

اصلاح ویژگی قیر با استفاده از خاکستر مخروط کاج، آلومینا و سیلیکای میکرونیزه پوشش داده شده با اولئیک اسید و استناریک اسید

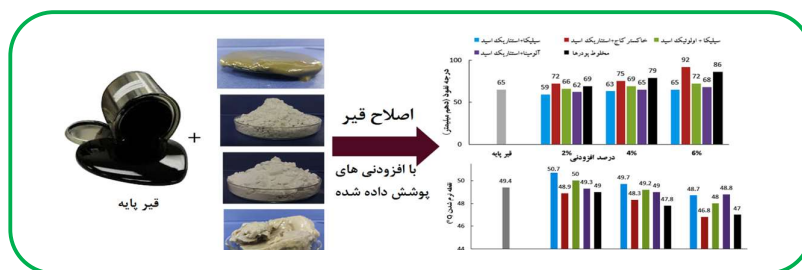
مرضیه دریانورد^{۱*} و رضا برومند آزاد پاشاکی^۲

^۱ دانشکده شیمی، مرکز آموزش عالی استهبان، استهبان
^۲ دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

تاریخ دریافت: ۲۴ آبان، ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۲۲ دی، ۱۴۰۰

چکیده: ابتدا پودرهای معدنی شامل خاکستر مخروط کاج، آلومینا و سیلیکای میکرونیزه با اولئیک اسید و استناریک اسید در حلال‌های اتانول ۹۶ درصد، تولوئن و استون صنعتی با حرارت پوشش داده شدند. سپس، مقادیر مختلفی از هر یک از این پودرهای پوشش داده شده و همچنین مخلوط آن‌ها برای اصلاح قیر پایه (۷۰-۶۰) استفاده شد. ویژگی‌های مختلف قیرهای اصلاح شده شامل درجه نفوذ، نقطه نرم شدن و نتایج آزمون‌های DSR، BBR و MSCR با قیر پایه مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش درصد افزودنی‌های پوشش داده شده، درجه نفوذ افزایش پیدا کرده است. همچنین، با افزودن پودرهای پوشش داده شده، نقطه نرم شدن قیر پایه تغییر محسوسی نداشته است که این امر یک برتری در اصلاح قیر پایه محسوب می‌شود. نتایج آزمایش DSR نشان دادند که بیشترین مدول کل تنش برشی (G^*) در سه دمای مختلف مربوط به سیلیکای پوشش داده شده با اولئیک اسید است. نتایج آزمایش BBR نیز نشان دادند که در دماهای ۶- و ۱۲- درجه سانتی‌گراد بیشترین سختی خزشی به ترتیب مربوط به نمونه ۴ درصد سیلیکای پوشش داده شده با اولئیک اسید و نمونه ۲ درصد خاکستر مخروط کاج پوشش داده شده با استناریک اسید است. آزمایش MSCR نشان داد که در تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال بیشترین میانگین درصد بازیابی به ترتیب مربوط به نمونه ۲ درصد سیلیکای پوشش داده شده با اولئیک اسید و نمونه ۴ درصد خاکستر مخروط کاج پوشش داده شده با استناریک اسید است.

کلید واژه: آلومینا، استناریک اسید، اولئیک اسید، خاکستر مخروط کاج، سیلیکا، قیر.



۱- مقدمه

پیاده‌روهای فرانسه استفاده شد. اولین خیابان آسفالت در آمریکا نیز مربوط به سال ۱۸۷۰ است [۲]. در اوایل قرن ۱۹ میلادی، قیر تصفیه شده برای اولین بار توسط پالایش نفت خام در ایالات متحده آمریکا تولید شد و انجمن ملی روسازی آسفالت در آمریکا تاسیس گردید. از آن پس، مصرف قیر در جهان به سرعت در حال افزایش است که بیشتر در ساخت جاده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. طبق آمار موسسه آسفالت و قیر اروپا در سال ۲۰۱۱، مصرف جهانی قیر در حدود ۱۰۲ میلیون تن در سال و تولید جهانی قیر در حدود ۸۷ میلیون تن در سال است [۳]. قیر طبیعی با نام‌های مختلف در سراسر جهان شناخته

قیر یکی از قدیمی‌ترین مواد شناخته شده است که طی هزاران سال به روش‌های مختلف به عنوان چسب، درزگیر، عامل ضد آب و همچنین پوشش دهنده پیاده‌رو، بام‌ها و باندهای فرودگاه مورد استفاده قرار گرفته است. قیر از طریق تقطیر نفت خام طی پالایش نفت تولید می‌شود و ویژگی‌های بارز آن مانند چسبندگی، ویژگی ترموپلاستیکی، پایداری، اصلاح‌پذیری، دوام بالا و قابلیت بازیافت، این محصول را به یک ماده ممتاز تبدیل کرده‌اند [۱]. استفاده از قیر برای ساخت آسفالت از اوایل قرن ۱۹ میلادی شروع شد و برای اولین بار در سال ۱۸۳۰ در

روسازی راه‌ها بطور دائم در معرض انواع تنش‌های ناشی از عوامل گوناگون مانند بار ترافیکی، تغییر دما، میزان رطوبت و تغییر شکل لایه‌های زیرین و بستر قرار دارند که این تنش‌ها منجر به تخریب روسازی می‌شوند. ترک‌ها و چاله‌ها، آخرین پیامد فرسوده شدن روسازی هستند. برخی از تخریب‌های رایج آسفالت عبارتند از ترک پوست سوسماری یا ترک خستگی، روزدگی قیر، ترک‌های بلوکی، موج‌زدگی، وصله و کنده‌کاری، نشست موضعی، شیارشدگی و صیقلی شدن دانه‌ها.

با وجود کاربردهای بسیار زیاد قیر و ویژگی مفید آن در روسازی راه، این ماده دارای ضعف‌هایی است که باعث تخریب روسازی می‌شوند. مرغوبیت قیر از همان ابتدای تهیه مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد (پیرشدگی کوتاه مدت)، این کاهش از زمان گرم کردن قیر در کارخانه آسفالت تا بعد از اختلاط با مواد و استفاده در محیط ادامه می‌یابد. ویژگی قیر استفاده شده در صنعت روسازی در هیچ زمانی ثابت نبوده و مدام در حال تغییر است. همچنین اکثر روسازی‌های جهان از نوع آسفالتی بوده و از قیر با درجه‌های مختلف آن استفاده شده است. نقش مهم قیر در روسازی راه و نیز تأثیر موادی که باعث بهبود کیفیت آن می‌شوند، باعث شده که پژوهشگران تلاش کنند تا قیری با نقص کمتر و ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی بهتر تولید نمایند. قیر در راه‌سازی وظیفه اتصال آسفالت رویه به بستر زیرین و چسبندگی بین مصالح استفاده شده در تولید آسفالت را بر عهده دارد. پیرشدگی اکسایشی آسفالت امری اجتناب‌ناپذیر است و به‌عنوان یکی از عوامل اصلی در تسریع زمان تخریب آسفالت شناخته شده است. بنابراین، مطالعات زیادی برای درک بیشتر سازوکار اکسایش و همچنین گسترش افزودنی‌ها و روش‌های جدید برای ایجاد تأخیر در پیرشدگی اکسایشی انجام گرفته است. این افزودنی‌ها شامل رزین‌های مختلف، لاستیک‌ها، پلیمرها، گروگرد، کمپلکس‌های فلزی، لیاف، عوامل شیمیایی و نانومواد هستند.

استفاده از نانومواد در سال‌های اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است که این امر به‌طور عمده ناشی از ویژگی‌های سطحی و اثر بخشی آن‌ها در تغییر ساختار مواد است. افزودن نانومواد به آستر آسفالت باعث بهبود چشمگیر ویژگی‌های رئولوژیکی و فیزیکی آسفالت شده که این امر دلیلی برای گسترش به‌کارگیری نانومواد در تولید آسفالت اصلاح‌شده است. از این‌رو فناوری نانو به‌تدریج در حوزه اصلاح‌کننده‌های آسفالت گنجانده شده و در سال‌های اخیر انواع مختلفی از نانومواد در این صنعت بکار گرفته شده‌اند. پیش‌زمینه استفاده از نانومواد در قیر و مخلوط آسفالتی به کاربرد آن‌ها در اصلاح ویژگی‌های پلیمرها تحت عنوان نانوکامپوزیت‌های پلیمری برمی‌گردد. نانوسیلیکا یکی از این نانومواد است که به‌طور گسترده‌ای در پلیمرها و آسترهای آسفالت به‌عنوان پرکننده‌های غیر آلی برای بهبود ویژگی‌های مواد قیری استفاده شده است. سیلیکا یا سیلیس

می‌شود. به عنوان نمونه، اصطلاح قیر که به طور معمول در اروپا استفاده می‌شود مترادف با اصطلاح آسفالت در آمریکای شمالی است. در خارج از شمال آمریکا، اصطلاح آسفالت برای توصیف مخلوط قیر با مواد معدنی و پلیمری به کار می‌رود. قیر خام واژه‌ای است که برای باقی‌مانده حاصل از تقطیر نفت خام استفاده می‌شود. قابلیت عملکرد قیر بستگی به چگونگی برهم‌کنش مولکول‌ها با یکدیگر و یا چسبندگی به مصالح سنگی دارد [۴]. مولکول‌های موجود در قیر شامل آلکان‌ها، سیکلوآلکان‌ها، آروماتیک‌ها و مولکول‌های حاوی گوگرد، اکسیژن، نیتروژن و برخی از فلزات هستند. حضور هترواتم‌های گوگرد، نیتروژن و اکسیژن در مولکول‌ها باعث قطبیت آن‌ها می‌شود که این عامل با تأثیر بر روی تجمع مولکولی در قیر، به‌طور محسوسی بر ویژگی‌های فیزیکی و عملکرد آن اثر می‌گذارد [۵]. عمده مولکول‌های موجود در قیر که بوسیله حلال‌های مختلف از قیر جدا شده‌اند، عبارتند از: مواد آسفالتن، رزین، آروماتیک‌ها و ترکیب‌های اشباع که گاهی همراه با مقدار کمی مواد معدنی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. بطور کلی آسفالتن‌ها اسکلت ساختمانی قیر را تشکیل می‌دهند و رزین‌ها در میزان چسبندگی و قابلیت شکل‌پذیری قیرها مؤثرند، درحالی که روغن‌ها بر روان‌بودن قیر اثر می‌گذارند. ویژگی فیزیکی قیر تابعی از ساختمان شیمیایی و کمیت و کیفیت هیدروکربن‌های تشکیل دهنده آن است. هر چه مقدار آسفالتن زیادتر باشد، قیر سخت‌تر می‌شود، در حالی که افزایش مقدار رزین، باعث نرم‌تر شدن آن می‌گردد [۶ و ۷].

قیرهای مصرفی در راه‌سازی دو نوع هستند که اگر از معدن به دست آیند به آن‌ها قیر طبیعی یا معدنی گفته می‌شود و اگر از پالایش نفت خام حاصل شوند، قیر نفتی نامیده می‌شوند [۸]. وقتی که مواد فرار نفت خام موجود در اعماق زمین، در برابر عوامل جوی و به مرور زمان تبخیر شوند، ماده سیاه رنگی از آن‌ها بر جای می‌ماند که قیر طبیعی نامیده می‌شود. قیر طبیعی شامل قیرهای دریاچه‌ای و قیرسنگ‌ها است [۸]. در اوایل قرن بیستم، قیر نفتی حاصل از پالایش نفت خام به بازار آمد و جایگزین قیرهای معدنی و طبیعی گردید. این نوع قیر از پالایش نفت خام در برج‌های تقطیر به دست می‌آید و سرانجام در پایین برج و در حرارت بیش از ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند که به چهار دسته قیر خالص، قیر دمیده، قیرابه (قیر امولسیون) و قیر محلول تقسیم می‌شود [۹]. در هنگام تقطیر نفت خام، روغن‌های سبک‌تر در درجه حرارت‌های پایین‌تر تبخیر می‌شوند و با افزایش دما، روغن‌های سنگین‌تر جدا می‌شوند و قیر خالص در پایین این برج‌ها باقی می‌ماند. با تنظیم درجه حرارت و فشار داخل برج تقطیر می‌توان قیرهایی با درجه سفتی متفاوت به دست آورد که شامل قیرهای نوع ۲۰-۱۰، ۶۰-۷۰، ۸۵-۱۰۰ و ۲۰۰-۳۰۰ هستند [۹].

(SiO₂) در طبیعت بیشتر به صورت کوارتز یافت می‌شود و در بسیاری از نقاط جهان جزء اصلی شن و ماسه است [۱۰]. برتری نانوسیلیکا هزینه تولید پایین و ویژگی‌های عملکردی بالای آن است. افزودن نانوسیلیکا به آستر آسفالت پایه، گرانروی آسفالت را اندکی کاهش می‌دهد. گرانروی پایین آستر نشان دهنده دمای فشردگی پایین‌تر یا مصرف انرژی پایین‌تر برای فرآیند ساخت آستر است [۱۱].

لیو و همکارانش در سال ۲۰۱۳، اثر نانوسیلیکا را بر مخلوط آسفالت اصلاح‌شده بررسی کردند [۱۲]. آن‌ها مشاهده کردند که نانوسیلیکا مقاومت مخلوط را در برابر رطوبت به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، اما اثر منفی بر روی ترک‌خوردگی در دمای پایین دارد. شفافیت و همکارانش در سال ۲۰۱۵، توانایی پودر میکروسیلیکا در بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم را بررسی کردند [۱۳]. نتایج نشان دادند که استفاده از میکروسیلیکا تأثیر قابل توجهی بر روی بهبود شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی گرم دارد و موجب کاهش نفوذپذیری، ویژگی انکمی، حساسیت دمایی و افزایش نقطه نرمی، سختی و کندروانی قیر می‌شود [۱۳]. عربانی و همکارانش نیز ویژگی‌های خستگی مخلوط آسفالت اصلاح‌شده با نانوسیلیکا را پس از اعمال شرایط پیرشدگی کوتاه مدت بررسی کردند. در این پژوهش، با به‌کارگیری درصد‌های مختلف نانوسیلیس از ۲ تا ۶ درصد وزنی، ویژگی‌های خستگی با استفاده از دستگاه استحکام کششی غیرمستقیم بررسی شد و نمونه‌های دارای ۴ درصد وزنی نانوسیلیکا مقاومت بهتری را در برابر خستگی نشان دادند [۱۴]. یائو و همکارانش در سال ۲۰۱۲ دریافتند که با افزودن نانوسیلیکا به قیر خالص ویژگی برگشت‌پذیری، ویژگی ضد پیرشدگی، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و شیارشدگی و ویژگی ضد عریان‌شدگی به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است [۱۵ و ۱۶].

نانورس‌ها یکی دیگر از اصلاح‌کننده‌های نانو هستند که ترکیبی از یک یا چند پلیمر با سیلیکات لایه‌ای هستند و دارای ضخامت لایه‌ای در حدود یک نانومتر و ابعاد بسیار زیاد هستند. جداسازی صفحه‌های رسی از یکدیگر باعث می‌شود که یک نانورس با مساحت سطح بالا به دست آید که این امر منجر به سازگاری بالا بین نانورس و قیر می‌شود [۱۷]. غفارپور جهرمی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ اثر دو نوع نانورس متداول و معروف یعنی کلوزیت و نانوفیل را در روسازی آسفالتی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که اصلاح قیر با نانورس سبب افزایش چسبندگی و مقاومت برشی قیر شده به طوری که مقاومت در برابر تغییرشکل دائم، که نوعی از تغییرشکل‌های برشی است، با به‌کارگیری نانورس افزایش می‌یابد. اما افزودن نانورس، به دلیل کاهش انعطاف‌پذیری قیر، مقاومت قیر در برابر خستگی را به‌ویژه در دماهای پایین کاهش می‌دهد [۱۸]. جولین میلز نیز نشان داد که

نانورس‌ها توانایی لازم برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی را در دماهای بالا و پایین دارند. او نشان داد که در اثر استفاده از نانورس: (۱) گرانروی قیر افزایش یافته و بنابراین، مقاومت در برابر تغییرشکل دایمی در دماهای بالا افزایش می‌یابد، (۲) مدول برشی مختلط افزایش یافته و بنابراین، مقاومت در برابر تغییرشکل‌های دایمی در دماهای بالا بهبود می‌یابد، و (۳) اگر نانورس در درصد‌های بیشتر از ۴ درصد وزنی اضافه شود، مقاومت در برابر ترک‌های دمایی پایین افزایش می‌یابد [۱۹].

بنابراین، با توجه به مصرف انواع قیر در بخش‌های مختلف و لزوم اصلاح و بهبود ویژگی‌های آن، در این کار برای اولین بار از پودرهای معدنی شامل سیلیکا و آلومینا و همچنین خاکستر مخروط کاج پوشش داده‌شده با اسیدهای چرب (اولئیک اسید و استناریک اسید) برای اصلاح ویژگی‌های قیر پایه (۷۰-۶۰) استفاده شد. اصلاح ویژگی‌های قیر با این نوع مواد اصلاح‌کننده و اقتصادی بودن روش انجام آن اهمیت زیادی در فناوری روز دنیا برای استفاده از قیر دارد.

۲- یخس تجربی

۲-۱- مواد و حلال‌ها

همه مواد شیمیایی شامل سیلیکا، آلومینا، استناریک اسید، اولئیک اسید، اتانول ۹۶ درصد و تولون با خلوص صنعتی مورد استفاده قرار گرفتند. سیلیکا و آلومینای میکرونیزه صنعتی به ترتیب با مش ۴۵ و ۲۲۵ میکرون تهیه شدند. برای تهیه نمونه کاج، ابتدا مخروط‌های درخت کاج از محوطه دانشگاه صنعتی اصفهان جمع‌آوری و سپس آسیاب شدند و نمونه در کوره‌ای با برنامه دمایی ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹ ساعت حرارت داده شد. قیر مورد استفاده در راهسازی از دو نوع ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ است که بیشترین استفاده مربوط به قیر ۷۰-۶۰ است. به همین دلیل در این پژوهش، از قیر نوع ۷۰-۶۰ تولید شرکت نفت جی اصفهان استفاده شده است.

۲-۲- تهیه اصلاح‌کننده‌ها

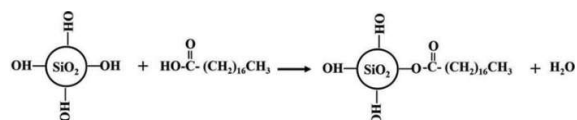
ابتدا، مقدار ۱۰ گرم استناریک اسید با ۵ میلی‌لیتر تولون و ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۶ درصد مخلوط شد و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت همزده شد. هدف از این کار ذوب‌شدن استناریک اسید و اختلاط بهتر مواد است. در مرحله بعد، مقدار ۶ گرم پودر خاکستر کاج، سیلیکا، یا آلومینا به محلول گفته شده در بالا افزوده و به مدت ۱۲ ساعت به همزده شد. سوسپانسیون به‌دست آمده به مدت ۲ ساعت در حالت ساکن قرار داده شد تا مواد جامد به‌طور کامل ته‌نشین شوند. سپس مخلوط حاصل صاف و به مدت ۳ ساعت در معرض هوا قرار گرفت. بنابراین، با این روش سه اصلاح‌کننده شامل خاکستر مخروط کاج، سیلیکا

آزمایش رنومتر تیرچه خمشی بر روی آن انجام گرفت (پوشه پیوست مشاهده گردد). به کمک این آزمایش‌ها می‌توان ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، ریخت و رئولوژی قیر و همچنین اثر اصلاح‌کننده‌های تهیه‌شده در این پژوهش را بر روی قیر پایه بررسی کرد.

۳- نتایج و بحث روی نتایج

۳-۱- برهم‌کنش اسیدهای چرب با آلومینا، سیلیکا و خاکستر مخروط کاج

برای بررسی شیوه برهم‌کنش اولئیک اسید و استتاریک اسید با پودرهای مورد نظر، ابتدا ساختار این دو اسید بررسی می‌شود. این دو اسید دارای یک زنجیره بلند هیدروکربنی غیر قطبی هستند که به یک سر قطبی کربوکسیلیک اسید متصل شده است. هنگامی که این اسیدها با سطح سیلیکا یا آلومینا تماس پیدا کنند، واکنش تراکمی بین آنها رخ می‌دهد (طرح‌واره ۱). در اثر این واکنش تراکمی، اطراف ذره سیلیکا یا آلومینا با مولکول‌های اسید چرب احاطه می‌شود. احاطه شدن ذره با مولکول‌های اسید آلی باعث می‌شود که ذره بتواند از طریق برهم‌کنش‌های اندروالسی بین زنجیره‌های هیدروکربنی موجود در قیر پخش شود و در هیچ شرایطی ته‌نشین نگردد. همچنین با توجه به این‌که خاکستر مخروط کاج از نوع نانوذرات سیلیکا است، این واکنش تراکمی را می‌توان برای توصیف شیوه پوشش دهی این نانوذرات با اسیدهای چرب آلی نیز به‌کار برد. بنابراین، هدف از پوشش دادن پودرهای مورد نظر با اسیدهای آلی، یکنواختی پخش پودر در بافت قیر پایه و همچنین جلوگیری از ته‌نشین شدن پودرها در قیر مذاب است.



طرح‌واره ۱. واکنش تراکمی یک مولکول استتاریک اسید با گروه‌های OH موجود در سطح سیلیکا.

۳-۲- شناسایی پودرهای تهیه شده

پس از تهیه خاکستر مخروط کاج تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی-گیسل میدانی (شکل ۱) و الگوی پراش پرتو ایکس (شکل ۲) آن ثبت شد. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی-گیسل میدانی نشان می‌دهند که ریخت نانوذرات خاکستر مخروط کاج به صورت خوشه‌های متشکل از دانه‌های تقریباً کروی است و اندازه میانگین نانوذرات آن ۲۳ نانومتر است. نتایج پراش پرتو ایکس وجود SiO_2 (JCPDS No. 32-0993) همراه با مقدارهای اندکی از $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (آلومینیوم هیدروکسید سیلیکات)

یا آلومینای پوشش داده‌شده با استتاریک اسید تهیه شد. همچنین، مخلوط پودرهای آلومینا، سیلیکا و خاکستر کاج پوشش داده‌شده با استتاریک اسید به عنوان ماده افزودنی مرکب در قیر پایه استفاده شد که در ادامه از آن با نام مخلوط پودرها یاد می‌شود.

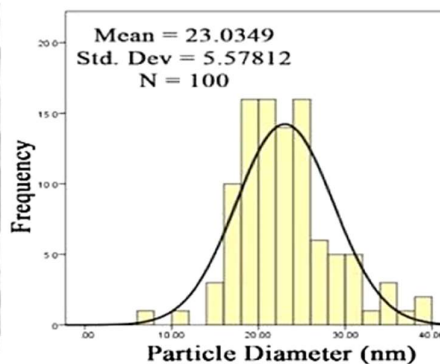
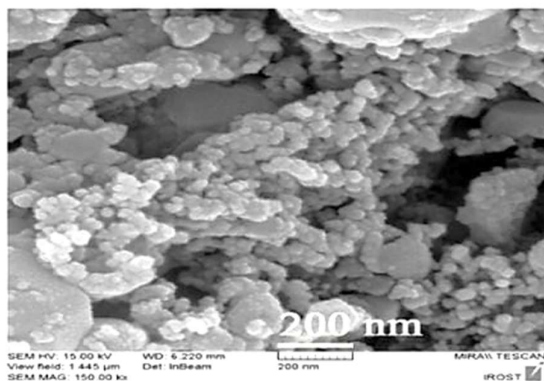
سیلیکای پوشش داده‌شده با اولئیک اسید نیز به عنوان اصلاح‌کننده دیگری تهیه شد. که برای تهیه آن از مخلوط ۳۰ میلی‌لیتر اولئیک اسید با ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۶ درصد استفاده شد و سایر مراحل مانند روش گفته شده برای تهیه سیلیکای پوشش داده‌شده با استتاریک اسید است. تصویر نمونه‌های پوشش داده شده و همچنین طیف زیر قرمز آن‌ها در فایل پیوست نشان داده شده است (شکل‌های S1-S13). همچنین پودر خاکستر کاج با روش‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی‌گیسل میدانی و پراش پرتو ایکس شناسایی شد. برای مقایسه، نمونه‌های پودرهای صنعتی آلومینا و سیلیکای میکرونیزه از تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی شرکت تولید کننده آن‌ها استفاده شد (شکل S14).

۳-۲- آماده‌سازی مخلوط‌ها

اختلاط اصلاح‌کننده و قیر با استفاده از همزن‌های برش بالا امکان پذیر است. این نوع همزن‌ها علاوه بر همزن با سرعت بالا، دارای یک آسیاب جهت اختلاط بهتر و سریع‌تر نیز هستند (شکل S15). ظرفیت همزن مورد استفاده در این پژوهش حدود ۱/۲ لیتر است. ابتدا قیر در آن تا حدود ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد تا روان گردد. سپس براساس نوع مخلوط، مقدار ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ گرم از آن در ظرف همزن ریخته شد. مقدار اصلاح‌کننده بر اساس درصد موردنظر که شامل ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی است، تعیین و توزین گردید و در همزن در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت دوران ۲۵۰۰ دوربر دقیقه به آرامی به قیر اضافه شد. پس از افزودن اصلاح‌کننده، سرعت دوران دستگاه به ۳۵۰۰ دوربر دقیقه افزایش یافت و ۶۰ دقیقه به‌عنوان زمان مورد نیاز برای ذوب شدن و پخش شدن اصلاح‌کننده در قیر در نظر گرفته شد و در پایان، یک مخلوط همگن به دست آمد.

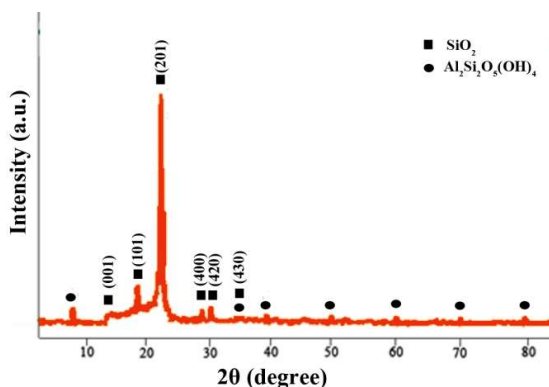
۴-۲- مقایسه ویژگی‌های قیر پایه با قیرهای اصلاح‌شده

آزمایش‌های انجام شده بر روی قیر به‌طور کلی دو دسته هستند. آزمایش‌های کلاسیک که مطابق با استانداردهای ASTM و AASHTO انجام می‌شوند و آزمایش‌های شارپ که چند سالی است به‌طور جدی در کشور آمریکا و بسیاری از کشورهای اروپایی به‌کار گرفته می‌شوند. آزمایش‌های شارپ به‌طور معمول در حالت دینامیک انجام می‌شوند تا رفتار قیر را با تغییر زمان بررسی کنند. برای بررسی عملکرد قیر، آزمایش‌های گوناگونی شامل آزمایش تعیین درجه نفوذ قیر، آزمایش تعیین نقطه نرمی قیر، آزمایش رنومتر برش دینامیکی و



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی-گسیل میدانی خاکستر مخروط کاج کلسینه شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و نمودار توزیع اندازه ذرات آن.

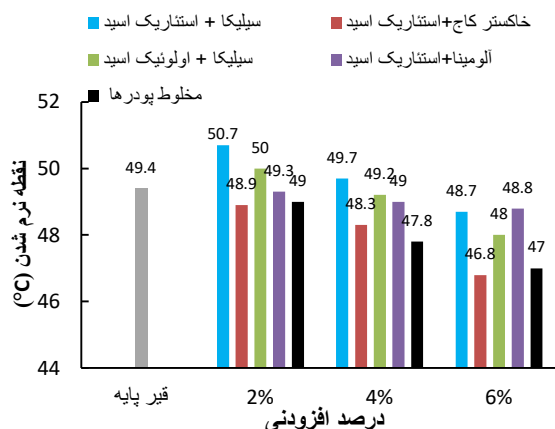
نفوذ بررسی شد. هر چه درجه نفوذ کمتر باشد، قیر سفت‌تر و هر چه درجه نفوذ بیشتر باشد قیر شل‌تر است. نتایج مربوط به درجه نفوذ قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف مواد افزودنی در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که افزودنی‌های شامل ۶ درصد خاکستر کاج پوشش داده‌شده با استتاریک اسید و ۲ درصد سیلیکای پوشش داده‌شده با استتاریک اسید به ترتیب بالاترین و کمترین درجه نفوذ را دارند. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که برهم‌کنش مواد افزودنی با قیر پایه براساس نوع آن‌ها و همچنین برای درصد‌های مختلف آن‌ها متفاوت است. به‌طوری‌که خاکستر کاج پوشش داده‌شده با استتاریک اسید در ۶ درصد، باعث بیشینه کاهش جذب بین مولکولی در قیر پایه می‌شود. این امر منجر به نفوذ بیشتر سوزن دستگاه در سطح قیر می‌شود. در حالی‌که برخی از افزودنی‌های پوشش داده شده مورد استفاده، باعث افزایش جذب بین‌مولکولی در قیر پایه شده و یک بافت سخت‌تر را ایجاد می‌کنند. این سختی مانع نفوذ راحت سوزن دستگاه در سطح قیر می‌شود. به نظر می‌رسد که پودر ۲ درصد سیلیکای پوشش داده‌شده با استتاریک اسید، بیشینه برهم‌کنش را در بافت قیر پایه ایجاد می‌کند و سختی آن را افزایش می‌دهد. در حالت کلی می‌توان دید که افزایش درصد پودرهای پوشش داده‌شده به قیر پایه در تمام موارد باعث افزایش تدریجی درجه نفوذ می‌شود. قرار گرفتن پودرهای پوشش داده‌شده در بافت قیر پایه منجر به ایجاد فاصله در بین زنجیرهای هیدروکربنی قیر می‌شود و در برهم‌کنش لاندنی بین مولکول‌ها اختلال ایجاد می‌کند. این اختلال باعث شل تر شدن قیر می‌شود. این سنجه برای مواردی که نیاز به نفوذ بیشتر قیر بویژه در بافت متخلخل در پوشش‌دهی سطوح با افزودن میزان مناسبی از پودرهای پوشش داده‌شده می‌توان میزان روانی قیر را در دمای معین افزایش داد و آن را برای نفوذ در سطوح مختلف آماده کرد.



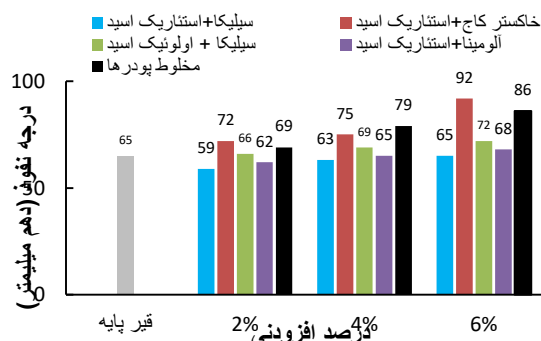
شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس خاکستر مخروط کاج کلسینه شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

را نشان می‌دهد. سامانه بلوری (JCPDS No. 74-1784) در SiO_2 در خاکستر مخروط کاج از نوع چهارگوشه‌ای است که سنجه‌های شبکه آن $a = b = 12/750$ و $c = 4/720$ آنگستروم است و سامانه بلوری $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ از نوع سوجهی است که سنجه‌های شبکه آن $a = 5/140$ ، $b = 8/930$ و $c = 7/370$ آنگستروم است. همچنین اندازه متوسط بلوری ذرات SiO_2 ۳۰ نانومتر به دست آمد. همچنین تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی پودرهای میکروسیلیکا و میکروآلومینا نشان می‌دهند که ریخت هر دو میکروپودر به صورت دانه‌های تقریباً کروی با اندازه‌های متفاوت است (شکل S14).

۳-۳- بررسی ویژگی‌های قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با آزمایش‌های مختلف
۳-۳-۱- آزمایش تعیین درجه نفوذ
قابلیت نفوذپذیری قیرها به وسیله دستگاه تعیین درجه



شکل ۴. نمودار نقطه نرم شدن برای قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌ها با درصدهای متفاوت.



شکل ۳. نمودار درجه نفوذ برای قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌ها با درصدهای متفاوت.

۳-۲-۳-۲- آزمایش تعیین نقطه نرم شدن

قیرهای خالص در برابر افزایش درجه حرارت به تدریج از حالت جامد به حالت خمیری و در پایان، به حالت مایع تغییر حالت می‌دهند. سرعت تغییر حالت برای قیرهای مختلف متفاوت است. نقطه نرمی یکی از معیارهایی است که در تعیین حساسیت قیرها نسبت به درجه حرارت به‌کار می‌رود. درجه حرارتی که در آن قیر از حالت جامد به حالت روان درمی‌آید، نقطه نرمی قیر نامیده می‌شود. قیری که درجه نرمی‌اش بیشتر باشد، کمتر در مقابل تغییرات حرارت حساس بوده و درجه نفوذ یا کندروانی آن کمتر تغییر می‌کند. نتایج مربوط به آزمایش نقطه نرم شدن قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با مواد افزودنی پوشش‌داده شده به ازای افزایش درصد افزودنی‌ها در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. نقطه نرم شدن قیر پایه برابر ۴۹/۴ درجه سانتی-گراد است. افزودن اصلاح‌کننده‌ها با درصدهای وزنی متفاوت به قیر پایه، تغییر اندکی در نقطه نرم‌شدن آن ایجاد می‌کند. این امر یک برتری مهم برای قیر اصلاح‌شده محسوب می‌شود. اگر نقطه نرم‌شدن قیر در اثر افزایش مواد افزودنی کاهش یابد، این قیر مصرف صنعتی نخواهد داشت، زیرا در این حالت در اثر افزایش دما، قیر یک حالت جاری به خود می‌گیرد و کیفیت پوشش سطح مورد نظر را به شدت کاهش می‌دهد. افزایش نقطه نرم‌شدن و یا ثابت ماندن آن در اثر مواد افزودنی یک ویژگی مثبت و کاربردی برای قیر پایه محسوب می‌شود.

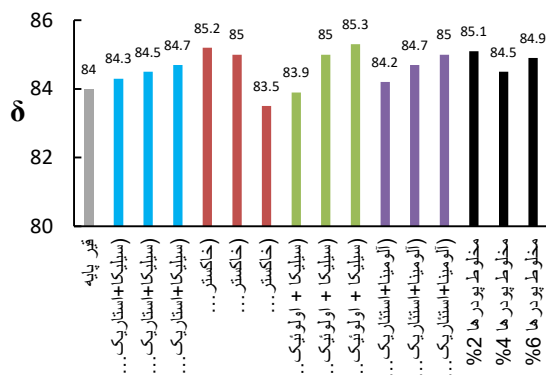
رئومتری برش دینامیکی در بسامد ثابت ۱۰ رادیان بر ثانیه و تحت کرنش کنترل‌شده‌ای انجام گرفت. مدول کل تنش برشی (G^*) و زاویه اختلاف فاز (δ) در دماهای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد در طی آزمایش‌های مختلف به‌دست آمدند. نتایج مربوط به آزمایش رئومتری برش دینامیکی قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده در شکل‌های ۵ تا ۱۰ نشان داده شده‌اند و همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از افزودنی‌ها برای اصلاح قیر پایه، تغییر بسیار شدیدی در سنجه‌های G^* و $\frac{IG^*}{\sin\delta}$ ایجاد نمی‌کند. بیشینه افزایش مدول کل تنش برشی (G^*) نسبت به قیر پایه برای نمونه ۲ درصد سیلیکای پوشش داده‌شده با اولنیک اسید در دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد (۳/۸۱ کیلوپاسکال) مشاهده می‌شود. همچنین، بیشترین کاهش G^* نسبت به قیر پایه برای نمونه ۴ درصد آلومینای پوشش داده‌شده با استتاریک اسید در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد (۰/۴۵۶ کیلوپاسکال) مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد که استفاده از درصدهای بیشتر ماده افزودنی سیلیکای پوشش داده‌شده با اولنیک اسید برای رسیدن به بیشینه میزان مدول کل تنش برشی در قیرهای اصلاح شده نسبت به بقیه افزودنی‌ها مناسب‌تر است. شکل و اندازه پودرهای افزودنی می‌تواند در تغییر سنجه‌های رئومتری برش دینامیکی موثر باشد.

۳-۳-۳-۴- آزمایش رئومتر تیرچه خمشی

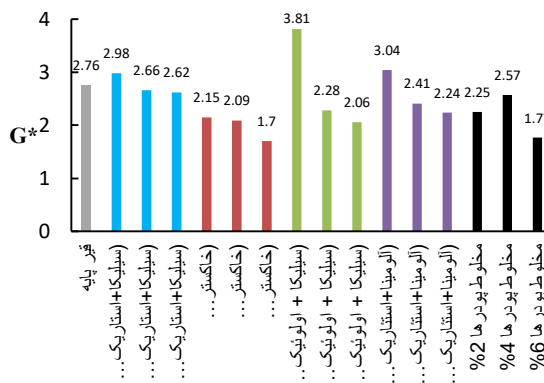
از آن‌جا که قیر در دماهای پایین بسیار سفت و سخت است، ویژگی‌های قیر در این دماها را نمی‌توان با استفاده از رئومتر برشی دینامیکی تعیین کرد. به این منظور از آزمایش جدیدی که در آن رفتار خمشی مورد بررسی قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. این آزمایش نشانگر مقاومت (سختی) خمشی نمونه قیر تحت بارگذاری است. هر چه یک نمونه قیر مقاومت (سختی) خمشی بالاتری داشته باشد،

۳-۳-۳-۳- آزمایش رئومتر برش دینامیکی

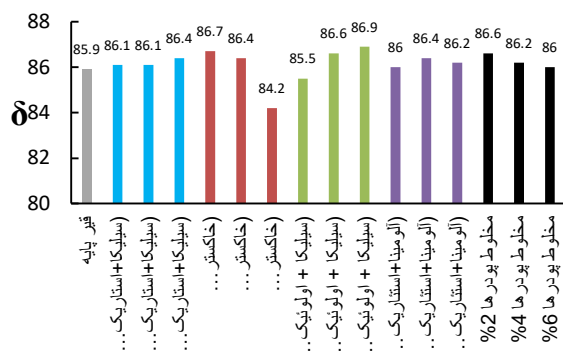
برای بررسی رفتار قیر، آزمایشی که اثر مدت بارگذاری و دما را لحاظ کند، آزمایش مطلوبی است. در زمینه‌های مهندسی دیگر به ویژه در صنایع پلاستیک، دستگاهی به نام رئومتر برشی دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه می‌تواند "مدول مرکب تنش برشی" و "زاویه اختلاف فاز" را در دمای بالا اندازه‌گیری کند و اصول اولیه آن بسیار ساده است. بنابراین، آزمایش



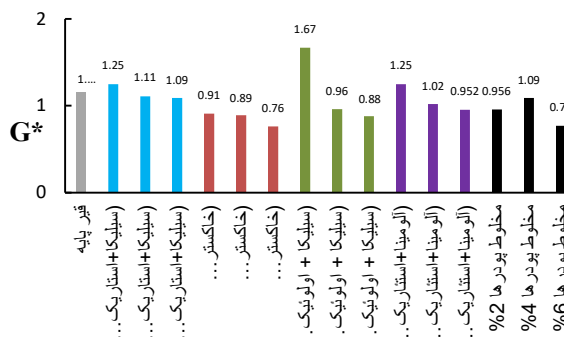
شکل ۸. نمودار تغییرات زاویه اختلاف فاز در دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد با تغییر درصد افزودنی‌ها.



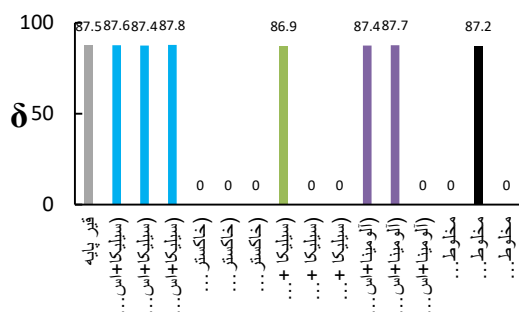
شکل ۵. نمودار تغییرات مدول کل تنش برشی در دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد با تغییر درصد افزودنی‌ها.



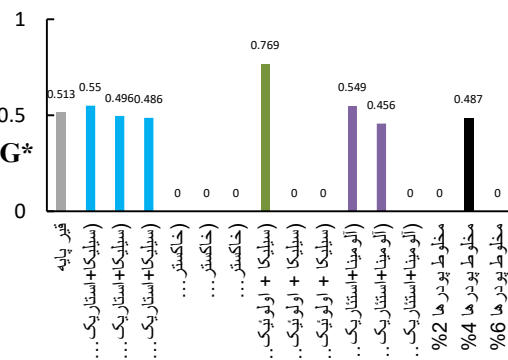
شکل ۹. نمودار تغییرات زاویه اختلاف فاز در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد با تغییر درصد افزودنی‌ها.



شکل ۶. نمودار تغییرات مدول کل تنش برشی در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد با تغییر درصد افزودنی‌ها.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات زاویه اختلاف فاز در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با تغییر درصد افزودنی‌ها.

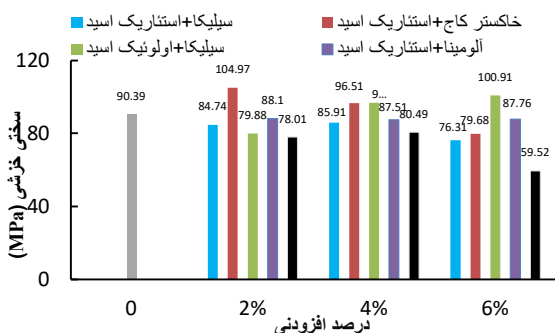


شکل ۷. نمودار تغییرات مدول کل تنش برشی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با تغییر درصد افزودنی‌ها.

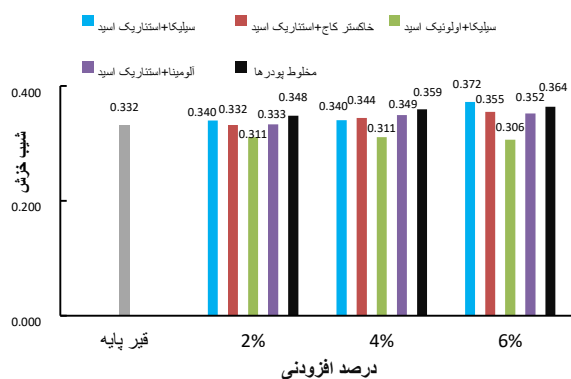
می‌کند، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این آزمایش بر این اصل استوار است که در دمای پایین، فیر اغلب رفتار کشسان از خود نشان می‌دهد. تیرچه فیری به مدت ۴ دقیقه

می‌تواند بارگذاری بیشتری را در یک دمای معین تحمل کند. در رونتر تیرچه خمشی، تیرچه ساخته شده از فیر در سردترین دمایی که فیر مورد نظر در طول عمرش تحمل

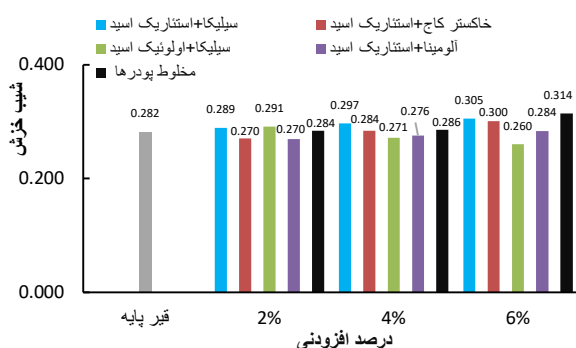
یکدیگر نزدیک است و این امر نشان می‌دهد که ماهیت نمونه‌های قیر اصلاح‌شده با قیر پایه تفاوت چندانی ندارد. این پدیده یک نکته قوت در اصلاح قیر پایه محسوب می‌شود.



شکل ۱۲. نمودار سختی خزشی در دمای ۱۲- درجه سانتی‌گراد برای قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌ها با درصد‌های متفاوت.



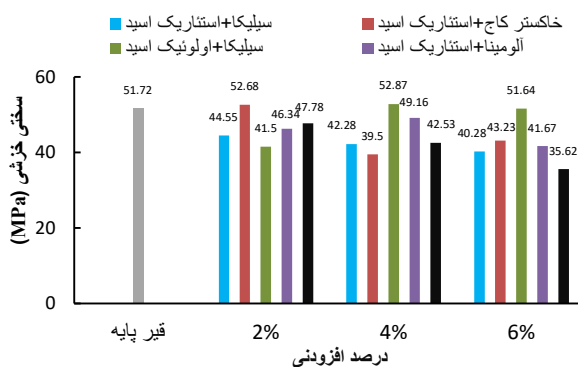
شکل ۱۳. شیب خزش برای قیر پایه و قیرهای اصلاح شده در دمای ۶- درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۴. شیب خزش برای قیر پایه و قیرهای اصلاح شده در دمای ۱۲- درجه سانتی‌گراد.

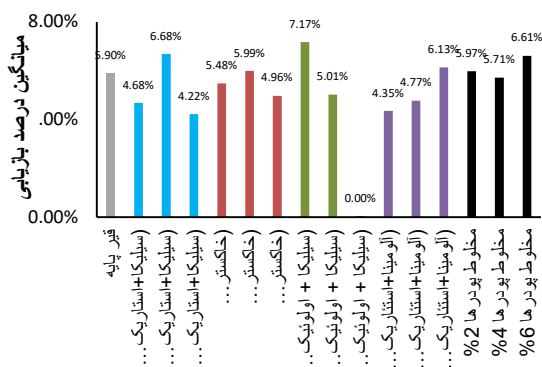
در بار ثابت قرار می‌گیرد و مقدار افت و خیز حاصل در وسط تیرچه در این مدت اندازمگیری می‌شود. در این آزمایش که در دمای پایین، مطابق با آب و هوای منطقه مورد نظر انجام می‌شود، سختی خمشی که بیانگر مقاومت آسفالت در اثر بار ثابت است و همچنین شیب یا نرخ خم (m) که بیانگر تغییر سختی با زمان بار اعمال شده می‌باشد، به دست می‌آید. سختی خمشی قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده در دو دمای ۶- و ۱۲- درجه سانتی‌گراد بررسی شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). قیر پایه در دمای ۶- و ۱۲- درجه سانتی‌گراد به ترتیب دارای سختی خزشی ۵۱/۷۲ و ۹۰/۳۹ مگا پاسکال است. قیر اصلاح شده با افزودن ۲ درصد وزنی خاکستر کاج پوشش داده‌شده با استناریک اسید، بیشترین سختی خزشی را در دمای ۱۲- درجه سانتی‌گراد در بین نمونه‌ها دارا است. همچنین، در دمای ۶- درجه سانتی‌گراد، دو نمونه اصلاح شده با افزودن ۲ درصد خاکستر کاج پوشش داده‌شده با استناریک اسید و ۴ درصد سیلیکای پوشش داده‌شده با اولونیک اسید، بیشترین سختی خزشی را نشان دادند. برخی از افزودنی‌ها با درصد وزنی معین، سختی قیر پایه را افزایش داده و موجب بهبود ویژگی‌های بارگذاری قیر می‌شوند. این نوع افزودنی‌ها مانند یک شبکه در بافت قیر توزیع شده و مقاومت خزشی آن را افزایش می‌دهند. البته برخی از افزودنی‌ها با درصد‌های وزنی معین مانند ۶ درصد مخلوط پودرها افزودنی، باعث کاهش قابل توجهی در مقاومت خزشی قیر می‌شوند. این ترکیب از مواد افزودنی باعث کاهش مقاومت بین لایه‌های قیر شده و باعث افت بارگذاری می‌شود.

همچنین نتایج مربوط به شیب (نرخ) خزش (m) قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده در دو دمای ۶- و ۱۲- درجه سانتی‌گراد در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده‌اند. با مقایسه دو نمودار مشاهده می‌شود که شیب یا نرخ تغییرات خزش نمونه‌ها در دمای ۶- و ۱۲- درجه سانتی‌گراد به

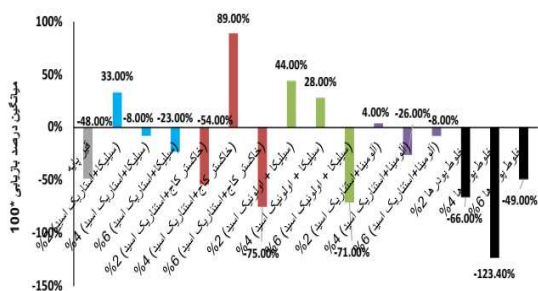


شکل ۱۱. نمودار سختی خزشی در دمای ۶- درجه سانتی‌گراد برای قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌ها با درصد‌های متفاوت.

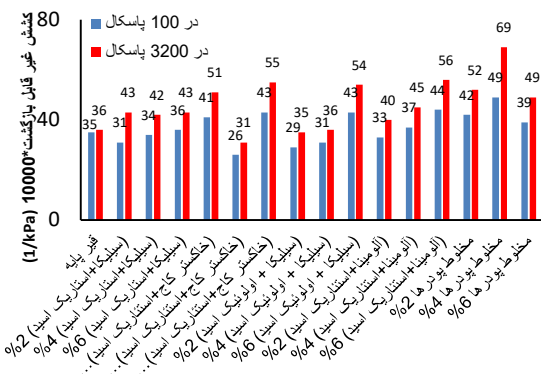
۳-۵-۳- آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش



شکل ۱۵. میانگین درصد بازیابی در ۱۰۰ پاسکال در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۶. میانگین درصد بازیابی در ۳۲۰۰ پاسکال در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۷. نمودار کتس غیرقابل بازگشت در تنش‌های ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد.

هیدروکربن غیرقطبی موجود در فیر پایه باعث می‌شود که پراکندگی یکنواختی از پودرهای معدنی پوشش داده‌شده در بافت فیر پایه فراهم شود. همچنین این برهم‌کنش‌ها مانع

از آرایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد و در دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال انجام گرفت (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). سنج‌های اصلی به‌دست آمده از این آزمون، میانگین درصد بازیابی (R) و میانگین تطابق خزش غیرقابل بازیابی J_{nr} هستند. در آزمون بازگشت خزشی در چند سطح تنش، سنج R پاسخ کشسان فیر باقی‌مانده را نشان می‌دهد. سنج J_{nr} ، نسبت کشش غیرقابل بازگشت به تنش اعمال‌شده در طول این آزمون است. کاهش این سنج، کاهش شیارشدگی را نشان می‌دهد. آرایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش نسبت به آزمون رنومتری برش دینامیکی حساسیت به شیارشدگی را به‌ویژه برای فیرهای اصلاح‌شده بهتر پیش‌بینی می‌کند. به‌طور کلی، فیر ویژگی کشسانی اندکی دارد ولی خصلت موسسانی آن بیشتر است. برای آن‌که میزان اندک کشسانی فیر بررسی شود، لازم است که آزمون بازگشت خزشی در چند سطح تنش انجام گیرد. نتایج نشان می‌دهند که میانگین درصد بازیابی نمونه‌ها تفاوت قابل توجهی با هم دارند، به‌طوری‌که بیشینه درصد بازیابی در تنش ۳۲۰۰ پاسکال برای نمونه ۴ درصد خاکستر کاج پوشش داده‌شده با استتاریک اسید مشاهده می‌شود و کمینه این سنج مربوط به نمونه ۴ درصد مخلوط پودرهای پوشش داده‌شده است. همچنین در تنش ۱۰۰ پاسکال، بیشینه درصد بازیابی مربوط به نمونه ۲ درصد سیلیکای پوشش داده‌شده با اولنیک اسید است و کمینه این مقدار به ۶ درصد سیلیکای پوشش داده شده با اولنیک اسید تعلق دارد. این نتایج نشان می‌دهند که ماهیت کشسانی فیر پایه و فیرهای اصلاح‌شده به یکدیگر نزدیک هستند. وجود مواد افزودنی ویژه در بافت فیر می‌تواند در بازیابی شکل اولیه و بروز ویژگی کشسانی آن اثرگذار باشد. برخی از افزودنی‌ها مانند مخلوط پودرها و یا ۶ درصد سیلیکای پوشش داده‌شده با اولنیک اسید با ایجاد خصلت موسسانی زیاد مانع از بازیابی کشش نمونه‌ها می‌شوند. نمودار کشش غیر قابل بازگشت برای هر دو تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در شکل ۱۷ نشان داده شده است. گفتن این نکته لازم است که تمام نتایج به‌دست آمده در این نمودار، با ضرب کردن اعداد در ۱۰۰۰۰ رسم شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا پودرهای معدنی مختلف شامل میکروسیلیکا و میکروآلمینای صنعتی و همچنین خاکستر مخروط کاج با دو اسید چرب آلی (اولنیک اسید و استتاریک اسید) در شرایط گرمایی پوشش داده شدند. نتایج نشان دادند که اسیدهای چرب به‌خوبی اطراف ذرات معدنی را پوشش داده و یک محیط مناسب برای پخش این ذرات در فیر مذاب پایه فراهم می‌کنند. برهم‌کنش‌های واندروالسی بین زنجیره‌های غیرقطبی اسیدهای چرب با مولکول‌های

پیوست

فایل پیوست (Electronic Supporting Information (ESI)) جهت اطلاعات تکمیلی به صورت برخط قرار داده می‌شود.

مراجع

- [1] پ. ا. ی. مجیدزاده، هنر ایران باستان (چاپ چهارم)، انتشارات دانشگاه تهران. ۱۳۸۶.
- [2] T. C. Barker, T. Barker, D. Gerhold, *The Rise and Rise of Road Transport*, Cambridge University Press. 1995.
- [3] N. A. P. Association, *The Asphalt Paving Industry, A Global Perspective*, ed: EAPA, Brussels. 2011.
- [4] A. J. Hoiberg, *Bituminous Materials-asphalts, Tars and Pitches*. Interscience Publishers, 1965.
- [5] J. Read, D. Whiteoak, R. N. Hunter, *The Shell Bitumen Handbook*. Thomas Telford, 2003.
- [6] J. -S. Chen, M. -C. Liao, H. -H. Tsai, *J. Fail. Anal. Prev.* 2 (2002) 75.
- [7] L. W. Corbett, *Anal. Chem.* 41 (1969) 576.
- [8] ا. حامی، مصالح ساختمانی، انتشارات دانشگاه تهران. ۱۳۹۳.
- [9] (چاپ اول) سازی مشخصات قیرهای راه قیر و مواد قیری- مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. ۱۳۸۸.
- [10] K. Chrissafis, K. M. Paraskevopoulos, G. Z. Papageorgiou, D. N. Bikiaris, *J. Appl. Polym. Sci.* 110 (2008) 1739.
- [11] T. Barik, B. Sahu, V. Swain, *Parasitol. Res.* 103 (2008) 253.
- [12] S. Lu, X. Xian-tao, Y. Peng, *J. Highway Transp. Res. Dev.* 30 (2013) 1.
- [13] G. Shafabakhsh, O. J. Ani, M. Talebsafa, *Constr. Build. Mater.* 85 (2015) 136.
- [14] M. Arabani, A. Hagh, R. Tanzadeh, *Proceedings of the 4th International Conference on Nanostructures (ICNS4)* 12 (2012).
- [15] H. Yao, Z. You, L. Li, S. W. Goh, C. Dedene, *CICTP 2012: Multimodal Transportation Systems-Convenient, Safe, Cost-Effective, Efficient*, 3399 (2012).
- [16] H. Yao, Z. You, L. Li, C. H. Lee, D. Wingard, Y. K. Yap, X. Shi, S. W. Goh, *J. Mater. Civ. Eng.* 25 (2012) 1619.
- [17] Y. Chao, H. Chen, *New Build. Mater.* 6 (2009) 8282.
- [18] S. G. Jahromi, A. Khodaii, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2894.
- [19] J. Mills-Beale, Z. You, *Nanotechnology in Civil Infrastructure*. Springer, 2011.

از رسوب پودرهای معدنی در قیر مذاب می‌شوند. این پدیده باعث پیدایش یک سوسپانسیون پایدار از ذرات معدنی در بافت قیر پایه می‌شود که از دیدگاه فناوری استفاده از قیر، اهمیت بسیار زیادی دارد. آزمون‌های مختلف مربوط به قیرهای اصلاح شده با پودرهای معدنی و مقایسه نتایج آن‌ها با قیر پایه (۶۰-۷۰) نشان دادند که ویژگی‌های قیرهای اصلاح شده در بیشتر موارد نسبت به قیر پایه افزایش قابل توجهی پیدا کرده‌اند. آزمون درجه نفوذ نشان داد که قیرهای اصلاح شده روان تر شده و قابلیت نفوذ آن‌ها در بافت‌های متخلخل افزایش یافته است. این پدیده در فناوری تولید پوشش‌ها و همچنین ایجاد پوشش‌های محافظ بر پایه قیر اهمیت ویژه‌ای دارد. نقطه نرم شدن قیرهای اصلاح شده در مقایسه با قیر پایه تغییر چندانی نشان نداد که این امر یک نکته قوت برای قیرهای اصلاح شده محسوب می‌شود. در صورتی که اصلاح قیر منجر به کاهش نقطه نرم شدن شود، قیر مورد نظر فاقد کاربرد و ارزش صنعتی خواهد بود. پوشش‌های تهیه شده با قیرهای اصلاح شده در این پژوهش، از قابلیت مقاومت مناسب در برابر افزایش دما برخوردار خواهند بود. همچنین قیرهای اصلاح شده آزمون رئومتر برش دینامیکی را با موفقیت پشت سر گذاشتند و نتایج نشان دادند که اصلاح قیر پایه با پودرهای مورد نظر تغییر شدیدی در پارامترهای رئومتر برش دینامیکی ایجاد نمی‌کند. نتایج آزمون رئومتر تیرچه خمشی قیرهای اصلاح شده و مقایسه آن‌ها با قیر پایه (۶۰-۷۰) نشان دادند که افزودن برخی از پودرهای معدنی با نسبت‌های معین می‌تواند سختی قیر پایه را افزایش داده و باعث بهبود ویژگی‌های بارگذاری قیر شود. همچنین نتایج آزمون بازگشت خزشی در چند سطح تنش نشان دادند که مخلوط کردن پودرهای معدنی پوشش داده شده با اسیدهای آلی می‌تواند بر ویژگی‌های مومسانی و کشسانی قیر اثر گذارد. برخی از مواد افزودنی در این پژوهش، باعث افزایش ویژگی مومسانی قیر می‌شوند.

به‌طور کلی، اصلاح قیر پایه (۶۰-۷۰) با پودرهای معدنی پوشش داده شده با اولئیک اسید و استناریک اسید باعث پیدایش ویژگی‌های خاص و بهبود ویژگی‌های عمومی قیر پایه می‌شود. این عملیات اصلاح باعث می‌شود که بتوان از قیرهای اصلاح شده در ساخت انواع پوشش‌های عایق و همچنین پوشش دادن سطوح مختلف به ویژه سطوح فلزی استفاده نمود. نتایج این پژوهش گام مهمی در ارتقاء فناوری قیر محسوب می‌شود.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: ایران، استهبان، مرکز آموزش عالی استهبان،
دانشکده شیمی