



بررسی تاثیر حضور نانورس بر رفتار ضد آتش و خواص مکانیکی پوشش ضد آتش بر پایه اپوکسی

مرتضی ابراهیمی (نویسنده مسؤول)^۱

الهه کوخواهی^۲

کریم آقا حسینی^۳

سید علی شرافتی^۴

چکیده

در چند سال اخیر مطالعات قابل توجهی روی پوشش‌های ضد آتش پف کننده انجام شده است اما اکثر این مطالعات بر روی پوشش‌های بر پایه آکریلیکی بوده است و مطالعات نسبتاً کمی پیرامون پوشش‌های ضد آتش بر پایه اپوکسی صورت گرفته است. به همین جهت در این پژوهش تاثیر حضور ذرات صفحه‌ای نانورس مونت موریلونیت بر خواص ضد آتش و خواص مکانیکی این نوع پوشش‌ها بررسی شده است. نانوذره استفاده شده در این پژوهش از نوع اصلاح شده و با نام تجاری closite 30B بوده و نانوکامپوزیت‌های ضد آتش تهیه شده حاوی ۰/۵، ۱/۵ و ۳/۰ درصد وزنی از نانوذره بوده اند. برای ارزیابی خواص حرارتی و ضد آتش پوشش از آزمون‌های UL94، آزمون وزن سنجی حرارتی (TGA) و کوره آتش (پروفایل دما-زمان) استفاده شده است. در ضمن مورفولوژی زغال ایجاد شده نیز بررسی شده است. خواص مکانیکی پوشش نیز با استفاده از آنالیز دینامیکی مکانیکی-دمایی (DMTA) مورد ارزیابی قرار گرفته است. چگونگی پراکنش ذرات نانورس نیز توسط آزمون XRD ارزیابی شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که حضور نانورس در فرمولاسیون پوشش بر مورفولوژی زغال حاصله، رفتار ضد آتشی و خواص مکانیکی پوشش تاثیرگذار است. نتایج بدست آمده موید آن است که فرمولاسیون حاوی ۱/۵ درصد نانورس مناسب ترین رفتار ضد آتشی و مکانیکی را از خود نشان می دهد.

کلید واژگان: ضد آتش، پف کننده، اپوکسی، نانورس، خواص حرارتی، خواص مکانیکی

مقدمه

آتش سوزی در اماکن مسکونی، تجاری و واحدهای صنعتی سالانه موجب مرگ یا نقص عضو هزاران نفر شده و خسارت‌های مالی بزرگی نیز به بار می آورد. به گزارش انجمن ملی حفاظت از آتش^۵ در سال ۲۰۰۹ میلادی در ایالات

۱- دانشیار، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ebrahimi@aut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر-رنگ، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ekookhahi@gmail.com

۳- کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر-رنگ، شرکت باژاک karim.hosseini@bajakpaint.ir

۴- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، شرکت باژاک، ali.sherafati@bajakpaint.ir



متحده آمریکا تعداد ۱/۳ میلیون آتش رخ داده است که ۳۰۱۰ مرگ انسان و ۱۷۰۵۰ زخمی و ۱۲/۵ میلیارد دلار خسارت در پی داشته است. هم‌چنین در سال ۲۰۰۰ میلادی در کشور آلمان ۶۰۰ نفر جان خود را در اثر آتش‌سوزی از دست دادند و هم‌چنین حدود ۶ هزار نفر به‌طور جدی آسیب دیده‌اند. حال اگر بتوان در ساختمان‌ها اعم از تجاری و مسکونی و اداری تمهیداتی را پیش‌بینی کرد که در هنگام وقوع آتش‌سوزی ساختمان‌ها دیرتر ویران شوند، مردم فرصت کافی برای فرار پیدا می‌کنند در نتیجه می‌توان تا حد زیادی تلفات جانی و مالی را کاهش داد. شایان ذکر است چنانچه فولاد بدون پوشش در معرض آتش قرار گیرد، دمای آن پس از مدت کوتاهی (حدود ۵ دقیقه) به دمای بحرانی خود (۵۵۰°C) می‌رسد. در این دما فولاد استحکام خود را از دست می‌دهد و دیگر توان تحمل بار را ندارد و همین امر موجب فروپاشی کل ساختمان می‌گردد. حال اگر بتوان کاری کرد که فولاد دیرتر به دمای بحرانی‌اش برسد مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا ویرانی رخ دهد و فرصت کافی برای فرار مردم و خاموش کردن آتش فراهم می‌شود.

یکی از مکان‌هایی که نیاز به استفاده از پوشش‌های ضد آتش دارد، سازه‌های فلزی صنایع شیمیایی و پتروشیمیایی است. با توجه به موقعیت جغرافیایی این نوع صنایع معمولاً اینگونه پوشش‌ها در معرض محیط خورنده نیز بوده و بایستی از مقاومت خوردگی بالایی برخوردار باشند. در این محیط‌ها وقوع آتش‌سوزی از نوع آتش هیدروکربنی و آتش‌های پر فشار محتمل است. به دلیل این دو نیاز یعنی حفاظت از خوردگی و حفاظت از آتش‌های هیدروکربنی یکی از سامانه‌های پوششی توصیه شده برای این نوع صنایع سامانه‌های اپوکسی ضد آتش پف‌کننده است.

رنگ‌های اپوکسی ضد آتش پف‌کننده از مخلوطی از مواد فعال حرارتی ساخته می‌شوند که در ماتریس پلیمری فرموله شده و برای مصارف ضد آتش استفاده می‌شوند. ویژگی بارز این سامانه‌های پوششی ارائه رفتار تخریب حرارتی از قبل تنظیم شده‌ای است که وقتی در معرض آتش قرار می‌گیرند از یک طرف به علت انجام واکنش‌های تخریب حرارتی مقادیر مهمی گاز تولید می‌کنند و از طرف دیگر زغال کربنی بسیار متخلخلی تولید می‌شود. هر دوی این پدیده‌ها منجر به تولید ساختار متخلخل و سبکی می‌شود که به‌عنوان یک عایق موثر مانع از انتقال حرارت می‌شود. اولین استفاده از رنگ اپوکسی پف‌کننده به دهه‌ی هشتاد میلادی برمی‌گردد که بیشتر برای اهداف نظامی استفاده می‌شده است. امروزه رنگ‌های اپوکسی پف‌کننده در طیف وسیعی از مصارف ضد آتش از قبیل حفاظت از سازه‌های فولادی در ساختمان‌ها و لوله‌ها و تجهیزات در پلان‌های صنعتی استفاده می‌شود.

مطالعات زیادی در چند سال اخیر بر روی پوشش‌های ضد آتش پف‌کننده شده است. اکثر مطالعات بر روی پوشش‌های پایه آکریلیکی بوده است مطالعاتی نیز بر روی تغییر فرمولاسیون پوشش‌های پف‌کننده پایه اپوکسی انجام شده است. اما مطالعات کمی بر روی تاثیر نانو مواد در سیستم‌های پایه اپوکسی انجام شده است. در این پژوهش برای بهبود رفتار حرارتی و ضد آتش این نوع پوشش‌ها از ذرات نانورس مونت موریلونیت استفاده شده است. از آن‌جا که این نوع پوشش‌ها ممکن است سالیان سال در معرض آتش قرار نگیرند باید دارای خواص



مکانیکی مطلوبی نیز باشند تا وظیفه خود را به عنوان یک پوشش حفاظتی به درستی انجام دهند، بنابراین پس از بررسی رفتار حرارتی و ضد آتش، خواص مکانیکی پوشش نیز ارزیابی شده است.

در این پژوهش تاثیر نانورس بر خواص حرارتی پوشش توسط آزمون‌ها UL-94 V, TGA, و آزمون کوره‌ی آتش بررسی شده است. مورفولوژی زغال حاصله نیز ارزیابی شده است. برای بررسی خواص مکانیکی پوشش قبل از آتش‌گیری از آزمون DMTA استفاده شده است.

مرور ادبیات علمی

وانگ^۶ و همکارانش [۱] در سال ۲۰۰۷ میلادی اثر درصد‌های مختلف نانو مونت‌موریلونیت را بر تشکیل زغال و ویژگی‌های ضدآتشی پوشش ضد آتش‌پف‌کننده حاوی آمونیوم پلی فسفات، پنتا اریتریتول و ملامین (APP-MEL) پایه آکرلیکی و هم‌چنین تاثیر پیرشدگی بر کارایی پوشش مذکور بررسی کردند. در این پژوهش با استفاده از نتایج حاصل از آزمون کوره و اندازه‌گیری ضریب حرارتی موثر زغال (λ/d) عملکرد پوشش را بررسی کردند. در ضمن آزمون کوره قبل و بعد از آزمون پیرشدگی شتابیده^۷ از نمونه‌ها گرفته شد. وانگ و همکارانش [۲] در سال ۲۰۰۵ میلادی اثر درصد‌های مختلف نانو ذره اکسیدهای دوگانه لایه‌ای (LDH) را بر تشکیل زغال و ویژگی‌های ضدآتشی پوشش پف‌کننده آکرلیکی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش درصد نانو ذره در فرمولاسیون، دانسیته‌ی شبکه‌ای بین لایه زغالی و نانوذرات افزایش می‌یابد و شبکه‌ای با اتصالات عرضی بالا در زغال باعث کاهش اتلاف حرارت می‌شود و در نتیجه میزان کاهش وزن نیز با افزایش درصد نانو ذرات کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۰۶ میلادی وانگ و همکارانش [۳] نانو ذرات LDH را به همراه نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به سیستم پف‌کننده آکرلیکی اضافه کردند. از آن‌جا که سیستم‌های ضد آتش پف‌کننده معمول حاوی آمونیوم پلی فسفات، پنتا اریتریتول و ملامین تحت تاثیر شدید شرایط آب‌وهوایی قرار می‌گیرند، کارایی اولیه خود را پس از اعمال به مرور از دست می‌دهند. در حالی‌که تاخیراندازه‌های آتش در پوشش‌های حاوی نانو مواد هم‌چنان خواص خود را پس از آزمون پیرشدگی شتابیده نیز حفظ کرده‌اند. در سال ۲۰۱۰ میلادی وانگ و همکارانش پژوهشی مشابه با پژوهش قبلی خود انجام دادند. در این پژوهش اثر درصد‌های مختلف نانو سیلیس بر خاصیت ضدپیری پوشش‌های ضد آتش پف‌کننده رایج (APP-MEL) آکرلیکی بررسی شده است [۴]. در پژوهشی که توسط تیم پژوهشی بریگوت^۸ و همکارانش انجام شد اثر افزودن نانوفیلرهای مختلف به سیستم پف‌کننده پلی‌آمید ۶ و آمونیوم پلی فسفات بر ویژگی‌های حرارتی سیستم نهایی بررسی شد. آن‌ها در این پژوهش از LDH اصلاح شده با دودسیل سولفات (OLDH) و نانو ذرات سیلیکا (NPSi) و مونت‌موریلونیت اصلاح شده با مواد آلی (OMMT) استفاده کردند [۵]. در پژوهش دیگری بریگوت و همکارانش سیستم پف‌کننده APP-PER

6- Wang

7- Accelerated aging test

8- Bourbigot



را به همراه ژئولیت در تریلیمر اتیلن-بوتیل آکریلات-مالئیک انیدرید مخلوط کردند و مشاهده کردند خاصیت ضد آتش پلیمر مقادیر زیادی افزایش پیدا کرده است [۶]. وانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ میلادی اثر اندازه ذرات مختلف EG بر میزان جذب آب و خواص ضد آتشی پوشش پفکننده آکریلیکی حاوی تاخیراندازهای آتش معمول (APP-PER-MEL) را بررسی کردند [۷].

روش تحقیق

برای تهیه کامپوزیت و نانوکامپوزیت های اپوکسی، مواد مختلفی شامل رزین اپوکسی صد درصد جامد (Epicote 828, Huntsman)، عامل پخت آمینی (Aradur 329, Huntsman)، آمونیوم پلی فسفات (APP)، (Hangzhou Flame Retardant Co.)، ملامین (MEL, Tianjin Bodi Chemical Co.)، پنتا اریتریتول (PER, Shanghai Chemical Reagent Co.)، منیزیم هیدروکسید (Sun Puma Trading Ltd)، ذرات نانو رس مونت موریلونیت (Closite 30B, Rockwood) و چند ماده افزودنی دیگر شامل عامل پراکنش و ترکننده استفاده شده است. نمونه های نانوکامپوزیتی با استفاده از امواج فراصوت تهیه شده است. در این کار تاثیر نانو رس بر خواص حرارتی پوشش توسط آزمون ها TGA, UL-94 V و آزمون کوره آتش استفاده شده است. آزمون کوره آتش با استفاده از یک مشعل گاز مایع و در کوره ای با ابعاد $30 \times 30 \times 100$ سانتیمتر انجام شد. نمونه ها با ضخامت ۳ میلیمتر و بر روی صفحات فولادی با ابعاد 30×30 سانتیمتر اعمال شده و در انتهای کوره نصب می شدند تا در معرض شعله آتش قرار گیرند. دمای پشت صفحات توسط یک ترموکوپل ثبت می شد. مورفولوژی زغال حاصله نیز توسط تصاویر دیجیتالی ارزیابی شده است. برای بررسی خواص مکانیکی پوشش قبل از آتش گیری از آزمون DMTA استفاده شده است. نحوه پراکنش نانو ذرات رس نیز توسط آزمون XRD ارزیابی شده است. ترکیب درصد اجزای استفاده شده در فرمولاسیون های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیب درصد اجزاء در فرمولاسیون پوشش های تاخیرانداز آتش [۸]

کد نمونه	پلی فسفات آمونیوم	ملامین	پنتا اریتریتول	تیتانیوم دی اکسید	کلسیم کربنات	منیزیم هیدروکسید	نانورس	اپوکسی و هاردنر
V-2	۲۵	۸	۸	۲	۴	۴	۰	۴۹
V-2-C-1	۲۴/۹	۷/۹۵	۷/۹۵	۱/۹۸	۳/۹۷	۳/۹۷	۰/۵	۴۸/۷۵
V-2-C-2	۲۴/۶	۷/۹	۷/۹	۱/۹۷	۳/۹۴	۳/۹۴	۱/۵	۴۸/۲۵
V-2-C-3	۲۴	۷/۸	۷/۸	۱/۹۵	۳/۹	۳/۹	۳/۰	۴۷/۶۵

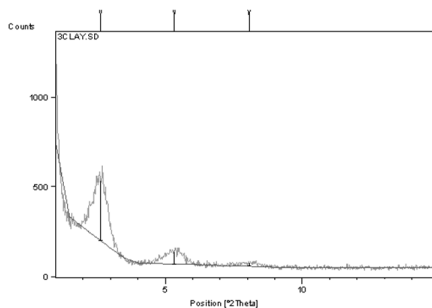


نتایج و بحث

بررسی پراکنش نانورس توسط آنالیز XRD

برای بررسی پراکنش نانو ذرات لایه‌ای لاک شفاف از نانو کامپوزیت تهیه شده و برای بررسی میزان باز شدگی لایه‌ها آنالیز XRD استفاده شد.

نتایج آنالیز XRD لاک اپوکسی حاوی نانورس در شکل ۱ آمده است. فاصله بین لایه‌ای در نانورس مونت موریلونیت در حالت اولیه $1/85$ nm می‌باشد. اما آنالیز XRD، افزایش فاصله بین لایه‌ای تا $3/8$ nm را در لاک اپوکسی حاوی نانورس نشان می‌دهد. نتایج نمایانگر این است که لایه‌های نانورس در ماتریس اپوکسی باز شده‌اند و ساختار Intercalated را به وجود آورده‌اند.



شکل ۱- الگوی XRD حاصل از ذرات نانورس پراکنده شده در لاک اپوکسی

بررسی آتش‌گیری لاک اپوکسی و کامپوزیت‌های آن توسط استاندارد UL-94

برای تعیین میزان دیرسوزی تمامی نمونه‌ها از استاندارد UL-94 عمودی استفاده شد. نتایج در جدول ۲ آمده است. لاک اپوکسی که فاقد هرگونه پرکننده و افزودنی بوده است از این استاندارد هیچ رتبه‌ای نگرفت و کاملاً رد شد زیرا پس از حدود ۳-۴ ثانیه پس از اعمال اولین شعله نمونه شروع به سوختن کرد و بدون هیچ وقفه‌ای به سوختن ادامه داد تا جایی که تمامی نمونه سوخت و به روی پنبه افتاد و آن را هم مشتعل کرد. اما نمونه حاوی مواد دیرسوزکننده (V-2) از این استاندارد رتبه 0-7 گرفتند زیرا پس از این‌که شعله از زیر نمونه برداشته شد نمونه دیگر به سوختن ادامه نداد. از این نتایج می‌توان دریافت که لاک اپوکسی به تنهایی بسیار آتشگیر است و اضافه کردن مخلوط مواد دیرسوزکننده (آمونیم پلی فسفات، پنتااریتول و ملامین) در افزایش دیرسوزی رزین اپوکسی بسیار موثر هستند. از آنجاکه کامپوزیت فاقد نانو مواد و نمونه‌های حاوی نانورس (V-2-C-1, V-2-C-2, V-2-C-3) نیز از این آزمون بالاترین رتبه را دریافت کرد، در نتیجه تاثیر نانو مواد بر بهبود دیرسوزکنندگی کامپوزیت از طریق این آزمون قابل بررسی نبود.



جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون UL-94 عمودی از تمامی نمونه‌ها

رتبه‌بندی در آزمون UL-94	نام نمونه
مردود شد	لاک اپوکسی
V-0	تمامی نمونه‌های ضد آتش پف‌کننده

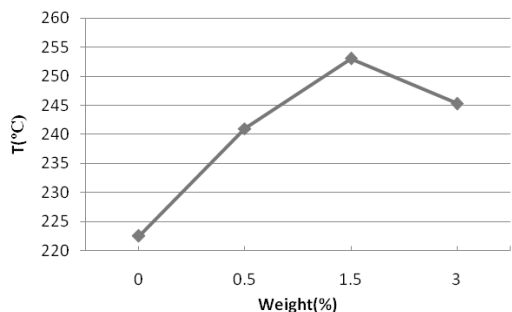
بررسی پایداری حرارتی نمونه‌ها به کمک آزمون TGA

برای بررسی پایداری حرارتی نمونه‌های با و بدون ذرات نانو از تمامی نمونه‌ها آزمون TGA گرفته شده است. خلاصه نتایج در جدول ۳ آمده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش درصد نانورس دمای شروع تخریب افزایش و سپس کاهش پیدا کرده است. نانوکامپوزیت حاوی ۱/۵٪ نانورس بالاترین دمای شروع تخریب را در بین نانو کامپوزیت‌های حاوی نانورس دارد (شکل ۲).

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمون TGA برای تمامی نمونه‌ها

مقدار باقیمانده جامد در ۶۰۰°C (درصد وزنی)	دمای شروع تخریب (C°)	کد نمونه
۲۵	۲۲۲/۵	V-2
۳۳/۹۶	۲۴۱	V-2-C-1
۳۴/۶۹	۲۵۳	V-2-C-2
۳۵/۸۶	۲۴۵/۳	V-2-C-3



شکل ۲- تغییرات دمای شروع تخریب نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی نانورس

بررسی عملکرد مقاومت به آتشی نانو کامپوزیت‌ها با استفاده از آزمون شعله آتش

برای بررسی عملکرد مقاومت به آتش پوشش‌های ضد آتش پف‌کننده، تمامی نمونه‌ها در شرایط یکسان برای ۱

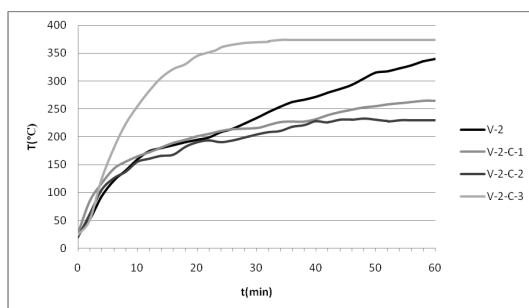


ساعت در معرض آتشی با دمای نهایی 900°C قرار گرفتند.

نتایج منحنی‌های دما-زمان

برای اندازه‌گیری میزان عایق بودن زغال‌های حاصل از نمونه‌ها، آزمون شعله آتش انجام شد. نتایج در شکل ۳ آمده است.

ضخامت زغال هر نمونه در ۵ جای مختلف اندازه‌گیری شد و میانگین آن به‌عنوان ضخامت زغال و دمایی که ترموکوپل پس از ۱ ساعت نشان داده نیز به‌عنوان دمای نهایی هر نمونه در جدول ۴ اعلام گردید. ضریب پف‌کنندگی نیز محاسبه گردید (نسبت ضخامت زغال به ضخامت پوشش اولیه) و نتیجه آن در جدول ۴ اعلام گردید.



شکل ۳- نتایج نمودار دما-زمان حاصل از آزمون شعله آتش نمونه‌ها

جدول ۴- نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضخامت زغال و دمای نهایی پشت صفحه فلزی پس از یک ساعت

نام نمونه	ضخامت زغال (mm)	ضریب پف‌کنندگی	دمای نهایی ($^{\circ}\text{C}$)
V-2	۲۳	۷/۶۶	۳۴۰
V-2-C-1	۱۵	۵	۲۶۵
V-2-C-2	۱۰	۳/۳۳	۲۳۰
V-2-C-3	۵	۱/۶۶	۳۷۴

مشاهدات و نتایج برای هر کدام از نمونه‌ها به‌طور جداگانه آمده است:

کامپوزیت فاقد نانو ذره (V-2)

منحنی دما-زمان نمونه V-2 نشان می‌دهد که دمای پانل تقریباً به‌طور خطی افزایش پیدا کرده و با گذشت زمان مقدار کمی شیب آن کم شده است، در نتیجه زغال نمونه V-2 به‌عنوان عایق حرارتی مناسب عمل نکرده است.



مقایسه کامپوزیت فاقد نانو ذره با نانوکامپوزیت ها

منحنی های دما-زمان اختلاف در عملکرد نمونه های حاوی نانو با فاقد نانو را در ۳۰ دقیقه دوم نشان می دهد. سرعت افزایش دمای نانوکامپوزیت ها در ۳۰ دقیقه دوم بسیار کم می شود و تقریباً ثابت می شود، در حالیکه سرعت افزایش دمای کامپوزیت ۲-۷ به طور تقریباً خطی ادامه می یابد. این تفاوت رفتار را این گونه می توان توجیه نمود که از یک سو نانوذرات با تشکیل یک لایه محافظ سرامیکی شکل بر روی سطح زغال مانع از اکسیداسیون آن در دماهای بالا می شوند و از سوی دیگر نیز باعث تشکیل زغالی با ساختار فشرده تر و حباب های هوای کوچکتر می شوند، در نتیجه سبب عملکرد بهتر زغال می شود.

نمونه های نانوکامپوزیت حاوی درصد های مختلف نانورس

با افزایش درصد نانورس تا ۱/۵٪ دمای نهایی کاهش و پس از آن افزایش پیدا کرده است در حالی که ضریب پفکنندگی با افزایش درصد نانورس کاهش پیدا کرده است.

پایین ترین دمای نهایی در بین تمام نانوکامپوزیت ها مربوط به نمونه حاوی ۱/۵٪ از نانو رس (V-2-C-2) با ضریب پفکنندگی ۳/۳۳ می باشد.

بالترین دمای نهایی در بین تمام نانوکامپوزیت ها مربوط به نمونه حاوی ۳٪ از نانورس (V-2-C-3) با ضریب پفکنندگی ۱/۳۳ می باشد.

درصد بهینه نانورس در نانوکامپوزیت پفکننده ۱/۵٪ است.

بررسی مورفولوژی زغال توسط تصاویر دیجیتالی

مورفولوژی زغال ها در مقیاس میلی متر، توسط عکس های دیجیتالی بررسی شده اند. تفاوت مورفولوژی ها در تصاویر دیجیتالی کاملاً مشهود است و می توان بر روی آن ها بحث کرد.

ساختار ماکروسکوپی زغال ها با استفاده از تصاویر دیجیتالی بررسی شده اند و نتایج آن بصورت زیر قابل توصیف است.

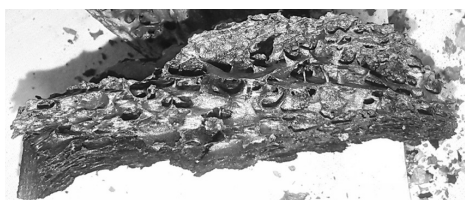
ساختار عمومی زغال ها به شکل لایه لایه است که هر چه از لایه زیرین زغال به سطح آن نزدیک تر می شویم از فشردگی لایه ها کمتر می شود و حفره های بزرگ هوا جای ساختار لایه ای را می گیرد، علت این پدیده را می توان به ویسکوزیته مذاب زغال ربط داد. زیرا لایه های رویی سریعتر گرم می شوند و ویسکوزیته مذاب کمتری پیدا خواهند کرد در نتیجه حباب های بزرگتری از هوا تشکیل می شود، این حباب ها سپس به عنوان عایق عمل کرده و از افزایش دمای سطوح زیر خود جلوگیری می کند در نتیجه فرآیند تشکیل زغال در لایه های زیرین کندتر پیش رفته در نتیجه لایه ها فرصت کافی برای باز شدن پیدا نمی کنند. از طرف دیگر سطح بیرونی زغال یک لایه کربنی تقریباً یک دست و بدون تخلخلی می باشد که کل زغال را از نفوذ آتش حفظ می کند.



هرچه زغال عملکرد بهتری داشته باشد و عایق بهتری در برابر انتقال حرارت باشد، لایه‌های زیرین زغال کمتر می‌سوزد و سبب تفاوت رنگ لایه‌های زیرین با لایه‌های میانی خواهد شد. رنگ لایه‌های زیرین مشابه پلیمر نیمه سوخته یعنی به رنگ قهوه‌ای می‌شود. شایان ذکر است که این امر به چسبندگی بهتر زغال به زیرآیند نیز کمک می‌کند. در ادامه مورفولوژی هر نمونه زغال به طور جداگانه بررسی می‌شود:

نمونه 2-V (فاقد نانومواد)

تصویر دیجیتالی از مقطع عرضی زغال حاصل از نمونه 2-V در شکل ۴ آمده است. زغال نمونه 2-V از ضریب پف‌کنندگی بالایی برخوردار است و مورفولوژی آن از ساختاری نایک‌نواخت با حباب‌های بزرگ هوا تشکیل یافته است. فاصله‌ی زیادی نیز بین لایه‌های زغالی رویی و ساختار متخلخل میانی می‌باشد. هم‌چنین لایه رویی از ضخامت و استحکام کمی برخوردار است، طوری‌که با فشار کم انگشتان دست می‌شکند. سوراخ‌هایی نیز بر روی لایه رویی زغال قابل مشاهده است که نشان می‌دهد گرما را به طور مستقیم از این نقاط عبور داده است و باعث افزایش انتقال حرارت شده است.

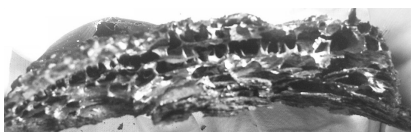


شکل ۴- تصویر دیجیتالی از مقطع عرضی زغال 2-V

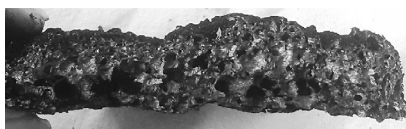
نمونه‌های حاوی نانورس (V-2-C-1, V-2-C-2, V-2-C-3)

تصویر دیجیتالی از مقطع عرضی حاصل از نمونه V-2-C-1 در شکل ۵ و زغال V-2-C-2 در شکل ۶ آمده است. در مورد نمونه V-2-C-3 از آنجایی‌که ضریب پف‌کنندگی بسیار کم بود و ساختار بسیار فشرده‌ای را ایجاد کرده بود، چسبندگی خیلی زیادی به زیرآیند داشت و به همین دلیل جداسازی زغال از زیرآیند و تهیه مقطع عرضی از آن میسر نشد. در نتیجه تصویر واضحی که نشان‌دهنده‌ی مورفولوژی آن باشد، موجود نیست. شکل ۷ تا حدودی نمایانگر میزان پف‌کنندگی نمونه V-2-C-3 می‌باشد.

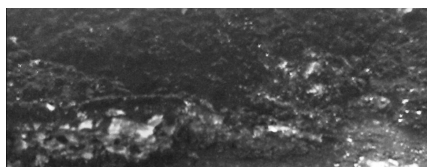
زغال‌های تشکیل شده از نانوکامپوزیت‌های حاوی نانورس ضریب پف‌کنندگی کمتری دارند و در کل از ساختار فشرده‌تری بهره‌مند هستند. با افزایش درصد نانورس، زغال فشرده‌تر و ضریب پف‌کنندگی کمتر می‌شود، تاجایی که کامپوزیت حاوی ۳٪ از نانورس بسیار کم پف کرده است (ضریب پف‌کنندگی = $1/66$). افزایش در فشرده‌گی ساختار زغال‌ها را می‌توان به افزایش ویسکوزیته‌ی مذاب و از طرف دیگر به افزایش میزان شبکه‌ای شدن زغال به علت حضور نانو ذرات ربط داد. این امر در تصاویر دیجیتالی از مقطع عرضی زغال کاملاً مشهود است.



شکل ۵- تصویر دیجیتالی از مقطع عرضی زغال V-2-C-1



شکل ۶- تصویر دیجیتالی از مقطع عرضی زغال V-2-C-2



شکل ۷- تصویر دیجیتالی از زغال V-2-C-3

ارزیابی خواص ویسکوالاستیک پوشش ضدآتش پفکننده حاوی نانو ذرات توسط آزمون DMTA

خواص ویسکوالاستیک پوشش‌های بدون نانو ذره و پوشش‌های دارای درصد‌های مختلف ذرات نانورس با استفاده از آزمون دینامیکی مکانیکی DMTA مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از داده‌های آنالیز DMTA پارامترهای مدول ذخیره، دانسیته شبکه‌ای شدن و دمای انتقال شیشه‌ای نمونه‌ها بدست آمد. خلاصه نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج به‌دست آمده از آزمون DMTA

مدول ذخیره در 20°C	دانسیته شبکه‌ای شدن (mol/cm^2)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	نام نمونه
۲,۲۰	۰,۰۰۳۹	۵۸,۷	V-2
۱,۴۸	۰,۰۰۱۷	۵۴,۸	V-2-C-1
۱,۷۷	۰,۰۰۲۰	۵۷,۴	V-2-C-2
۰,۸۷	۰,۰۰۲۴	۶۴,۱	V-2-C-3

همانگونه که مشاهده می‌شود اضافه کردن نانورس به پوشش سبب کاهش دانسیته اتصالات عرضی و مدول ذخیره در ناحیه شیشه‌ای در هر سه درصد و کاهش T_g در نمونه‌های ۰,۵ و ۱,۵٪ و افزایش T_g در نمونه ۳٪ شده است. کاهش دو پارامتر اول می‌تواند به افزایش ویسکوزیته فرمولاسیون پوشش‌ها و عدم پخت کامل سامانه مرتبط گردد. در ارتباط با رفتار نسبتاً پیچیده T_g می‌توان به تاثیر متضاد حضور نانورس بر این پارامتر اشاره نمود. همانگونه که قبلاً گفته شد حضور نانورس می‌تواند موجب اخلاخل در پخت کامل پوشش گردد که این



امر موجب کاهش T_g می‌شود اما از طرف دیگر حضور نانو ذره صفحه‌ای نانورس می‌تواند از حرکت زنجیره‌های پلیمری جلوگیری نماید که این امر موجب افزایش T_g می‌شود. به همین جهت تغییرات T_g از یک روند خطی پیروی نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایشات صورت گرفته و نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیرارائه داد:
نانوذرات رس مونت‌موریلونیت اصلاح شده در رزین اپوکسی به خوبی پراکنده شده و صفحات آن از یکدیگر باز می‌شوند.

آتش‌گیری لاک اپوکسی توسط افزودن مواد تاخیرانداز آتش به‌طور چشم‌گیری بهبود یافته و از استاندارد UL-94 V-0 رتبه دریافت کرده است.

نانوذرات رس سبب افزایش پایداری حرارتی کامپوزیت پف‌کننده پایه اپوکسی شده‌اند.

نانورس تاثیر بسیار چشم‌گیری بر افزایش عملکرد ضدآتشی و بهبود مورفولوژی زغال و کاهش حفرات بزرگ آن شده است. بهترین نتایج زمانی مشاهده شد که ۱٫۵٪ وزنی از نانورس در کامپوزیت پف‌کننده استفاده شده است.

۳٪ وزنی از نانورس در پوشش پف‌کننده سبب کاهش چشمگیر ضریب پف‌کنندگی زغال و عملکرد ضدآتشی آن شده است.

نانوذرات به‌طور رس سبب کاهش T_g ، میزان شبکه‌ای شدن و مدول ذخیره در ناحیه شیشه‌ای پوشش پف‌کننده اپوکسی (highly filled) شده است.

مراجع

- [1] Wang Z.Y., Han E.H., and Ke W., Fire-resistant effect of nanoclay on intumescent nanocomposite coatings, *Journal of Applied Polymer Science*, 103, 2007, 1681-1689.
- [2] Wang Z.Y., Han E.H., and Ke W., Influence of nano-LDHs on char formation and fire-resistant properties of flame retardant coatings, *Progress in Organic Coatings*, 53, 2005, 29-37.
- [3] Wang Z.Y., Han E.H., and Ke W., Effect of nanoparticles on the improvement in fire-resistant and anti-aging properties of flame-retardant coating, *Surface and Coatings Technology*, 200, 2006, 5706-5716.
- [4] Wang Z.Y., Han E.H., Liu F., and Ke W., Fire and corrosion resistances of intumescent nano coatings containing nano-SiO₂ in salt spray condition, *Journal of Materials Science and Technology*, 26, 2010, 75-81.
- [5] Bourbigot S. and Duquesne S., Flame retardant polymer nanocomposites, 50, 2007, 131-162.



- [6] Le Bras M. and Barbigot S., Mineral fillers in intumescent fire retardant formulations- criteria for the choice of a natural clay filler for the ammonium polyphosphate/pentaerythol/ polypropylene system, *Fire and Materials*, 20, 1996, 39-49.
- [7] Wang Z.Y., Han E.H., and Ke W., Influence of expandable graphite on fire resistance and water resistance of flame-retardant coatings, *Corrosion Science*, 49, 2007, 2237-2253
- [8] Kahraman, H.T., et al., Development of an epoxy based intumescent system comprising of nanoclays blended with appropriate formulating agents. *Progress in Organic Coatings*, 78, 2015, 208-219.