کامپوزیت‌ها می‌شود، تشکیل لایه ذغالی است. به دلیل اثر هم‌افزای مواد دیرسوزکننده، شانس تشکیل این لایه ذغالی محافظ در کامپوزیت‌های حاوی دیرسوزکننده EG همراه با MB و IP بیشتر است و منجر به طولانی‌تر شدن زمان آتش‌گیری این کامپوزیت‌ها شده است.

سرعت سوختن پلی‌اتیلن و کامپوزیت‌های حاصل از آن در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کامپوزیت چوب پلاستیک در مقایسه با پلی‌اتیلن خالص با سرعت بیشتری دچار احتراق می‌شود. همچنین افزودن مواد دیرسوزکننده سرعت سوختن کامپوزیت‌ها را کاهش

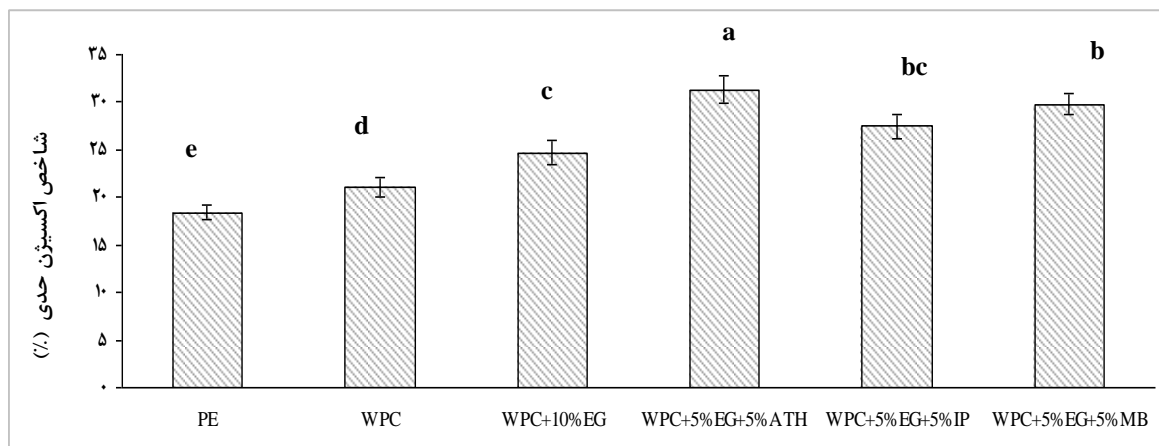


شکل ۴- تأثیر مواد دیرسوزکننده مختلف بر سرعت سوختن کامپوزیت‌های آرد چوب - پلی‌اتیلن



همراه با ۵ درصد آلومنیوم تری هیدروکسید (ATH) مشاهده می‌شود. لایه تشکیل شده در اثر تورم گرافیت مانع دسترسی به اکسیژن می‌شود. تجزیه حرارتی ATH منجر به تولید بخار آب می‌شود که موجب رقیق تر شدن اکسیژن می‌گردد. تأثیر مثبت گرافیت متورم شونده و آلومنیوم تری هیدروکسید در افزایش شاخص اکسیژن حدی فوم‌های پلی‌ایزوسیانات- پلی‌اورتان توسط Wang و همکاران (۲۰۱۳) نیز گزارش شده است [۱۶]. نیتروژن و آمونیاک حاصل از تجزیه حرارتی ملامین، از یک طرف به عنوان عامل دمش موجب افزایش شکل‌گیری لایه ذغالی می‌گردد و از طرف دیگر با رقیق‌سازی غلظت اکسیژن موجود، موجب افزایش شاخص اکسیژن حدی می‌شود [۳۳، ۳۲]. فسفات غیرآلی در ترکیب با گرافیت متورم‌شونده با تشکیل لایه ذغالی و ممانعت از رسیدن اکسیژن، نیاز به اکسیژن را افزایش می‌دهد [۳۲].

اثر مواد دیرسوزکننده مختلف بر روی شاخص اکسیژن حدی پلی‌اتیلن و کامپوزیت‌های حاصل از آن در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود شاخص اکسیژن حدی کامپوزیت چوب‌پلاستیک در مقایسه با پلی‌اتیلن خالص بالاتر است. این مسئله به این معنی است که خاموش کردن آتش کامپوزیت چوب‌پلاستیک نسبت به پلی‌اتیلن خالص راحت‌تر صورت می‌گیرد. اکثر روش‌های اطفای حریق از طریق ممانعت از رسیدن اکسیژن به منبع آتش عمل می‌کنند. از آنجایی که مواد با شاخص اکسیژن حدی بالاتر برای مشتعل ماندن نیاز به غلظت بیشتری از اکسیژن دارند، با سهولت بیشتری خاموش خواهند شد [۴]. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در اثر حضور مواد دیرسوزکننده شاخص اکسیژن حدی کامپوزیت‌ها افزایش یافته است که حاکی از بهبود خواص دیرسوزی آن‌هاست. بهترین عملکرد در کامپوزیت دارای ۵ درصد گرافیت متورم‌شونده (EG)



شکل ۵- تأثیر مواد دیرسوزکننده مختلف بر شاخص اکسیژن حدی کامپوزیت‌های آرد چوب- پلی‌اتیلن

نسبت داد. در واقع حضور ماده کندسوزکننده موجب می‌شود که سطح مشترک بین آرد چوب و پلی‌اتیلن (منطقه بین‌فازی) به خوبی خیس نشده و در نتیجه کیفیت اتصال و به تبع آن استحکام مکانیکی کامپوزیت کاهش یابد [۴، ۷ و ۱۹]. از طرف دیگر به علت تجزیه حرارتی مواد کندسوزکننده و تولید بخار آب در طی فرآیند ساخت، باعث ایجاد حفراتی در داخل نمونه شده که این امر نیز سبب کاهش خواص مکانیکی در کامپوزیت می‌شود [۳ و ۱۹].

### خواص مکانیکی

نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر مواد کندسوزکننده بر ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، استحکام کششی، خمشی و مقاومت به ضربه نمونه‌ها در اثر حضور مواد کندسوزکننده کاهش می‌یابد. کاهش خواص مکانیکی در کامپوزیت را می‌توان به چسبندگی ضعیف بین مواد پرکننده و ماده زمینه پلیمری

جدول ۲- خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چوب پلاستیک تحت تأثیر مواد دیرسوزکننده مختلف

شماره تیمار	کد تیمار	مقاومت کششی (مگاپاسگال)	مدول کششی (مگاپاسگال)	مقاومت خمشی (مگاپاسگال)	مدول خمشی (مگاپاسگال)	مقاومت به ضربه فاق دار (کیلوژول بر مترمربع)
۱	PE	۲۳/۰۹ <sup>c</sup>	۱۳۵۰/۲۲ <sup>c</sup>	۲۴/۳۶ <sup>d</sup>	۱۵۵۰/۴۵ <sup>d</sup>	۲/۵ <sup>a</sup>
۲	WPC	۲۶/۱۴ <sup>a</sup>	۱۵۲۸/۴۹ <sup>a</sup>	۲۷/۴۱ <sup>a</sup>	۱۷۸۵/۴۳ <sup>a</sup>	۲/۲ <sup>a</sup>
۳	WPC+10%EG	۲۴/۸۳ <sup>b</sup>	۱۳۹۲/۶۳ <sup>c</sup>	۲۵/۱۸ <sup>c</sup>	۱۶۰۵/۰۷ <sup>c</sup>	۱/۷ <sup>b</sup>
۴	WPC+5%EG+5%ATH	۲۵/۶۷ <sup>a</sup>	۱۴۷۳/۵۱ <sup>b</sup>	۲۶/۷۵ <sup>ab</sup>	۱۶۹۳/۶۹ <sup>b</sup>	۱/۹ <sup>b</sup>
۵	WPC+5%EG+5%IP	۲۵/۰۵ <sup>ab</sup>	۱۴۳۸/۹۲ <sup>b</sup>	۲۶/۳۹ <sup>b</sup>	۱۶۵۸/۲۴ <sup>b</sup>	۱/۸ <sup>b</sup>
۶	WPC+5%EG+5%MB	۲۴/۹۱ <sup>b</sup>	۱۴۱۹/۳۴ <sup>b</sup>	۲۶/۱۲ <sup>b</sup>	۱۶۲۷/۵۳ <sup>bc</sup>	۱/۸ <sup>b</sup>

### خواص فیزیکی

نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر مواد کندسوزکننده بر ویژگی‌های فیزیکی کامپوزیت‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی دار است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نمونه‌ها در اثر حضور مواد کندسوزکننده افزایش می‌یابد. دلیل این

مسئله را می‌توان این‌گونه بیان کرد که مواد کندسوزکننده از طریق کاهش چسبندگی در سطح اتصال (منطقه بین فاز) و تشکیل حفرات، دسترسی به گروه‌های هیدروکسیل که نقش اساسی در جذب رطوبت دارند را آسان‌تر نموده و منجر به افزایش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در کامپوزیت می‌گردد [۱۲ و ۳۱].

جدول ۳- خواص فیزیکی کامپوزیت‌های چوب پلاستیک تحت تأثیر مواد دیرسوزکننده مختلف

شماره تیمار	کد تیمار	جذب آب (درصد)	واکنشیدگی ضخامت (درصد)
۱	PE	۰/۱۷ <sup>d</sup>	۰/۰۹ <sup>d</sup>
۲	WPC	۵/۴۳ <sup>c</sup>	۲/۶۳ <sup>c</sup>
۳	WPC+10%EG	۷/۷۵ <sup>ab</sup>	۴/۷۲ <sup>b</sup>
۴	WPC+5%EG+5%ATH	۷/۴۹ <sup>b</sup>	۴/۵۱ <sup>b</sup>
۵	WPC+5%EG+5%IP	۸/۰۵ <sup>a</sup>	۵/۴۸ <sup>a</sup>
۶	WPC+5%EG+5%MB	۶/۲۱ <sup>c</sup>	۳/۱۶ <sup>c</sup>

### نتیجه‌گیری

در پژوهش اخیر اثر مواد دیرسوزکننده مختلف بر رفتار آتش‌گیری کامپوزیت‌های آردچوب- پلی اتیلن مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، کامپوزیت‌های حاوی مواد دیرسوزکننده مختلف، با فرایند اختلاط مذاب ساخته شد و آزمون گرماسنجی مخروطی، اندازه‌گیری شاخص اکسیژن حدی و آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی بر روی آن‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد افزودن مواد

دیرسوزکننده به فرمولاسیون کامپوزیت‌های چوب پلاستیک موجب کاهش مقدار حرارت آزاد شده و سرعت سوختن و افزایش زمان لازم برای آتش‌گیری و مقدار ذغال باقی‌مانده می‌شود. کامپوزیت چوب پلاستیک در مقایسه با پلی اتیلن خالص حرارت کمتری تولید کرد. کمترین مقدار حرارت آزاد شده در کامپوزیت دارای ۵ درصد گرافیت متورم‌شونده (EG) همراه با ۵ درصد آلومینیوم‌تری‌هیدروکسید (ATH) مشاهده شد. این تیمار

مشخص شد که در اثر حضور مواد دیرسوزکننده، مواد برای مشتعل باقی ماندن به غلظت بیشتری از اکسیژن نیاز خواهند داشت. جمع بندی یافته‌ها آشکار ساخت که در حالت استفاده از دو نوع ماده دیر سوزکننده همراه هم یعنی گرافیت متورم شونده همراه با دیگر مواد دیرسوزکننده نسبت به حالت استفاده از گرافیت تنها، نتایج بهتری حاصل می‌شود. بطوریکه کامپوزیت دارای ۵ درصد EG همراه با ۵ درصد ATH تقریباً مطلوب ترین خواص را دارا بود. نتایج آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی نشان داد که در اثر حضور مواد دیرسوزکننده استحکام کششی و خمشی (مقاومت و مدول الاستیسیته) و مقاومت به ضربه فاق دار نمونه‌ها کاهش و جذب آب و واکنشیدگی ضخامت افزایش می‌یابد. یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که مواد دیرسوزکننده علیرغم بهبود فراوان رفتار آتش‌گیری کامپوزیت چوب پلاستیک، اثر منفی بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی آن داشتند. لذا توصیه می‌شود، استفاده از این مواد در فرمولاسیون کامپوزیت به‌ویژه برای شرایط سرویس که استحکام مکانیکی و پایداری ابعادی آن از اهمیت بالاتری برخوردار است، با حساسیت بیشتری انجام گیرد.

در اکثر خواص مورد مطالعه بهترین عملکرد را نشان داد. این مسئله از یک طرف به ممانعت و انسداد ایجادشده توسط گرافیت متورم‌شونده و از طرف دیگر به تجزیه حرارتی گرماگیر آلومنیوم‌تری‌هیدروکسید که طی واکنش آب نیز تولید می‌کند، نسبت داده شد. بیشترین مقدار ذغال باقیمانده که به‌نوعی بیانگر افزایش تشکیل لایه ذغالی حفاظتی است در کامپوزیت دارای ۵ درصد EG همراه با ۵ درصد MB مشاهده شد. علت این امر، به بور و فسفر موجود در ملامین بورات و فسفات غیرآلی نسبت داده شد که به‌عنوان عامل محرک افزایش تشکیل لایه ذغالی عمل می‌کنند. زمان آتش‌گیری، یعنی مدت زمان لازم برای رسیدن به احتراق پایدار افزایش یافت. این پدیده به افزایش ظرفیت گرمایی و هدایت حرارتی در اثر حضور مواد دیرسوزکننده نسبت داده شد که موجب پخش یکسان انرژی گرمایی در سراسر ماده شده و از تجمع گرما و احتراق ممانعت می‌کند. همچنین مشخص شد که کامپوزیت چوب پلاستیک در مقایسه با پلی‌اتیلن خالص به زمان و گرمای کمتری برای شروع احتراق نیاز داشته و با سرعت بیشتری دچار احتراق می‌شود و از این لحاظ آسیب‌پذیرتر است. شاخص اکسیژن حدی به‌عنوان مبنایی برای مقایسه اشتعال‌پذیری مواد مورد مطالعه قرار گرفت و

## منابع

- [1] Chapple, S. and Anandjiwala, R., 2010. Flammability of natural fiber-reinforced composites and strategies for fire retardancy: A review. *Journal of Thermoplastic Composites*, 23:871–893.
- [2] Puglia, D., Biagiotti, J. and Kenny, J.M., 2004. A review on natural fibre-based composites-Part II: application of natural reinforcements in composite materials for automotive industry. *Journal of Natural Fibers*, 1(3): 23–65.
- [3] Giancaspro, J., Papakonstantinou, C. and Balaguru, P., 2009. Mechanical Behavior of fire-resistant biocomposite, *Composites: Part B*, 40(3): 206–211.
- [4] Stark, N. M., White R. H., Mueller, S. A. and Osswald, T. A., 2010. Evaluation of various fire retardants for use in wood flour polyethylene composites, *Polymer Degradation and Stability*, 95:1903–1910.
- [5] Horrocks, A.R., 1983. An introduction to the burning behavior of cellulosic fibers, *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 99:191–197.
- [6] Seefeldt, H. and Braun, U., 2012. A new flame retardant for wood materials tested in wood-plastic composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 297 (8):814–820.
- [7] Sain, M., Park, S. H., Suhara, F. and Law, S., 2004. Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide. *Polymer Degradation and Stability*, 83:363–367

- [8] Abu Bakar, M. B., Ishak, Z. A. M., Taib, R. M., Rozman, H. D. and Jani, S. M., 2010. Flammability and mechanical properties of wood flour-filled polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 116: 2714–2722.
- [9] Laufenberg, T., Ayrilmis, N. and White, R. H., 2006. Fire and bending properties of blockboard with fire retardant treated veneers. *Holz Roh Werkst*, 64:137–143.
- [10] Fanga, Y., Wanga, Q., Guoa, Ch., Songa, Y. and Cooper P. A., 2013. Effect of zinc borate and wood flour on thermal degradation and fire retardancy of Polyvinyl chloride (PVC) composites. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 100: 230–236.
- [11] Andreas, M. and Hartmut, W., 2001. Injection molding of natural fibre reinforced thermoplastics. *Kunststoffe Plast Europe 2001*; 91:25–27.
- [12] Nikolaeva, M. and Karki, T., 2011. A review of fire retardant processes and chemistry with discussion of the case of wood plastic composites. *Baltic Forestry*, 17(2):314–326.
- [13] White, R. H., Diertenberger, M. A. and Stark, N. M., 2007. Cone calorimeter tests of wood-based decking materials. In: *Proceedings eighteenth annual BCC conference on flame retardancy*. May 21–23, Stamford, CT., p 326–337.
- [14] Georlette, P., Simons, J. and Costa, L., 2000. Fire retardancy of polymeric materials: halogen-containing fire-retardant compounds. Marcel Dekker, Inc. New York, USA, 245 p.
- [15] Weil, E. D., 2000. Fire retardancy of polymeric materials: synergists, adjuvant, and antagonists in flame-retardant systems. Marcel Dekker, Inc. New York, USA, 115 p.
- [16] Wang, W., He, K., Dong, Q., Fan, Y., Zho, N., Xia, Y., Li, H., Wang, J., Yuan, Zh., Wang, E., Wang, X. and Ma, H., 2013. Influence of aluminum hydroxide and expandable graphite on the flammability of polyisocyanurate-polyurethane foams. *Applied Mechanics and Materials*, 368-370: 741-746.
- [17] Wang, Z., Han, E. and Ke, W., 2007. Influence of expandable graphite on fire resistance and water resistance of flame-retardant coatings. *Corrosion Science*, 49: 2237–2253
- [18] Seefeldt, H., Braun, U. and Wagner, M. H., 2012. Residue Stabilization in the fire retardancy of wood-plastic composites: Combination of ammonium polyphosphate, expandable graphite, and red phosphorus. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 213(22):2370–2377.
- [19] Bai, G., Guo, Ch. and Li, L., 2014. Synergistic effect of intumescent flame retardant and expandable graphite on mechanical and flame-retardant properties of wood flour-polypropylene composites. *Construction and Building Materials*, 50: 148–153.
- [20] Hua, L. and Wang, Zh., 2012. Flame Retardant and Mechanical Properties of Expanded Polystyrene Foams Containing Aluminum Phosphinate and Expandable Graphite. In: *International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (AEECE)*. September 26-27, Changsha, China, p 223–226.
- [21] Moon, S. C., Jo, B. W. and Farris, R. J., 2009. Flame resistance and foaming properties of NBR compounds with halogen-free flame-retardants. *Polymer Composites*, 30: 1732-1742.
- [22] Hull, R. and Kandola, B. K., 2009. Fire retardancy of polymers: New strategies and mechanisms, Royal Society of Chemistry, Burlington House, London, UK, 456 p.
- [23] Standard practice for conditioning plastics for testing. *Annual Book of ASTM Standard*, D618, 2013.
- [24] Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter. *Annual Book of ASTM Standard*, E1354, 2016.

- [25] Standard test method for measuring the minimum oxygen concentration to support candle-like combustion of plastics (oxygen index). Annual Book of ASTM Standard, ASTM D2863, 2013.
- [26] Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. Annual Book of ASTM Standard, ASTM D790, 2015.
- [27] Standard test method for tensile properties of plastics. Annual Book of ASTM Standard, ASTM D638, 2014.
- [28] Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics. Annual Book of ASTM Standard, ASTM D256, 2010.
- [29] Standard guide for evaluating mechanical and physical properties of wood-plastic composite products. Annual Book of ASTM Standard, ASTM D7031, 2011.
- [30] Wang, Q.W., Li, J. and Winandy, J. E., 2004. Chemical mechanism of fire retardance of boric acid on wood, *Wood Science and Technology*, 38:375–389.
- [31] García, M., Hidalgo, J., Garmendia, I. and García-Jaca, J., 2009. Wood–plastics composites with better fire retardancy and durability performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(11): 1772–1776.
- [32] Stark, N. M., Mueller, S. A., White R. H. and Osswald, T. A., 2010. Effect of fire retardants on heat release rate of wood flour-polyethylene composites. In: *Tenth International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites and Cellulose Nanocomposites Symposium*. May 11-13, Madison, USA, p 103-110.
- [33] Arao, Y., Nakamura, S., Tomita, T., Takakuwa, K., Umemura, T. and Tanaka, T., 2014. Improvement on fire retardancy of wood flour/polypropylene composites using various fire retardants. *Polymer Degradation and Stability*, 100:79–85.

## Fire performance, mechanical strength and dimensional stability of wood flour–polyethylene composites under the influence of different fire retardants

### Abstract

Flammability is one of the most important parameters that often limit the application range of wood plastic composites. Therefore, the improvements of retardancy performance of these products have a considerable impact. The aim of this work was to evaluate the influence of expandable graphite (EG) and its combination with aluminum trihydroxide (ATH), inorganic phosphate (IP) and melamine borate (MB) on the flammability of wood flour–polyethylene composites. Composites were prepared by the melt compounding method and cone calorimetry as well as limited oxygen index (LOI) tests was employed to study their flammability properties. Also, the effect of different fire retardants on the mechanical strength and water uptake of samples were investigated. Cone calorimetry characterization indicated that with incorporation of fire retardants, heat release rate and burning rate decrease and char residual as well as the time to ignition increase. These findings were ascribed to the formation of char layer by fire retardants. The combination of EG and other fire retardants yielded better improvements in flame retardancy in comparison to the sample that has just EG as flame retardant. The LOI test was used to determine the lowest concentration of oxygen at which a material will maintain combustion in a flowing mixture of oxygen and nitrogen. The results showed that inclusion of fire retardants improve the LOI of sample. Furthermore, the presence of fire retardants decreased the tensile and flexural resistance (strength and modules) and impact strength of samples, and increased the water absorption as well as thickness swelling. Generally, among the different treatments examined, the EG–ATH retardancy system showed the highest potential in flame retardancy of composites.

**Key words:** cone calorimetry, flammability, limited oxygen index, mechanical properties, retardancy.

**M. Roohani**<sup>1\*</sup>  
**B. Kord**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Prof., Department of paper and packaging, Faculty of chemistry and petrochemical engineering, Standard research institute (SRI), Karaj, Iran

<sup>2</sup> Assistant Prof., Department of paper and packaging, Faculty of chemistry and petrochemical engineering, Standard research institute (SRI), Karaj, Iran

Corresponding author:  
[mroohani@standard.ac.ir](mailto:mroohani@standard.ac.ir)

Received: 2016/08/08  
Accepted: 2016/11/01