

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

بررسی و مقایسه تاثیر نانورس و نانو اکسید روی بر فرسودگی قیر

نگارنده : امید فراهینی

استاد راهنما:

دکتر حسین قاسم زاده طهرانی

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۹۶۳۹/۳۰
تاریخ: ۱۴/۱۲/۹۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امید فراهینی با شماره دانشجویی ۹۳۱۲۹۶۴ رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری تحت عنوان بررسی تأثیر نانو رس و نانو اکسید بر فرسودگی قیر که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۱۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۵.۱۵ درجه کلی) مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

| عضو هیأت داوران | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
|---------------------------|----------------------------|------------|-------|
| ۱- استاد راهنمای اول | دکتر حسین قاسم زاده طهرانی | استادیار | |
| ۲- استاد راهنمای دوم | | | |
| ۳- استاد مشاور | | | |
| ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی | دکتر مهدی گلی | استادیار | |
| ۵- استاد ممتحن اول | دکتر ایمان آقایان | استادیار | |
| ۶- استاد ممتحن دوم | دکتر عبدالاحد چوپانی | استادیار | |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبعیه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به:

پدر، مادر و همسر عزیزم که در این راه مرا یاری کردند.

تشکر و قدردانی:

از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر حسین قاسم زاده طهرانی که زحمت راهنمایی این پایان نامه را برعهده داشتند، کمال سپاس را دارم.

تعهد نامه

این جانب امید فراهینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران

دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی و مقایسه تاثیر نانورس و نانو اکسید روی بر فرسودگی قیر

تحت راهنمایی دکتر حسین قاسم‌زاده طهرانی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « **Shahrood University** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

چکیده

قیر عنصر اصلی مخلوط آسفالتی و ماده‌ای ویسکوالاستیک است و پاسخ مکانیکی آن به دما و مدت زمان بارگذاری وابسته است. روسازی آسفالتی برای داشتن قابلیت بهره‌برداری در طول دوره طرح خود نباید بیش از اندازه سخت شود. محققین در این زمینه عقیده دارند که مهم‌ترین عامل این تغییرات، پدیده سخت شدن تدریجی است که موجب ظهور انواع آسیب‌دیدگی‌ها در رویه آسفالت می‌شود. فرآیندهای متفاوت و متنوعی در تغییرات تدریجی یا سخت شدن قیر دخالت دارد که از میان آن‌ها می‌توان به اکسیداسیون، واکنش‌های فتوشیمیایی، تصعید مواد فرار و سبک قیر، پلیمریزاسیون، کربنیزاسیون و جذب روغن‌های موجود در قیر توسط سنگ‌دانه‌ها اشاره کرد. در این پژوهش به بررسی تاثیر نانو اکسیدروی و نانو رس و ترکیب همزمان دو ماده بر رفتار پیرشدگی قیر طی آزمایشات نقطه نرمی، درجه نفوذ، افت وزنی قیر، ویسکوزیته قیر و شاخص پیرشدگی ویسکوزیته پرداخته می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد، افزودن نانو اکسیدروی تا ۱/۴٪ در دو حالت قبل و بعد از پیرشدگی موجب افزایش نقطه نرمی و در نتیجه بهبود عملکرد قیر در دمای بالا می‌شود. عملکرد قیرهای اصلاح شده با ترکیب نانومواد نشان داد که قیر حاوی ۱/۴٪ نانو اکسیدروی به همراه ۲٪ نانورس در حالت پیرنشده، دارای ویسکوزیته بالاتری نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین، افزودن نانو ذرات به قیر موجب افزایش ویسکوزیته در دو حالت پیرشده RTFO و PAV می‌شود. به علاوه، قیر حاوی ۱/۴٪ نانو اکسیدروی و ۲٪ نانو رس دارای شاخص VAI کمتری نسبت به نمونه قیر خالص می‌باشد. در واقع، نانومواد موجب بهبود پیرشدگی قیر در حالت RTFO شده است. نتایج نمونه‌های PAV نیز نشان می‌دهد، افزودن نانو ذرات باعث کاهش شاخص پیرشدگی شده است.

واژه‌های کلیدی: قیر، پیرشدگی قیر، نانورس، نانو اکسیدروی

فهرست مطالب

| | |
|---|----|
| فصل ۱: | ۱ |
| کلیات | ۱ |
| ۱-۱- مقدمه | ۲ |
| ۱-۲- پیرشدگی قیر | ۴ |
| ۱-۲-۱- فرآیند پیرشدگی قیر | ۵ |
| ۱-۲-۲- تاثیر افزودنیهای نانو بر رفتار قیر | ۶ |
| ۱-۲-۳- اصلاح قیر | ۸ |
| ۱-۳- شرح مسئله | ۱۰ |
| ۱-۴- ضرورت تحقیق | ۱۱ |
| ۱-۵- نوآوری پژوهش | ۱۱ |
| ۱-۶- معرفی ساختار پایان نامه | ۱۲ |
| فصل ۲: | ۱۵ |
| مروری بر منابع | ۱۵ |
| ۱-۲- مقدمه | ۱۶ |
| ۱-۱-۲- تاثیر قیر بر عملکرد روسازیهای آسفالتی | ۱۷ |
| ۱-۲-۲- تاثیر نانو تکنولوژی بر رفتار عملکردی قیر | ۱۹ |
| ۱-۲-۳- پیرشدگی قیر | ۲۰ |
| ۱-۲-۴- آزمایشات شبیه سازی پیرشدگی قیر | ۲۲ |
| •آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) (AASHTOT-T240) | ۲۳ |
| •آزمایش محفظه تسریع پیری | ۲۳ |
| ۱-۲-۲- مروری بر تحقیقات گذشته | ۲۴ |
| ۱-۲-۳- خلاصه تحقیق مونتیپارا و همکاران | ۲۴ |
| ۱-۳-۲- خلاصه تحقیق Mehrez و همکاران | ۲۵ |
| ۲-۳-۲- خلاصه تحقیق Yamaguchi و همکاران | ۲۵ |
| ۳-۳-۲- خلاصه تحقیق Recasense و همکاران | ۲۶ |
| ۴-۳-۲- خلاصه تحقیق گارسیا مولاس و همکاران | ۲۶ |
| ۵-۳-۲- خلاصه تحقیق Durrieu و همکاران | ۲۷ |

| | |
|----|--|
| ۲۷ | خلاصه تحقیق Zang و همکاران |
| ۲۸ | خلاصه تحقیق Wu و همکاران |
| ۲۸ | خلاصه تحقیق غفارپور جهرمی |
| ۲۹ | خلاصه تحقیق You و همکاران |
| ۳۰ | خلاصه تحقیق Pan |
| ۳۰ | خلاصه تحقیق Iwanski |
| ۳۰ | خلاصه تحقیق Fang |
| ۳۱ | خلاصه تحقیق Zhao |
| ۳۱ | خلاصه تحقیق Feng |
| ۳۲ | خلاصه تحقیقات و مطالعات پیشین |
| ۳۹ | فصل ۳: |
| ۳۹ | روش کار و آزمایشهای اولیه |
| ۴۰ | ۱-۳- مقدمه |
| ۴۱ | ۲-۳- قیر |
| ۴۲ | ۳-۳- نانو مواد |
| ۴۲ | ۱-۳-۳- نانو رس |
| ۴۶ | ۲-۳-۳- نانو اکسید روی |
| ۵۱ | ۴-۳- آزمایشات انجام شده |
| ۵۲ | ۲-۴-۳- آزمایش تعیین درجه نفوذ قیر |
| ۵۳ | ۳-۴-۳- آزمایش تعیین نقطه نرمی قیر |
| ۵۴ | ۴-۴-۳- آزمایش افت وزنی قیر |
| ۵۶ | ۵-۴-۳- آزمایش ویسکومتر چرخشی (Rotary Viscometer) |
| ۵۷ | ۶-۴-۳- ساخت نمونه‌های قیر پیر شده |
| ۵۸ | ۷-۴-۳- آزمایش محفظه تسریع پیری |
| ۵۹ | فصل ۴: |
| ۵۹ | تحلیل و تفسیر نتایج |
| ۶۰ | ۱-۴- مقدمه |
| ۶۰ | ۲-۴- نتایج آزمایشات کلاسیک قیر به منظور تعیین درصد بهینه نانو مواد |
| ۶۰ | ۱-۲-۴- نتایج آزمایش درجه نفوذ قیر |
| ۶۵ | ۲-۲-۴- نتایج آزمایش نقطه نرمی قیر |
| ۶۹ | ۳-۲-۴- نتایج آزمایش افت وزنی قیر |
| ۷۳ | ۳-۴- انتخاب طرح نهایی قیر اصلاح شده با نانومواد |

| | |
|----|---|
| ۷۴ | ۴-۴- تاثیر نانومواد بر رفتار ویسکوزیته قیر..... |
| ۷۵ | ۴-۵- تاثیر نانومواد بر رفتار پیرشدگی قیر..... |
| ۷۷ | فصل ۵: |
| ۷۷ | جمع بندی و پیشنهادات..... |
| ۷۸ | ۵-۱- مقدمه..... |
| ۷۸ | ۵-۲- نتیجه گیری..... |
| ۸۰ | ۵-۳- پیشنهادات..... |

فهرست اشکال

| | |
|----|---|
| ۱۵ | فصل ۲: |
| ۲۲ | شکل (۱-۲) پدیده سخت شدگی قیر در مراحل مختلف تولید و اجرای آسفالت |
| ۳۹ | فصل ۳: |
| ۴۴ | شکل (۱-۳) نتایج FTIR نانو رس مونتمریلونیت مورد استفاده در این مطالعه |
| ۴۵ | شکل (۲-۳) تصویر نانورس مونتمریلونیت مورد استفاده در این مطالعه بر اساس مشخصات فیزیکی |
| ۴۵ | شکل (۳-۳) تصویر نانورس مونتمریلونیت مورد استفاده در این مطالعه بر اساس خصوصیات شیمیایی |
| ۴۶ | شکل (۴-۳) نتایج X-Ray نانو رس مونتمریلونیت مورد استفاده در این مطالعه |
| ۴۸ | شکل (۵-۳) خصوصیات شیمیایی و فیزیکی نانو اکسید روی (Zno) مورد استفاده در این مطالعه |
| ۴۹ | شکل (۶-۳) تصویر SEM از نانو اکسید روی (Zno) مورد استفاده در این پژوهش |
| ۵۰ | شکل (۷-۳) تصویر TEM از نانو اکسید روی (Zno) مورد استفاده در این پژوهش |
| ۵۰ | شکل (۸-۳) نتایج آزمایش XRD از نانو اکسید روی (Zno) مورد استفاده در این پژوهش |
| ۵۳ | شکل (۹-۳) دستگاه اندازه گیری درجه نفوذ سوزنی مطابق با استاندارد ASTM D5 |
| ۵۴ | شکل (۱۰-۳) دستگاه اندازه گیری نقطه نرمی مطابق با استاندارد ASTM |
| ۵۵ | شکل (۱۱-۳) دستگاه تعیین افت وزنی قیر مطابق با استاندارد ASTM D 06 |
| ۵۶ | شکل (۱۲-۳) دستگاه تعیین ویسکوزیته قیر مطابق با استاندارد ASTM D4402 |
| ۵۷ | شکل (۱۳-۳) دستگاه آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) |
| ۵۸ | شکل (۱۴-۳) دستگاه آزمایش محفظه تسریع پیری (PAV) |
| ۵۹ | فصل ۴: |
| ۶۲ | شکل (۱-۴) تاثیر نانورس بر درجه نفوذ قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی |
| ۶۲ | شکل (۲-۴) تاثیر نانو اکسید روی بر درجه نفوذ قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر |
| ۶۴ | شکل (۳-۴) تاثیر نانورس بر درجه نفوذ قیر اصلاح شده با نانو اکسید روی ۰/۷٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی |
| ۶۴ | شکل (۴-۴) تاثیر نانورس بر درجه نفوذ قیر اصلاح شده با نانو اکسید روی ۱/۴٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی |
| ۶۵ | شکل (۵-۴) تاثیر نانورس بر درجه نفوذ قیر اصلاح شده با نانو اکسید روی ۲/۱٪ قبل و بعد از آزمایش افت |
| ۶۶ | شکل (۶-۴) تاثیر نانورس بر نقطه نرمی قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی |
| ۶۶ | شکل (۷-۴) تاثیر نانو اکسید روی بر نقطه نرمی قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی |
| ۶۸ | شکل (۸-۴) تاثیر نانورس بر نقطه نرمی قیر اصلاح شده با نانو اکسید روی ۰/۷٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی |

- شکل (۹-۴) تاثیر نانورس بر نقطه نرمی قیر اصلاح شده با نانو اکسیدروی ۱/۴٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی ۶۸
- شکل (۱۰-۴) تاثیر نانورس بر نقطه نرمی قیر اصلاح شده با نانو اکسیدروی ۲/۱٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی ۶۹
- شکل (۱۱-۴) تاثیر نانورس بر افت وزنی ۷۰
- شکل (۱۲-۴) تاثیر نانو اکسیدروی بر افت وزنی ۷۰
- شکل (۱۳-۴) تاثیر نانورس بر افت وزنی قیر اصلاح شده با ۷۲
- شکل (۱۴-۴) تاثیر نانورس بر افت وزنی قیر اصلاح شده با ۷۲
- شکل (۱۵-۴) تاثیر نانورس بر افت وزنی قیر اصلاح شده ۷۳
- شکل (۱۶-۴) تاثیر ترکیب نانورس و نانو اکسیدروی بر ویسکوزیته ۷۴

فهرست جداول

- فصل ۲:** ۱۵
- جدول (۱-۲) خلاصه مطالعات و پژوهشهای بررسی شده در زمینه پیرشدگی قیر و تاثیر افزودنیهای مختلف بر عملکرد فرسودگی قیر ۳۳
- فصل ۳:** ۳۹
- جدول (۱-۳) مشخصات فیزیکی قیر مورد استفاده در ساخت نمونه های آسفالتی ۴۲
- جدول (۲-۳) مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانو رس مونتمریلونیت [۵۰] ۴۴
- جدول (۳-۳) آنالیز شیمیایی نانورس مونتمریلونیت مورد استفاده در این مطالعه [۵۰] ۴۴
- جدول (۵-۳) کدبندی قیرهای اصلاح با نانو مواد ۵۲

فصل ۱:

کلیات

با پیشرفت علم و تکنولوژی، قیر کاربردهای بسیار متنوع و گسترده‌ای در صنایع گوناگون و جهت مصارف مختلف از جمله راه‌سازی، پوشش کف، پوشش بام، لوله‌های زیر زمینی، محافظت فلزات، آب‌بندی مخازن، کانال‌ها، پل‌ها، تثبیت شن‌های روان، رنگ آمیزی و... پیدا نموده است. قیر عنصر اصلی مخلوط آسفالتی است که خصوصیات ویسکوالاستیک آن را در طول فرآیند تولید و در عمر خدمت‌دهی کنترل می‌کند. قیر ماده‌ای ویسکوالاستیک است و پاسخ مکانیکی آن به دما و مدت زمان بارگذاری وابسته است. در دماهای پایین و زمان‌های بارگذاری کوتاه (مانند حرکت سریع ترافیک) مانند یک جسم جامد الاستیک عمل می‌کند در حالی که در دماهای بالا و زمان‌های بارگذاری طولانی (مانند حرکت وسایل نقلیه سنگین با سرعت کم یا حالت توقف) رفتار آن مانند یک سیال ویسکوز می‌باشد و در شرایط محیطی عادی (دماها و زمان‌های بارگذاری میانی) رفتار ویسکوالاستیک را نتیجه می‌دهد.

مخلوط آسفالتی گرم از مصالح سنگی با خصوصیات الاستیک و قیر با ویژگی‌های ویسکوالاستو-پلاستیک تشکیل شده است. مصالح سنگی به منظور تحمل بارهای ترافیکی در مخلوط آسفالتی بکار می‌روند. قیر نیز به عنوان چسب عمل نموده و سنگدانه‌ها را به یکدیگر متصل می‌نماید. همچنین قیر باید در برابر نیروهای برشی که در سطح تماس سنگدانه‌ها ایجاد می‌شود مقاومت کند. اگر قیر توانایی حفظ سنگدانه‌ها را در محل خود نداشته باشد، سنگدانه‌ها جابجا خواهند شد و این امر منجر به بروز تغییر شکل‌های ماندگار یا متلاشی شدن مخلوط می‌گردد. بدون وجود قیر اتصال بین سنگدانه‌ها تحت بار ترافیک میسر نخواهد بود، لذا قیر باید آنقدر قدرت چسبندگی داشته باشد که از کنده شدن سنگدانه‌ها در اثر عبور چرخ وسایل نقلیه جلوگیری نماید.

مطالعات بلندمدت نشان داده است که یک روسازی آسفالتی برای داشتن قابلیت بهره‌برداری در طول دوره طرح خود نباید بیش از اندازه سخت شود. تغییرات تدریجی در خواص فیزیکی و شیمیایی

قیرهای نفتی به‌عنوان یک اصل پذیرفته شده است. محققین در این زمینه عقیده دارند که مهم‌ترین عامل این تغییرات، پدیده سخت شدن تدریجی است که موجب ظهور انواع آسیب‌دیدگی‌ها در رویه آسفالت می‌شود. فرآیندهای متفاوت و متنوعی در تغییرات تدریجی یا سخت شدن قیر دخالت دارد که از میان آن‌ها می‌توان به اکسیداسیون، واکنش‌های فتوشیمیایی، تصعید مواد فرار و سبک قیر، پلیمریزاسیون، کربنیزاسیون، جذب روغن‌های موجود در قیر توسط سنگ‌دانه‌ها، واکنش‌های شیمیایی بین ترکیبات قیر و اجزای معدنی مصالح سنگی و دگرگونی‌های میکروبیولوژیک اشاره کرد. کلیه فرآیندهای فوق، تابع زمان، دمای محیط، حرارت، ضخامت و غشاء پیرامون سنگدانه‌ها می‌باشد.

سخت شدن فیزیکی یکی دیگر از موارد سخت شدن رایج در قیر می‌باشد. سخت شدن فیزیکی وقتی رخ می‌دهد که قیر در دمای محیط است و معمولاً به آرایش یافتن مجدد مولکول‌های قیری و بلوری شدن آهسته واکس‌ها نسبت داده می‌شود. البته سخت شدن فیزیکی برگشت‌پذیر بوده و با حرارت‌دهی، ویسکوزیته اولیه قیر مجدداً به دست می‌آید. در اغلب مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده مانند آسفالت گرم، مواد قیری در طول ساخت و استفاده آسفالت تحت دو نوع پیرشدگی سریع و آهسته صورت می‌گیرد. پیرشدگی سریع در حین ساخت آسفالت که شامل تمامی تغییراتی است که طی اختلاط (دمای بین ۱۵۰-۱۹۰ درجه)، حمل و اجرا (دمای بین ۱۲۰-۱۸۰ درجه) و رسیدن به دمای محیط (از دمای ۱۳۰ درجه تا دمای محیط) در قیر اتفاق می‌افتد. این در حالی است که، پیرشدگی آهسته در طول خدمت دهی که تمامی تغییرات قیر در محل و در طی سال‌های خدمت دهی روسازی را شامل می‌شود.

عوامل مختلفی در به‌کارگیری مواد افزودنی در مخلوط‌های بتن آسفالتی مؤثر است. مهم‌ترین این عوامل شامل قیمت آسفالت، ضخامت کم لایه‌های آسفالتی حاوی بعضی مواد افزودنی، کاهش عملیات ترمیم و نگهداری و طولانی‌تر شدن فواصل بین به‌سازی‌های عمده، ازدیاد بار ترافیک و به خصوص بالا رفتن فشار مجاز چرخ‌های وسایط نقلیه، به‌کارگرفتن تولیدات جدید صنعتی و وسائل جدید در تولید و اجرا و به‌کارگرفتن ضایعات در جهت حفظ محیط زیست می‌باشد. اهدافی که در

تولید مخلوط آسفالتی با مواد افزودنی دنبال می‌شود شامل به دست آوردن مخلوط‌های نرم در درجه حرارت‌های پایین در زمان کارکرد، به دست آوردن مخلوط‌های سخت در درجه حرارت‌های بالا در زمان کارکرد، به دست آوردن مخلوط‌های نرم در درجه حرارت‌های اختلاط و کوبیدن، ازدیاد استقامت و پایداری آسفالت، بالا بردن مقاومت مخلوط در برابر خستگی برای جلوگیری از بروز ترک‌های پوست سوسماری، بهبود مقاومت مخلوط در برابر سایش و فرسایش و جلوگیری از جدا شدن دانه‌های مصالح، بهبود خواص آسفالت‌های نامرغوب می‌باشد.

در این پژوهش تلاش خواهد شد ابتدا فرآیند پیرشدگی قیر و تاثیر آن بر عملکرد مکانیکی و رئولوژیکی قیر مورد بررسی قرار داده شود. سپس، خواص و رفتار قیرهای اصلاح‌شده بوسیله افزودنی‌های نانو و تاثیر نانو تکنولوژی بر فرآیند پیرشدگی قیر در طی آزمایشات رایج و ویسکوزیته چرخشی قیر مورد ارزیابی قرار داده شود.

۱-۲- پیرشدگی قیر

روسازی آسفالتی برای داشتن قابلیت بهره‌برداری در طول دوره طرح خود نباید بیش از اندازه سخت شود. تغییرات تدریجی در خواص فیزیکی و شیمیایی قیرهای نفتی به‌عنوان یک اصل پذیرفته شده است. محققین در این زمینه عقیده دارند که مهم‌ترین عامل این تغییرات، پدیده سخت شدن تدریجی است که موجب ظهور انواع آسیب‌دیدگی‌ها در رویه آسفالت می‌شود. سخت شدن فیزیکی یکی دیگر از موارد سخت شدن رایج در قیر می‌باشد. سخت شدن فیزیکی وقتی رخ می‌دهد که قیر در دمای محیط است و معمولاً به آرایش یافتن مجدد مولکول‌های قیری و بلوری شدن آهسته واکس‌ها نسبت داده می‌شود. البته سخت شدن فیزیکی برگشت‌پذیر بوده و با حرارت‌دهی، ویسکوزیته اولیه قیر مجدداً به دست می‌آید. پیرشدگی چسباننده‌های قیری اساساً مربوط به واکنش‌های اکسیداسیون می‌شود. این واکنش‌ها عملکردهای متفاوتی بر روی زنجیره پیچیده مولکول‌های آلی را در پی دارد.

۱-۲-۱- فرآیند پیرشدگی قیر

یکی از عوامل مؤثر در پیرشدگی قیر در زمان خدمت دهی میزان تخلخل مخلوط آسفالتی می‌باشد. این تأثیر به دلیل امکان ورود هوا به خلل و فرج مخلوط می‌باشد، بنابراین فرآیند اکسیداسیون، مخصوصاً برای مخلوط‌های سطحی سریع‌تر صورت می‌گیرد. بنابراین همان‌طور که گفته شد سخت شدن به مقدار زیادی به عواملی چون دما، مدت زمان اختلاط، مقدار قیر، ضخامت قیر و غیره بستگی دارد. کاهش اثرات منفی سخت شدن در هنگام اختلاط بستگی به دقت کنترل همه عوامل ذکر شده دارد، که به خصوص کنترل دما و مقدار قیر بسیار ضروری است.

در دماهای معمولی و خصوصاً در نگهداری به صورت توده، قیر ماده‌ای بسیار پایدار و خنثی است. اما زمانی که به صورت فیلم نازک در معرض هوا قرار می‌گیرد شروع به سفت شدن می‌کند و در نتیجه شکننده می‌شود. مکانیزم این سخت شدن بسیار پیچیده است و این در اثر پیچیده بودن طبیعت قیر است. مطالعات قیر در آزمایشگاه و در شرایط کنترل شده نشان داده است که اکسیداسیون اصلی‌ترین واکنش مؤثر در سخت شدن قیر است. سخت شدن فیزیکی یکی دیگر از موارد سخت شدن رایج در قیر می‌باشد. سخت شدن فیزیکی وقتی رخ می‌دهد که قیر در دمای محیط است و معمولاً به آرایش یافتن مجدد مولکول‌های قیری و بلوری شدن آهسته واکس‌ها نسبت داده می‌شود. البته سخت شدن فیزیکی برگشت پذیر بوده و با حرارت‌دهی، ویسکوزیته اولیه قیر مجدداً به دست می‌آید.

پیرشدگی چسباننده‌های قیری اساساً مربوط به واکنش‌های اکسیداسیون می‌شود. این واکنش‌ها عملکردهای متفاوتی بر روی زنجیره پیچیده مولکول‌های آلی را در پی دارد. در اغلب مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده مانند آسفالت گرم، مواد قیری در طول ساخت و استفاده آسفالت تحت دو نوع پیرشدگی قرار می‌گیرند:

پیرشدگی کوتاه مدت در حین ساخت آسفالت که شامل تمامی تغییراتی است که طی اختلاط (دمای بین ۱۵۰-۱۹۰ درجه)، حمل و اجرا (دمای بین ۱۲۰-۱۸۰ درجه) و رسیدن به دمای محیط (از دمای

۱۳۰ درجه تا دمای محیط) در قیر اتفاق می‌افتد.

پیرشدگی بلند مدت در طول خدمت دهی (در محل) که تمامی تغییرات قیر در محل و در طی سال‌های خدمت دهی روسازی را شامل می‌شود.

۱-۲-۲- تاثیر افزودنی‌های نانو بر رفتار قیر

ریچارد فاینمن^۱ برنده جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۶۵ و یکی از مشهورترین فیزیکدانهای دهه ۶۰ میلادی که ملقب به پدر نانو تکنولوژی است در سال ۱۹۶۰ در همایش جامعه فیزیک امریکا طی یک سخنرانی، پیش بینی انقلابی و جذابی را بیان نمود. وی بیان کرد فضای زیادی در سطح پایین وجود دارد. همین جمله پایه علم نانو تکنولوژی شد. ایشان در آن سخنرانی مطرح ساخت که اصول علم فیزیک چیزی جز امکان قرار گرفتن اتم‌ها در کنار یکدیگر نیست. فاینمن همچنین خطوط حکاکی شده ای روی یک سطح را فرض نمود که عرضی به اندازه چند اتم داشتند و تصور کرد که می‌توان این خطوط را به وسیله تابش پرتوهای الکترونی به یک ماده زیرلایه^۲ تولید نمود. این بحث، پایه و اساس تولید تراشه‌های سیلیکونی^۳ امروزی است. وی پیشنهاد کرد می‌توان اتم‌های مجزا را دستکاری کرد و مواد و ساختارهای کوچکی را تولید نمود که خواص متفاوتی دارند. در دهه ۸۰ وسایل اندازه‌گیری که دارای خصوصیات و توانایی‌های مورد نظر فاینمن باشد اختراع شد. این وسایل که شامل: میکروسکوپ تونل‌زنی پیمایش‌گر، میکروسکوپ‌های اتمی و میکروسکوپ‌های میدان نزدیک می‌باشد، «چشم‌ها» و «انگشتان» لازم برای اندازه‌گیری و دست کاری نانو ساختارها را فراهم آوردند. هم‌زمان با این موضوع، گسترش توانایی محاسباتی و شبیه‌سازی پیچیده‌ی، رفتار مواد در مقیاس نانو را ممکن ساخته است [۱].

1 - Richard Feynman

2 - Substrate

3 - Silicon Chips

به بیان ساده علم نانو مطالعه اصول اولیه مولکول ها و ساختارها با ابعاد بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. این ساختارها نانوساختار نامیده می‌شود. نانوتکنولوژی، کاربرد این ساختارها در دستگاه‌های با اندازه نانومتری است. یکی از ویژگی‌های مهم نانوتکنولوژی جنبه چندرشته‌ای آن است. مفهوم چند رشته‌ای در نانوتکنولوژی بدان معنا است که نیروی کاری نانوتکنولوژی باید دارای بینش وسیعی از مفاهیم زیست‌شناسی، فیزیک، شیمی، اصول مهندسی طراحی، کنترل فرآیند و محصولات باشد. اصل چند رشته‌ای بودن نانوتکنولوژی بیان‌کننده این حقیقت است که این علم، رشته جدیدی نیست و بلکه رویکردی جدید در تمام رشته‌هاست و تمام عرصه‌های مختلف علم و فناوری را در بر می‌گیرد [۲].

واژه فناوری نانو اولین بار توسط نوریوتابنگوچی، استاد دانشگاه علوم توکیو در سال ۱۹۷۴ بر زبان‌ها جاری شد. او این واژه را برای توصیف ساخت مواد دقیقی که تلورانس ابعادی آنها در حد نانومتر می‌باشد، به کار برد. در سال ۱۹۸۶ این واژه توسط کی‌اریک درکسلر در کتابی تحت عنوان «موتور آفرینش: آغاز دوران فناوری نانو» بازآفرینی و تعریف مجدد شد. وی این واژه را به شکل عمیق‌تری در رساله دکترای خود مورد بررسی قرار داده‌است و بعدها آن را در کتابی تحت عنوان «نانو سیستم‌ها ماشین‌های مولکولی، چگونگی ساخت و محاسبات آنها» توسعه داد [۵].

آنچه باعث ظهور نانوتکنولوژی شده، نسبت سطح به حجم بالای نانومواد^۱ است. این موضوع یکی از مهمترین خصوصیات مواد تولید شده در مقیاس نانو است. در مقیاس نانو، اشیاء شروع به تغییر رفتار می‌کنند و رفتار سطوح بر رفتار توده‌ای ماده غلبه می‌کند. در این مقیاس برخی روابط فیزیکی که برای مواد معمولی کاربرد دارند، نقض می‌شوند. در حقیقت در این مقیاس، قوانین فیزیک کوانتوم وارد صحنه می‌شوند و امکان کنترل خواص ذاتی ماده از جمله دمای ذوب، خواص مغناطیسی، ظرفیت بار و حتی رنگ مواد، بدون تغییر در ترکیب شیمیایی ماده وجود خواهد داشت [4].

۱-۲-۳- اصلاح قیر

صنعت روسازی در طول چند دهه اخیر به سرعت در سراسر جهان و به ویژه در کشورهای در حال توسعه گسترش یافته است. ازدیاد بار ترافیک، بالا رفتن فشار مجاز چرخ‌های وسایل نقلیه و کاهش عملیات ترمیم و نگهداری راه‌ها باعث ایجاد خرابی و آسیب‌های بسیاری در سطح جاده‌ها شده است. علاوه بر این، منابع محدود نفت جهت تولید قیر با کیفیت و عدم اعمال کنترل دقیق در پالایشگاه باعث شده که جهت بدست آوردن حداکثر منافع اقتصادی توجه بیشتری به اصلاح قیر شود. با توجه به مشکلات موجود، نیاز به قیر با کیفیت بهتر امری ضروری به نظر می‌رسد [۱۵]. عوامل مختلفی در به کارگیری مواد افزودنی در مخلوط‌های بتن آسفالتی مؤثر است. مهم‌ترین این عوامل شامل قیمت آسفالت، ضخامت کم لایه‌های آسفالتی حاوی بعضی مواد افزودنی، کاهش عملیات ترمیم و نگهداری و طولانی‌تر شدن فواصل بین به‌سازی‌های عمده، ازدیاد بار ترافیک و به خصوص بالا رفتن فشار مجاز چرخ‌های وسایل نقلیه، به کارگرفتن تولیدات جدید صنعتی و وسایل جدید در تولید و اجرا و به کار گرفتن ضایعات در جهت حفظ محیط زیست می‌باشد [۱۶].

اهدافی که در تولید مخلوط آسفالتی با مواد افزودنی دنبال می‌شود شامل به دست آوردن مخلوط‌های نرم در درجه حرارت‌های پایین در زمان کارکرد، به دست آوردن مخلوط‌های سخت در درجه حرارت‌های بالا در زمان کارکرد، به دست آوردن مخلوط‌های نرم در درجه حرارت‌های اختلاط و کوبیدن، ازدیاد استقامت و پایداری آسفالت، بالا بردن مقاومت مخلوط در برابر خستگی برای جلوگیری از بروز ترک‌های پوست سوسماری، بهبود مقاومت مخلوط در برابر سایش و فرسایش و جلوگیری از جدا شدن دانه‌های مصالح، بهبود خواص آسفالت‌های نامرغوب می‌باشد [۱۷].

اصلاح قیر به عنوان یکی از روش‌های بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمایی مختلف می‌باشد. تاریخچه اولین موارد اصلاح قیر به سال ۱۸۴۳ میلادی برمی‌گردد. در حدود دهه ۱۹۳۰ میلادی پروژه‌های آزمایشی اصلاح قیر در اروپا اجرا شد و در دهه ۱۹۵۰ میلادی استفاده از لاتکس به

عنوان اصلاح کننده قیر در امریکای شمالی آغاز گردید. در سال ۱۹۶۳ اولین جاده‌های آزمایشی قیر اصلاح شده در فرانسه، به منظور شناخت رفتار قیرهای اصلاح شده با لاستیک ساخته شد. اواخر دهه ۱۹۷۰ در اروپا به جهت بالا بردن دوام و عمر روسازی و کاهش هزینه‌های دوره عمر راه، استفاده از قیرهای اصلاح شده رونق پیدا کرد [۱۸].

بکارگیری قیرهای خالص، نیازهای عملکردی ساخت راه که به طور فزاینده‌ای در معرض بارهای سنگین، ترافیک سنگین و شرایط محیطی مختلف قرار می‌گیرد را تأمین نمی‌کنند. وقتی استفاده از قیر تولید شده نیازهای آب و هوایی، ترافیکی و سازه‌ای روسازی را تأمین نکند، اصلاح کننده به عنوان یکی از جایگزین‌های قابل قبول برای بهبود خصوصیات آن بکار می‌رود هدف اصلی اصلاح قیر، تولید قیر اصلاح شده ایده‌آل با مقاومت بالا در مقابل بروز تغییر شکل‌های دائمی و ترک خوردگی خستگی می‌باشد [۱۸].

قیر معمولاً توسط افزودنی‌ها برای بهبود خصوصیات مکانیکی آن مسلح می‌شوند. مزیت اصلی استفاده از قیر اصلاح شده، اثر آن روی عملکرد روسازی از لحاظ تغییر شکل دائمی، ترک خوردگی خستگی و حساسیت رطوبتی می‌باشد. مخلوط بتن آسفالتی سخت‌تر در مقابل تغییر شکل دائمی دارای مقاومت بالایی می‌باشند. بروله^۱ در سال ۱۹۹۶ عنوان کرد که اصلاح کننده پلیمری، سختی و الاستیسیته مخلوط را در دماهای خدمت بالا و فرکانس بارگذاری پایین با درجه ای از اصلاح که تابعی از منبع قیر، سازگاری قیر- پلیمر و غلظت پلیمر است، افزایش می‌دهد [۱۹].

امروزه با افزایش بار ترافیک و اثرات نامطلوب جوی انواع مختلفی از خرابی‌ها در سطح جاده‌ها اتفاق می‌افتد که مربوط به خواص رئولوژیکی آسفالت می‌باشد. با توجه تاثیر مهم قیر بر شرایط عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، بخش قابل توجهی از مطالعات در جهت افزایش کیفیت قیر انجام شده است که اصلاح قیر از طریق پلیمر یکی از رایج‌ترین روش‌ها در این زمینه است [۱۵].

یکی از معروف‌ترین افزودنی‌های قیر پلیمرها هستند. در سالیان اخیر توجه زیادی به استفاده از

^۱Brule

پلیمرها در ساخت رویه آسفالتی انعطاف پذیر شده است. با وجود تولیدات متنوع پلیمرها تنها تعداد محدودی از آنها برای اصلاح خواص قیرها مناسب هستند که این پلیمرها باید دارای ویژگی‌های زیر باشند [۲۰].

- با قیر سازگار باشد.
- در دمای اختلاط آسفالت تخریب نگردد.
- حساسیت حرارتی قیر را بهبود بخشد.
- به کمک تجهیزات مرسوم اختلاط و پخش مصالح بتوان مراحل آن را اجرا کرد.
- در دمای عادی قابلیت رسیدن به ویسکوزیته لازم برای پوشش دادن را داشته باشند.
- در هنگام انبار کردن و نگهداری و پس از خدمت‌دهی و وقتی که با قیر مخلوط می‌شود خواص اولیه خود را حفظ کند.

۱-۳- شرح مسئله

در سال‌های اخیر، ورود کشورها به عرصه‌ی نانو فناوری اجتناب‌ناپذیر بوده است. بسیاری از صاحب-نظران و محققان نانو فناوری را مساوی در اختیار گرفتن آینده دانسته‌اند. در این پژوهش تلاش خواهد شد ابتدا فرآیند پیرشدگی قیر و تاثیر آن بر عملکرد مکانیکی و رئولوژیکی قیر مورد بررسی قرار داده شود. سپس، به بررسی تاثیر نانو مواد در قالب نانو اکسید روی، نانو رس و ترکیب همزمان دو نانو بر رفتار پیرشدگی قیر طی آزمایشات نقطه نرمی، درجه نفوذ، افت وزنی قیر، ویسکوزیته قیر و شاخص پیرشدگی ویسکوزیته پرداخته می‌شود.

۱-۴- ضرورت تحقیق

راهها به عنوان شاهرگ‌های حیاتی هر کشور از نظر اقتصادی و اجتماعی، همواره مورد توجه بوده است. بر همین اساس زیرساخت‌های حمل و نقل و در نتیجه روسازی‌ها همواره به عنوان سرمایه‌های هر کشور محسوب می‌شود. بنابراین حفاظت و بهبود این سرمایه‌ها از اولویت‌های اساسی هر کشور می‌باشد به همین منظور، در این پژوهش تلاش خواهد شد پیرشدگی قیر به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار بر خواص و عملکرد این ماده تحت تاثیر استفاده از نانو مواد به دو صورت مجزا و ترکیبی مورد ارزیابی و بررسی قرار داده شود. صنعت روسازی دائماً در پی دستیابی به فناوری است که باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی و افزایش عمر و دوام آسفالت جاده ها شود. از آنجایی که تکنولوژی نانو در آسفالت به عنوان یک فناوری نوپا و نوظهور است، تاکنون تحقیقات کمی در جهت بررسی اثرات اضافه کردن افزودنی‌های نانو تکنولوژی به صورت ترکیبی به قیرها انجام گرفته است.

۱-۵- نوآوری پژوهش

در پژوهش حاضر تلاش خواهد رفتار پیرشدگی قیر به عنوان یکی از خصوصیات مهم بر عملکرد قیرهای آسفالتی مورد بررسی قرار داده شود. در این راستا، تلاش شد برای بهبود پیرشدگی قیر از فناوری نانو با استفاده از دو نانو ماده متفاوت و به صورت ترکیبی به عنوان یکی از تکنولوژی های پیشرفته در عرصه علوم مهندسی استفاده شود. ارزیابی عملکرد قیرهای اصلاح شده با نانو مواد همچنان به عنوان یکی از پژوهش‌های قابل توجه دانشمندان و محققان در سطح بین المللی مطرح می‌باشد. از آن جایی که خرابی‌های عمر بتن آسفالتی اجرا شده در کشور مطابق با دوره طرح نمی‌باشد، پژوهش حاضر می‌تواند ارزش قابل توجهی برای صنعت روسازی داشته باشد. به طوری که بهبود مشخصات روسازی موجب اصلاح خواص قیر و افزایش عملکرد آسفالت، افزایش طول عمر

راههای کشور، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و کاهش هزینه‌های تحمیل شده به استفاده کنندگان از راه می‌شود.

۱-۶- معرفی ساختار پایان نامه

این پژوهش دارای ۶ فصل به شرح زیر می‌باشد:

در فصل اول به بررسی فرآیند پیرشدگی قیر، تاثیر افزودنی‌های نانو بر رفتار قیر، اصلاح قیر، شرح مسئله و ضرورت انجام این تحقیق و نوآوری پژوهش حاضر پرداخته شد. در فصل دوم تلاش خواهد شد، با مطالعه منابع و تحقیقات سالهای اخیر در داخل و خارج کشور، هدف و چالش‌های باقی مانده در زمینه تاثیر نانو مواد بر رفتار پیرشدگی قیرها مشخص شود.

در فصل دوم، تلاش می‌شود با مروری بر منابع و یافته‌های دیگر محققان در سطح دنیا در زمینه انواع اصلاح کننده‌های قیر و آسفالت، معرفی و کاربرد نانو تکنولوژی در مهندسی روسازی و بررسی پیرشدگی قیر به عنوان یکی از عوامل موثر بر رفتار مخلوط آسفالتی است گردد. محوریت انجام فصل دوم، بر پایه تاثیر قیر بر عملکرد روسازیهای آسفالتی، تاثیر نانو تکنولوژی بر رفتار عملکردی قیر، پیرشدگی قیر، آزمایشات شبیه‌سازی پیرشدگی قیر و مطالعه و ارائه نتایج تحقیقات گذشته قرار داده شده است.

در فصل سوم، روش کار این پژوهش به همراه آزمایشهای اولیه انجام شده در راستای تعیین انتخاب طرح نهایی افزودنی‌های مورد مطالعه مورد بررسی قرار داده شود. مباحث این فصل در قالب، انتخاب افزودنی، آماده‌سازی نمونه‌ها با دو نوع نانو مواد و نتایج آزمایشات کلاسیک قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانو مواد و در نهایت انتخاب طرح نهایی قیر با نانو ارائه خواهد شد.

در فصل چهارم، تلاش خواهد شد تاثیر نانو مواد بر رفتار پیرشدگی قیرها در آزمایشات نقطه نرمی، درجه نفوذ، افت وزنی قیر و ویسکوزیته قیر در سه حالت پیرنشده، پیرشده کوتاه مدت (RTFO) و

پیرشده بلندمدت (PAV) مورد سنجش قرار داده شود.

در فصل پنجم، به ارائه جمع‌بندی نتایج و مشاهدات حاصل از تحقیق جاری پرداخته خواهد شد.

فصل ۲:

مروری بر منابع

هدف از ارائه این فصل که به عنوان "مروری بر ادبیات"^۱، مروری بر منابع و یا مروری بر پیشینه تحقیق معرفی می‌گردد، بررسی و طبقه‌بندی یافته‌های دیگر محققان در سطح دنیا در زمینه انواع اصلاح‌کننده‌های قیر و آسفالت، معرفی و کاربرد نانو تکنولوژی در مهندسی روسازی و بررسی پیرشدگی قیر به عنوان یکی از عوامل موثر بر رفتار مخلوط آسفالتی است.

بیشتر از ۵۰۰۰ سال است که قیر به عنوان عایق رطوبتی و عامل چسبندگی به کار می‌رود. قدیمی‌ترین کاربرد ثبت شده قیر به ۳۸۰۰ سال پیش از میلاد توسط سومری‌ها بر می‌گردد. آغاز صنعت مدرن قیر را می‌توان به سال ۱۷۱۲ میلادی نسبت داد که سنگ‌های قیر طبیعی در فرانسه کشف شدند. در آن هنگام مواد قیری را به طور ساده‌ای به صورت کلوخه روی سطح جاده‌های محلی پخش می‌کردند. این تکنیک کاملاً موفقیت‌آمیز بود و در مدت کوتاهی پیشرفت‌هایی در کار، به صورت پودر و گرم کردن مواد، قبل از استفاده، انجام می‌شود [۲۱].

بر اساس تعریف استاندارد ASTM قیر ماده‌ای چسبنده با رنگ قهوه‌ای تیره تا سیاه است که به صورت طبیعی یافت می‌شود و یا از نفت خام استخراج می‌شود و به شکل‌های جامد، نیمه جامد یا ویسکوز می‌تواند باشد. قیر از هیدروکربن‌های با وزن مولکولی بالا تشکیل شده است. [۲۳]

بر اساس استاندارد انگلیسی قیر به صورت ماده‌ای جامد یا مایع ویسکوز که شامل هیدروکربن‌ها و مشتقات آن است و در تری کلرواتیلن حل می‌شود. این ماده به‌طور قابل ملاحظه‌ای غیر فرار است و با حرارت دادن نرم می‌شود. رنگ آن سیاه و یا قهوه‌ای است و دارای خواص عایق و چسبندگی می‌باشد. قیر توسط فرآیند پالایش، از نفت به دست می‌آید و یا به صورت طبیعی یافت می‌شود [۲۴]. قیر مخلوط پیچیده‌ای از بسیاری از ترکیب‌های شیمیایی با وزن مولکولی بالا است. به دلیل این پیچیدگی، تحلیل کامل ترکیبات قیر به‌طور معمول غیرممکن است. در هر حال با استفاده از

روش‌های مختلفی مانند حل کردن در حلال‌های مختلف و یا روش‌های گسترده شیمی می‌توان مواد تشکیل‌دهنده قیر را مشخص کرد [۲۵].

مواد قیری حاوی طیف وسیعی از هیدروکربن‌های اشباع و غیر اشباع، حلقوی و غیر حلقوی، قطبی و غیرقطبی با جرم‌های مولکولی متفاوت می‌باشد که برخی از آن‌ها دارای گروه‌های عاملی شیمیایی مانند هیدروکسیلو کربوکسیلیم می‌باشند. قیر همچنین دارای مقادیر کمی از فلزات نظیر وانادیم، نیکل، آهن، منیزیم و کلسیم به شکل نمک‌های معدنی و اکسیدها می‌باشد [۲۶-۲۸].

۲-۱-۱- تاثیر قیر بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی

مخلوط آسفالتی گرم از مصالح سنگی با خصوصیات الاستیک و قیر با ویژگی‌های ویسکوالاستو-پلاستیک^۱ تشکیل شده است. مصالح سنگی به منظور تحمل بارهای ترافیکی در مخلوط آسفالتی بکار می‌روند. قیر نیز به عنوان چسب عمل نموده و سنگدانه‌ها را به یکدیگر متصل می‌نماید. همچنین قیر باید در برابر نیروهای برشی که در سطح تماس سنگدانه‌ها ایجاد می‌شود مقاومت کند. اگر قیر توانایی حفظ سنگدانه‌ها را در محل خود نداشته باشد، سنگدانه‌ها جابجا خواهند شد و این امر منجر به بروز تغییر شکل‌های ماندگار و یا متلاشی شدن مخلوط می‌گردد. بدون وجود قیر اتصال بین سنگدانه‌ها تحت بار ترافیک میسر نخواهد بود، لذا قیر باید آنقدر قدرت چسبندگی داشته باشد که از کنده شدن سنگدانه‌ها در اثر عبور چرخ وسایل نقلیه جلوگیری نماید [۲۹].

عکس‌العمل یک جسم در برابر بارهای وارده توسط خواص و مشخصات مهندسی آن قابل پیش بینی است. در دماهای پایین و در شرایط بارگذاری سریع، اگر مخلوط آسفالتی دارای سختی بالایی باشد، رفتار الاستیک خطی خواهد داشت. در حالی که در دماهای بالاتر و در شرایط بارگذاری کند، رفتار مخلوط آسفالتی را نمی‌توان به صورت الاستیک خطی تشریح نمود. مخلوط آسفالتی در برخی شرایط

1 Visco Elasto-Plastic

دارای رفتار الاستیک غیر خطی است. اگر مخلوط آسفالتی دارای رفتار کاملاً الاستیک خطی باشد، پس از حذف بار، مخلوط به حالت اول باز خواهد گشت. اما در شرایطی که رفتار الاستیک غیر خطی بر مخلوط آسفالتی حاکم است، نسبت تنش و کرنش با افزایش بار متغیر خواهد بود. بر این اساس، در اثر اعمال بار، استخوان‌بندی سنگدانه‌ای به هم فشرده شده و لذا ذرات سنگی بیشتری وارد عمل می‌شوند. در نتیجه مخلوط آسفالتی سخت‌تر و مقاومتری را تشکیل خواهند داد [۲۹].

در یک دمای مشخص، سختی مخلوط بستگی به سرعت بارگذاری دارد. در حالت بارگذاری سریع، مخلوط آسفالتی سختی بیشتری از خود نشان داده و در حالت بارگذاری کند، سختی کمتری از خود نشان می‌دهد. بنابراین، سختی مواد ویسکوز بسته به سرعت بار اعمالی، متغیر خواهد بود. علاوه بر آن از زمان اعمال بار تا زمانی که تغییر شکل اتفاق می‌افتد، تأخیری وجود دارد که به آن اختلاف فاز^۱ اطلاق می‌شود. در مصالح کاملاً الاستیک، بار و تغییر شکل هم فاز هستند و حداکثر کرنش، زمانی اتفاق می‌افتد که حداکثر بار اعمال شده باشد. بنابراین اختلاف فاز بین بار و تغییر شکل صفر خواهد بود. در مصالح ویسکوز حداکثر مقدار بار زمانی اتفاق می‌افتد که شیب منحنی تغییر مکان به حداکثر خود می‌رسد [۲۹].

خرابی‌هایی که در طول عمر مفید روسازی رخ می‌دهند عمدتاً شامل تغییر شکل‌های دائمی در مسیر چرخ و سائل نقلیه، ترک‌های خستگی ناشی از بارگذاری و ترک‌های برودتی می‌باشد. شیارشدگی بر اثر بارگذاری ترافیکی در دمای بالا و خستگی در اثر تکرار بار وسایل نقلیه تغییرات محیطی و آب و هوایی در دمای متوسط بوجود می‌آید و باعث کاهش سرویس‌دهی روسازی و ایجاد ناهمواری و ناامنی در سطح آسفالت می‌شود. بروز این نوع خرابی‌ها به عوامل زیادی از جمله جنس و دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده، مقدار و نوع قیر، شرایط اختلاط و متغیرهای حجمی مخلوط آسفالتی از جمله درصد فضای خالی آسفالت دارد. اگر چه وزن قیر در مخلوط‌های آسفالتی مقدار کمی می‌باشد ولی با توجه تاثیر مهم قیر بر شرایط عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، بخش قابل توجهی از مطالعات و تحقیقات

¹ Phase Angle

صورت گرفته بر روی توسعه آزمایشات قیر متمرکز شده است تا از این طریق بتوان رفتار خرابی‌های مرتبط با روسازی از جمله شیارشدگی، خستگی و ترک‌های برودتی را بوسیله آزمایشات قیر تعیین و ارزیابی نمود.

۲-۱-۲- تاثیر نانو تکنولوژی بر رفتار عملکردی قیر

نانورس‌ها شامل صفحاتی کوچک و نامنظم با ضخامتی در حدود ۱ نانومتر و قطر چندصد نانومتری می‌باشند. ساختار کریستالی آنها عمدتاً شامل ساختاری به نام T-O-T می‌باشد: دو لایه نازک از اتم سیلیسیم (چهاروجهی) در طرفین فوقانی و تحتانی و یک لایه آلومینیوم (هشت وجهی). یکی از مهمترین خصوصیات نانورس‌ها نسبت طول به ضخامت بسیار بالای تک تک صفحات (از ۳۰۰ به ۱ و ۱۵۰۰ به ۱ است) است. به علت ساختار صفحه‌ای، نانورس‌ها مواد پلیمری معمول را تقویت می‌کنند، یعنی خواص مکانیکی آنها را بهتر می‌کنند، افزایش استحکام، مدول و ثبات ابعادی از این موارد است [۳۰].

در اثر افزایش فاصله بین صفحات، رس‌ها متورم می‌شوند و پلیمرها به فضای بین دو صفحه راه پیدا می‌کنند. در این حالت وضعیت صفحات نسبت به هم به دو شکل خواهد بود. در حالت نخست وضعیت دسته دسته‌های موازی از صفحات رس در کنار هم مثل چوب کبریت‌های داخل قوطی کبریت است و در حالت دوم این صفحه‌های در کنار یکدیگر بدون نظم خاصی مستقرند.

رس‌های مسطح موازی با هم به طور طبیعی آبدوست (متمایل به گروه‌هایی که طبیعتی آبی دارند) هستند، یعنی واکنش آنها با اغلب پلیمرها (با گروه‌هایی که طبیعتی روغنی دارند) ضعیف است. یون‌های بار دار مثبت سدیم می‌توانند به وسیله یون‌های بار منفی در صفحات رس جذب می‌شوند و جنگجویی شوند که زره‌های نانورسی در دست دارد. این یونها در واقع می‌توانند بین دو صفحه مجاور به اشتراک گذاشته شوند، این باعث می‌شود صفحات رس خیلی خوب کنار هم نگه داشته شوند و

بلوک بلوک شوند. اگر جای یونهای منفی را با یونهای ضعیفتر عوض کنیم، از این کار جلوگیری می شود و نتیجه باز شدن صفحات نانومتری رس و افزایش برهمکنش بین سطوح نانورس و پلیمر است [۳۰].

پلیمرهایی که با نانورس ها ترکیب شده اند در مقایسه با مواد پلیمری رایج خاصیت ضدگرمایی و ضدآتش بالاتری نشان می دهند و کارایی بیشتری در خاموش کردن شعله دارند و تغییر شکل آنها در معرض دماهای بسیار بالا یا مواد شیمیایی کمتر است. نانوکامپوزیت هایی که با استفاده از نانورس ها ساخته می شوند، رسانایی الکتریکی و تمیزی نوری بهتری نیز نشان می دهد. یکی از نتایج مهم باردار بودن نانورس ها (یعنی توانایی عوض کردن یونها) امکان سازگار کردن خصلت متضاد آنها یعنی ذات کاملاً آبدوست با پلیمرها است. چرا که خیلی از پلیمرها آبگریزند. عملکرد ضروری برای تشکیل نانوکامپوزیتهای پلیمر رس، تغییر قطبیت رس و تبدیل آن به مواد آلی دوست (آبگریز) می باشد. رس، طبیعتاً به صورت معدنی بوده و بنابر این در معرض تغییرات طبیعی شکل خود می باشند. خلوص رس می تواند خصوصیات نهایی کامپوزیت را تحت تاثیر قرار دهد. رس ها اغلب شامل آلومینات سیلیکات که یک ساختار لایه ای (صفحه ای) دارند می باشند. رایج ترین نوع رس ها مونتموریلونیت می باشد [۳۱]. ضخامت صفحات مونتموریلونیت با وجه بالا (۱۰۰ تا ۱۵۰۰) یک نانومتر می باشد. از خصوصیات مهم این نوع رس، ظرفیت تبادل یونی (CEC) می باشد. CEC عددی است که مقدار کاتیون های بین سطوح را بیان می دارد. محدوده CEC مونتموریلونیت از ۸۰ تا ۱۲۰ میلی اکیوالان در ۱۰۰ گرم می باشد. مقدار CEC برای کائولینیت بین ۳ تا ۵ می باشد [۳۱].

۲-۱-۳- پیرشدگی قیر

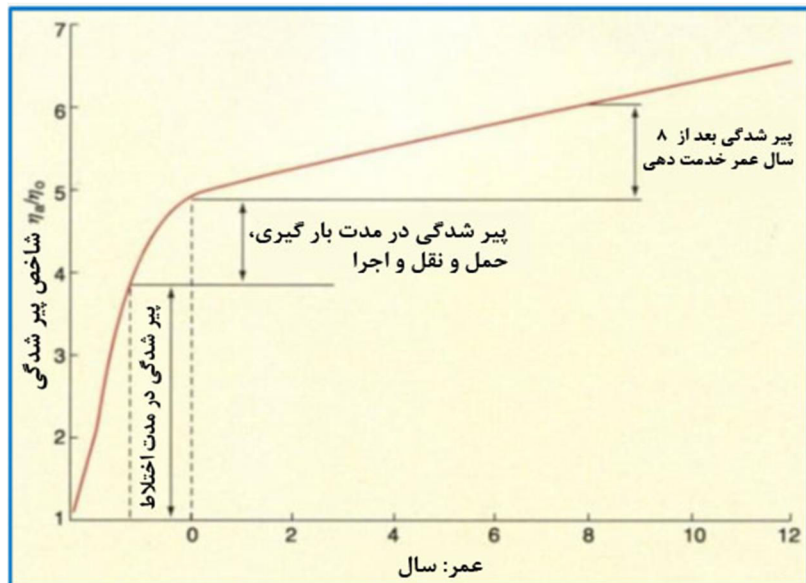
مطالعات بلندمدت نشان داده است که یک روسازی آسفالتی برای داشتن قابلیت بهره برداری در طول دوره طرح خود نباید بیش از اندازه سخت شود [۲۲]. تغییرات تدریجی در خواص فیزیکی و شیمیایی

قیرهای نفتی به عنوان یک اصل پذیرفته شده است. محققین در این زمینه عقیده دارند که مهم‌ترین عامل این تغییرات، پدیده سخت شدن تدریجی^۱ است که موجب ظهور انواع آسیب‌دیدگی‌ها در رویه آسفالت می‌شود.

فرآیندهای متفاوت و متنوعی در تغییرات تدریجی یا سخت شدن قیر دخالت دارد که از میان آن‌ها می‌توان به اکسیداسیون، واکنش‌های فتوشیمیایی، تصعید مواد فرار و سبک قیر، پلیمریزاسیون، کربنیزاسیون، جذب روغن‌های موجود در قیر توسط سنگ‌دانه‌ها، واکنش‌های شیمیایی بین ترکیبات قیر و اجزای معدنی مصالح سنگی و دگرگونی‌های میکروبیولوژیک اشاره کرد. کلیه فرآیندهای فوق، تابع زمان، دمای محیط، حرارت، ضخامت و غشاء پیرامون سنگ‌دانه‌ها می‌باشد. به عنوان مثال سرعت اکسیداسیون که مهم‌ترین عامل در سخت شدن مواد می‌باشد، با هر 10°C افزایش در بالای 10°C ۱۰۰، دو برابر می‌شود. [۲۲]

یکی از عوامل مؤثر در پیرشدگی قیر در زمان خدمت دهی میزان تخلخل مخلوط آسفالتی می‌باشد. این تأثیر به دلیل امکان ورود هوا به خلل و فرج مخلوط می‌باشد، بنابراین فرآیند اکسیداسیون، مخصوصاً برای مخلوط‌های سطحی سریع‌تر صورت می‌گیرد. بنابراین همان‌طور که گفته شد سخت شدن به مقدار زیادی بستگی به عواملی چون دما، مدت زمان اختلاط، مقدار قیر، ضخامت قیر و غیره دارد. کاهش اثرات منفی سخت شدن در هنگام اختلاط بستگی به دقت کنترل همه عوامل ذکرشده دارد. که به خصوص کنترل دما و مقدار قیر بسیار ضروری است. شکل ۵ شاخص سخت‌شدگی را در مراحل مختلف تولید و اجرای آسفالت نشان می‌دهد. بر این اساس شیب منحنی شاخص پیرشدگی در ابتدای نمودار بیش از سایر مراحل پیرشدگی می‌باشد.

¹ Age Hardening



شکل (۱-۲) پدیده سخت شدگی قیر در مراحل مختلف تولید و اجرای آسفالت [۲۲]

عامل اصلی در سخت شدن قیر در جاده، میزان فضای خالی رویه آسفالتی است. شاخص پیرشدگی در رویه‌های آسفالتی با درصد فضای خالی بالا بسیار بیشتر از درصد پایین آن است. اگر درصد فضای خالی از ۵ درصد کمتر باشد سخت شدگی در هنگام کارکرد بسیار کم می‌شود [۲۷]. مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در سخت شدن قیر، اکسیداسیون، خروج مواد فرار، عوامل فیزیکی و خروج روغن‌ها می‌باشد [۲۲].

۲-۱-۴- آزمایشات شبیه سازی پیرشدگی قیر

یکی از نکات مشخص آیین‌نامه آزمایش‌های سوپرپیو، تأکید بر انجام آزمایش‌ها در حالت‌هایی است که مراحل مهم و بحرانی دوره‌ی عمر قیر را شبیه‌سازی می‌کند. این آزمایشات عبارتند از :

• آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) (AASHTOT-T240)

آزمایش لعاب نازک چرخشی^۱ (RTFO) جهت شبیه‌سازی رفتار قیر در مرحله اجرا و در هنگام عملیات اختلاط و ساخت انجام می‌شود تا عمل پیر شدگی در طول عمر تسریع فیزیکی قیر پیر شده، اندازه‌گیری شود. روند آزمایش RTFO به این صورت می‌باشد که ابتدا قیر به آرامی گرم می‌شود به طوری که دمای آن از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر نرود. سپس حدود ۳۵ گرم قیر در استوانه‌های شیشه‌ای ریخته شده و به صورت افقی در یک دیسک عمودی قرار داده می‌شود. دمای دستگاه RTFO ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد، سرعت چرخش دیسک ۱۵ دور در دقیقه، دمیده شدن جریان هوا با شدت ۴۰۰۰ ml/min در داخل استوانه‌ها و مدت زمان آزمایش ۸۵ دقیقه می‌باشد.

• آزمایش محفظه تسریع پیری

آزمایش محفظه تسریع پیری^۲ (PAV) جهت شبیه‌سازی پیر شدگی قیر در طول عمر خدمت روسازی، در مدت زمان نسبتاً کوتاه و در دما و فشار بالا صورت می‌گیرد. روند انجام این آزمایش به این صورت می‌باشد که در حدود ۵۰ گرم از قیرهای بدست آمده از آزمایش RTFO در داخل سینی‌های مربوط به آزمایش PAV ریخته می‌شود. سپس سینی‌ها در طبقات محفظه دستگاه PAV قرار داده می‌شود تا نمونه‌ها به مدت ۲۰ ساعت، در فشار ۲۰۷۰ کیلو پاسکال و دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گیرند. پس از این مدت، سینی‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در داخل یک گرمچال با دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود تا نمونه‌ها به حالت روان برسند سپس نمونه‌ها را از داخل سینی به داخل ظرف‌های کوچک ریخته شده و جهت جداسازی گاز قیر از طریق وکیوم، ظرف‌ها در داخل گرمچال وکیوم با دمای 170 ± 5 درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده می‌شود.

¹ Rolling Thin-Film Oven

² Pressure Aging Vessel

همان‌طور که گفته شد سخت‌شدگی قیر شامل پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت آن می‌شود:

- پیرشدگی کوتاه‌مدت: اکسیداسیون و عمل تبخیر که در مدت زمان استفاده از قیر و اختلاط با سنگدانه‌ها و اجرای روسازی اتفاق می‌افتد.
- پیرشدگی بلندمدت: سخت‌شدگی قیر در زمان بهره‌برداری روسازی تحت تأثیر جریان هوا، دماهای بالا و اکسایش قیر توسط تابش فرابنفش را شامل می‌شود.

۲-۲- مروری بر تحقیقات گذشته

در این بخش برخی از مهم‌ترین مطالعات انجام شده مرتبط با عملکرد فناوری نانو در روسازی و تأثیر پیرشدگی قیر بر عملکرد روسازی به‌طور خلاصه ارائه می‌گردد.

۲-۳- خلاصه تحقیق مونتهپارا و همکاران

مونتهپارا^۱ و همکارش در سال ۱۹۹۹ به بررسی روش‌های پیرشدگی آزمایشگاهی شامل RTFO، PAV و پیرشدگی تحت UV^۲ پرداختند و با انجام کروماتوگرافی لایه نازک بر روی قیر طبیعی و پیر شده در آزمایشگاه، تغییرات گروه‌های شیمیایی قیر را ارزیابی کردند. برای بررسی خواص قیر در رابطه با پیرشدگی، از آزمون DSR استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در طی پیرشدگی در دمای بالا ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد و آن را به افزایش آسفالتن‌ها نسبت دادند. همچنین بیان کردند که میزان پارامتر $G^* \sin \delta$ قیر اجرا شده در PAV با واقعیت تفاوت دارد و میزان $G^* \sin \delta$ قیر اجرا شده در محل بیشتر از مقدار حد مقاومت خستگی بر اساس آیین‌نامه شارپ است. همچنین، در مورد پیرشدگی تحت UV نیز دریافتند که پیرشدگی تحت UV با انرژی متوسط، رفتار پیرشدگی قیر در

¹ Montepara

² Ultraviolet

واقعیت را بهتر مدل می‌کند اما این نکته را هم ذکر کردند که در آزمایش UV ضخامت قیر حدود ۱ میلی‌متر بوده که در واقعیت این ضخامت در حدود ۵ تا ۱۰ میکرون است [۳۲].

۲-۳-۱- خلاصه تحقیق Mehrez و همکاران

در سال ۲۰۰۳ مهرز^۱ و همکاران، آزمایش‌هایی جهت مطالعه اثر افزودن ۳ در صد مختلف (۳،۹ و ۱۵) لاستیک به قیر انجام دادند. طبق این آزمایشات بعد از یک آزمون RTFO، قیر اصلاح نشده پس از RTFO افزایش ۱/۵ برابری در پارامتر G^* را به همراه داشت. در مورد قیرهای لاستیکی، نمونه‌های دارای ۳ و ۹ درصد لاستیک افزایش ۲/۵ برابری و نمونه دارای ۱۵ درصد لاستیک افزایش ۱/۵ برابری در G^* را نسبت به قیر اولیه پیر نشده داشتند. در پژوهش انجام شده به بررسی خواص رئولوژیکی و پیرشدگی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک با بکارگیری قیر با درجه نفوذ ۱۰۰-۸۵ و پودر لاستیک بازیافتی نیز پرداخته شد. آن‌ها برای ارزیابی خواص قیر اولیه و پیر شده از آزمایش رئومتر برش دینامیکی و برای تست‌های پیرشدگی از RTFOT و PAV استفاده کردند. نتایج نشان داد پودر لاستیک در هر سه حالت پیرشدگی اثر مثبت داشته است [۳۳].

۲-۳-۲- خلاصه تحقیق Yamaguchi و همکاران

یاماگوچی^۲ در سال ۲۰۰۵ اثر ضخامت فیلم قیر، طول موج و کربن سیاه را بر روی پیرشدگی آسفالت مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه از قیر با درجه نفوذ ۱۰۰-۸۰ و کربن سیاه با اندازه ذرات ۹۰ نانومتر استفاده شد. شبیه‌سازی پیرشدگی توسط تابش اشعه UV^۳ صورت گرفت. نتایج، کاهش پیرشدگی قیر تحت UV در اثر افزودن دوده (کربن سیاه) را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده شد که

¹ Mahrez

² Yamaguchi

³

بیشترین پیرشدگی قیر در طول موج بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر اشعه UV اتفاق می‌افتد و نیز میزان پیرشدگی با ضخامت فیلم قیری رابطه معکوس دارد [۳۴]. یاماگوچی و همکارانش همچنین به بررسی پیرشدگی بر اثر تابش نور خورشید و مقایسه پیرشدگی تحت UV و پیرشدگی در محفظه PAV پرداختند. آن‌ها ابتدا آزمایش RTFO که شبیه سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت است را بر روی قیر انجام داده سپس بخشی از آن را به محفظه PAV و بخش دیگر آن را به صورت لایه‌ای بسیار نازک در زیر اشعه UV قرار دادند. پس از انجام آزمون DSR بر روی قیرهای اولیه و پیر شده دریافتند که میزان پیرشدگی تحت UV بسیار شدیدتر از پیرشدگی در محفظه PAV است [۳۴].

۲-۳-۳- خلاصه تحقیق Recasense و همکاران

رکاسنز^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۵ بر روی اثر فیلر بر پتانسیل پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی کار کردند. آن‌ها در این بررسی از قیر پایه ۸۰-۱۰۰ و فیلرهای آهک هیدراته و کربنات کلسیم استفاده کردند. آزمایشات تست ویسکوزیته، درجه نفوذ و نقطه نرمی برای ارزیابی قیر اولیه و پیر شده بکار برده شد. در این آزمایشات فیلر به صورت در صد حجمی اضافه گردیده است. همچنین با استفاده از آزمایش کشش مستقیم مشاهده کردند که با افزایش فیلر مقدار نیروی شکست افزایش و بیشترین تغییر شکل کاهش می‌یابد. نتایج حاکی از بهبود مقاومت پیرشدگی قیر در اثر افزودن فیلرهای آهک هیدراته و کربنات کلسیم است [۳۵].

۲-۳-۴- خلاصه تحقیق گارسیا مولاس و همکاران

در سال ۲۰۰۶ گارسیا مورالس^۲ و همکاران به دلیل قیمت بالای مواد پلیمری و از طرفی مناسب بودن این مواد برای اصلاح قیر، از ضایعات پلیمری برای اصلاح قیر استفاده کرده‌اند و این کار را از نظر

¹ Recasense Martinez

² Navarro

اقتصادی و زیست محیطی مناسب می‌دانند. آنان در تحقیق خود تأثیر شرایط فرآیند مخصوصاً دما را بر رفتار رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با خرده لاستیک بررسی کرده و بهترین شرایط دمایی را تعیین کرده‌اند. این ضایعات به صورت ریزساختار در قیر مذاب به‌طور یکنواخت و همگن پراکنده می‌شوند. در این تحقیق خواص ویسکوالاستیک قیر پایه و مخلوط‌های قیری مثل گرانروی دینامیکی مطالعه شد. نتایج نشان داده‌اند که این خواص در مورد مخلوط‌های قیری بهبود یافته‌اند [۳۶].

۲-۳-۵- خلاصه تحقیق Durrieu و همکاران

در سال ۲۰۰۷ دوریو^۱ در فرانسه قیر اصلاح شده با پلیمر SBS را تحت پیرشدگی با تابش UV بررسی کرد. وی ۳ نوع پیرشدگی را آزمایش کرد که عبارتند از: تست استاندارد، تست واقعی در محل و تست RTFO همراه با تابش UV. وی از تحلیل طیف‌های آزمایش FTIR استفاده کرد. دوریو پس از این آزمایشات دریافت که آزمون PAV و آزمون تابش UV اثراتی برابر یکدیگر دارند و نتایج حاصل از آن‌ها با میزان پیرشدگی قیر در واقعیت مطابقت دارد [۳۷]. نتایج آنالیز FTIR در مورد قیرهای خالص و پیر شده نشان می‌دهد که پدیده پیرشدگی باعث افزایش گروه‌های عاملی کربونیل و سولفوکسید می‌شود [۳۸].

۲-۳-۶- خلاصه تحقیق Zang و همکاران

در سال ۲۰۰۹ ژانگ^۲ و همکارانش به ارزیابی اثر افزودن SBR، زغال سنگ هوازده و کربن به قیر پایه بر روی ویژگی‌های مکانیکی آن قبل و بعد از پیرشدگی کوتاه‌مدت پرداختند. در این مقاله با انجام آزمایشات معمول (نقطه نرمی، درجه نفوذ و ...) آزمایشات شارپ (DSR)، بررسی طیفی (FTIR) و مشاهده توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) میزان بهبود قیر را بررسی کردند. ژانگ با

¹ Durrieu

² Zhang

افزودن این اصلاح‌کننده‌ها توانست حساسیت دمایی قیر بعد از پیرشدگی را بهبود بخشد [۳۹].

۲-۳-۷- خلاصه تحقیق Wu و همکاران

در سال ۲۰۱۰ وو^۱ در چین به بررسی عمل اکسیداسیون بر اثر تابش نور در پیرشدگی قیر تحت UV پرداخت و با توجه به آزمایش FTIR و تغییرات عامل کربونیل در این آزمایش و همچنین تغییرات ویسکوزیته بر اثر پیرشدگی، نشان داد که پیرشدگی قیر بر اثر UV، متأثر از شدت تابش UV خواهد بود [۴۰].

۲-۳-۸- خلاصه تحقیق غفارپور جهرمی

سال ۲۰۱۰ مطالعاتی توسط غفارپور جهرمی بر روی دو نوع نانورس نانوفیل^۲ و کلویزیت^۳ انجام پذیرفت. آزمون‌های رئولوژیکی تجربی روی نمونه‌های اصلاح شده و اصلاح نشده با میزان نانورس مختلف برای آزمونهای نفوذ، نقطه نرم شوندگی و نرمی انجام شد. اصلاح قیر با نانورس در ترازهای نانورس به وسیله دستگاه برش دینامیکی^۴ انجام شد. میزان نانورس ۲ و ۴ و ۷ درصد وزنی قیر بود [۴۱]. نتایج پژوهش آنها نشان داد که اصلاح‌کننده نانوفیل تغییرات اندکی روی نفوذ و نقطه نرمی قیر اصلاح نشده ۶۰-۷۰ دارد. مقدار بیشتر نانوفیل میزان نفوذ را تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد. با این وجود، افزایش مقداری کلویزیت باعث کاهش نفوذ می‌گردد. نانوفیل اثر اندکی روی نقطه نرمی دارد. با افزایش نانوفیل نقطه نرمی فقط ۳٪ افزایش می‌یابد. در صورتی که کلویزیت تاثیر بیشتر و چشمگیری بر روی نفوذ و نقطه نرمی قیر دارد. با افزایش مقدار کلویزیت نقطه نرمی از ۵۴ به ۶۱ افزایش می‌یابد و درجه نفوذ از ۶۳ به ۴۵ کاهش می‌یابد. همچنین، هر دو نانورس نرمی قیر را کاهش

¹ Wu

² Nanofill-15

³ Cloisite 15-A

⁴ Dynamic Shear

می‌دهند ولی کلویزیت تاثیر بیشتری روی کاهش نرمی دارند. در پایان این تحقیق میزان ۷ درصد افزودنی نانورس به عنوان بهترین درصد در بهبود مشخصات قیر گزارش شده است [۴۱].

۲-۳-۹- خلاصه تحقیق You و همکاران

یو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ اثر دو نوع نانو رس را بر روی قیر بررسی کرده‌اند و نتایج آنها نشان داد که افزودن نانو رس به قیر باعث افزایش قابل توجه ویسکوزیته (در حدود ۲.۵ برابر در آزمایش ویسکوزیته چرخشی) در محدوده دمائی ۱۰۰ الی ۱۹۰ می‌شود با این حال نتایج ویسکوزیته در دمای زیر ۱۳۵ درجه سانتی گراد همچنان از حد ۳ پاسکال-ثانیه کمتر می‌باشد [۴۲]. همچنین نتایج تست-های DSR انجام شده بر روی نمونه‌های حاوی نانورس حاکی از افزایش سختی و کاهش زاویه فاز است. نکته ی جالبی که در مورد این آزمایش وجود دارد این است که با افزایش فرکانس از ۰/۰۱ تا ۱۰۰ هرتز، مدولهای مرکب برشی سه نمونه به یکدیگر همگرا میشوند که نشان دهنده‌ی این موضوع است که در فرکانس های بالا مولکولهای نانورس نقش کم رنگی در مدول برشی داشته و نقش برجسته ی آنها تنها در فرکانس های پایین یا زمان های بارگذاری طولانی مدت است. مقایسه پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin \delta$) نشان دهنده بهبود مقاومت شیارشدگی با توجه به نوع و میزان نانورس مصرفی است، اضافه شدن نانو رس به قیر باعث کاهش پارامتر خستگی ($G^* \cdot \sin \delta$) در دماهای متوسط و پائین می‌شود در صورتی که در شرایط پیرشده این پارامتر برای دو نمونه قیر اصلاح شده و اصلاح نشده تقریباً یکسان است [۴۲].

¹ Zhanping You

۲-۳-۱۰- خلاصه تحقیق Pan

پن^۱ در سال ۲۰۱۲ اظهار کرد که تحقیقات در حال حاضر در مورد اکسیداسیون قیر و بررسی آنتی اکسیدان‌ها بیشتر بر روی تعیین اثرات پیرشدگی بر روی خواص فیزیکی قیر همچون ویسکوزیته و انعطاف پذیری^۲ تمرکز دارند. این تحقیقات به صورت پایه‌ای به مکانیزم های آنتی‌اکسیدان‌ها نمی‌پردازند و این باعث می‌شود که استراتژی‌های جلوگیری از اکسیداسیون به کندی پیشرفت کند [۴۳].

۲-۳-۱۱- خلاصه تحقیق Iwanski

در سال ۲۰۱۳ ایوانسکی^۳ در لهستان اثر آهک شکفته به‌عنوان ترکیب ضد پیرشدگی در قیر را بررسی کرد. وی در یک مطالعه موردی از آهک شکفته به‌عنوان فیلر در مخلوط SMA استفاده کرد و ثابت کرد آهک شکفته می‌تواند پیرشدگی قیر را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد [۴۴].

۲-۳-۱۲- خلاصه تحقیق Fang

فانگ^۴ در سال ۲۰۱۳ بیان کرد زمانی که ضایعات پلی اتیلنی و یا پودر لاستیک به‌عنوان یک اصلاح‌کننده به قیر اضافه می‌شوند، این اصلاح‌کننده‌ها برخی از روغن‌های سبک داخل قیر را جذب می‌کنند. این فرآیند می‌تواند میزان رادیکال‌های آزاد قیر را کاهش داده و در نتیجه مقاومت قیر در برابر پدیده پیرشدگی را افزایش می‌دهد. آنتی‌اکسیدان‌های شامل پودر لاستیک به‌طور مؤثری پیرشدگی قیر را کاهش می‌دهند [۴۵].

¹ Pan

² Ductility

³ Iwanski

⁴ Fang

۲-۳-۱۳- خلاصه تحقیق Zhao

در سال ۲۰۱۳ ژائو^۱ از روش کروماتوگرافی نفوذ ژل (GPC) برای تحلیل قیر اصلاح شده با پلیمر SBS استفاده کرد. بینگ به این نتیجه رسید که در طی فرآیند پیرشدگی مولکول‌های کوچک قیر، بزرگ‌تر (سنگین‌تر) می‌شوند و مولکول‌های SBS در این فرآیند گسسته می‌گردند. در نتیجه پلیمر SBS ممکن است در پیرشدگی طولانی مدت خواص اصلاح‌کنندگی خود در قیرهای SBS را از دست بدهد. آزمون‌های نقطه نرمی، درجه نفوذ، تست بازیابی الاستیک و ویسکوزیته دینامیکی برای ارزیابی قیر اولیه و پیر شده به کار برده شد. برای شبیه‌سازی پیرشدگی از RTFO و PAV و برای بررسی تغییرات شیمیایی پراکندگی پلیمر از میکروسکوپی فلورسنت استفاده شد. SBS به صورت جزئی مقاومت قیر در برابر پیرشدگی را افزایش می‌دهد [۴۶].

۲-۳-۱۴- خلاصه تحقیق Feng

اثر مواد جاذب UV بر روی خواص فیزیکی قیر و مقاومت آن در برابر UV توسط فنگ^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ بررسی شد. آن‌ها با استفاده از کروماتوگرافی لایه نازک، با تعیین یونیزاسیون شعله مکانیزم جاذب‌های UV را در قیر بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که میزان انعطاف پذیری قیر با افزودن مقدار کمی جاذب UV به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. جاذب UV اوکتابنزن میزان آروماتیک‌های قیر را افزایش می‌دهد. همچنین در مورد پایداری قیر در برابر UV نتایج حاصله نشان داد که قیرهای مختلف در ترکیب با جاذب‌های UV متفاوت، رفتار یکسانی ندارند و این شاخص کاملاً به نوع قیر و ماهیت جاذب‌های UV بستگی دارد [۴۷].

¹ Zhao

² Feng

۲-۴- خلاصه تحقیقات و مطالعات پیشین

در ادامه این فصل، خلاصه مطالعات و پژوهش‌های بررسی شده در زمینه پیرشدگی قیر و تاثیر افزودنی‌های مختلف بر عملکرد فرسودگی قیر در قالب جدول (۲-۱) نشان داده شده است.

جدول (۱-۲) خلاصه مطالعات و پژوهش‌های بررسی شده در زمینه پیرشدگی قیر و تاثیر افزودنی‌های مختلف بر عملکرد فرسودگی قیر

| ردیف | نویسندگان | نام مقاله یا گزارش | مجله یا کنفرانس چاپ‌کننده مقاله | سال چاپ | خلاصه |
|------|----------------------------------|--|--|------------|--|
| ۱ | Montepara, A. and F. Giuliani | Variation in chemical and rheological properties of betumen due to aging action. in International Conference | International Conference “Chemistry and Ecology of composite materials based on betumen emulsions and modified betumen” | ۱۹۹۹ | در این مطالعه نتایج نشان داد که میزان پارامتر G^* بعد از پیرشدگی PAV با واقعیت تفاوت دارد و میزان $G^* \cdot \sin \delta$ قیر اجرا شده در محل بیشتر از مقدار حد مقاومت خستگی بر اساس آیین نامه شارپ است. |
| ۲ | Mahrez, A. and M. Rehan | Rheological Evaluation of Aging Properties of Rubber Crumb Modified | Eastern Asia Society for Transportation | ۲۰۰۳ | در این مطالعه به تاثیر پودر لاستیک بر پیرشدگی قیر پرداخته شد و نتایج نشان داد که قیر اصلاح نشده پس از |

| | | Studies | Bitumen | | |
|---|------|--|--|--|---|
| | | | | | |
| RTFO افزایش ۱.۵ برابری در پارامتر G^* را به همراه داشت. | | | | | |
| بررسی اثر ضخامت فیلم قیر، طول موج و کربن سیاه بر روی پیرشدگی آسفالت کاهش پیرشدگی قیر تحت UV در اثر افزودن دوده (کربن سیاه) را نشان داد. | ۲۰۰۵ | Canadian Journal of Civil Engineering | Photodegradation test of asphalt binder using pressed thin film samples | Yamaguchi, K., I. Sasaki, and S. Meiarashi | ۳ |
| بررسی اثر فیلر بر پتانسیل پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که با افزایش فیلر مقدار نیروی شکست افزایش و بیشترین تغییر شکل کاهش می‌یابد | ۲۰۰۵ | Journal of the Transportation Research Board | Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures | Recasens, R., et al. | ۴ |
| نتایج بررسی تاثیر ضایعات پلیمری بر قیر نشان داد رفتار پیرشدگی و رئولوژیکی قیر بهبود می‌یابد. | ۲۰۰۶ | Fuel | Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen | Garcia-Morales, M., et al. | ۵ |
| نتایج قیر اصلاح شده با پلیمر SBS تحت پیرشدگی با تابش UV نشان داد که آزمون PAV و آزمون تابش UV اثراتی برابر یکدیگر دارند و نتایج حاصل از آنها با میزان پیرشدگی | ۲۰۰۷ | Fuel | The influence of UV aging of a styrene/butadiene/styrene modified bitumen: | Durrieu, F., F. Farcas, and V. Mouillet | ۶ |

| | | | | | |
|---|------|---|---|---|----|
| قیر در واقعیت مطابقت دارد. | | | comparison between laboratory and on site aging | | |
| نتایج ارزیابی اثر افزودن SBR، زغال سنگ هوازده و کربن به قیر نشان داد، افزودن این اصلاح‌کننده‌ها می‌تواند حساسیت دمایی قیر بعد از پیرشدگی را بهبود بخشد. | ۲۰۰۹ | Construction and Building Materials | Evaluation of the improved properties of SBR/weathered coal modified bitumen containing carbon black. | Zhang, J., et al | ۸ |
| بررسی عمل اکسیداسیون بر اثر تابش نور در پیرشدگی قیر تحت UV نشان داد که پیرشدگی قیر بر اثر UV، متأثر از شدت تابش UV خواهد بود. | ۲۰۱۰ | Journal of Materials in Civil Engineering | Laboratory study on ultraviolet radiation aging of bitumen | Wu, S., et al | ۹ |
| نتایج بررسی تاثیر دو نوع نانورس نانوفیل و کلویزیت بر عملکرد قیر تحت تاثیر آزمونهای نفوذ، نقطه نرم شوندگی و نرمی، کاهش درجه نفوذ را نشان می‌دهد. | ۲۰۱۰ | Arabian Journal for Science and Engineering | Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures | Jahromi, S.G., B. Andalibizade, and S. Vossough | ۱۰ |
| نتایج ارزیابی دو نوع نانو رس را بر روی قیر نشان داد که | ۲۰۱۱ | Construction | Nanoclay-modified | You, Z., et al | ۱۱ |

| | | | | | |
|--|------|--|---|---------------------------------|----|
| افزودن نانو رس به قیر باعث افزایش قابل توجه ویسکوزیته، افزایش سختی و کاهش زاویه فاز است. | | Building and Materials | asphalt materials: Preparation and characterization | | |
| نتایج بررسی اکسیداسیون قیر و بررسی آنتی اکسیدان‌ها نشان داد، آنتی اکسیدان‌ها باعث می‌شود که استراتژی‌های جلوگیری از اکسیداسیون به کندی پیشرفت کند. | ۲۰۱۲ | Journal of Molecular Modeling | An atomistic-based chemophysical environment for evaluating asphalt oxidation and antioxidants | Pan, T.Y., Sun, L. and Q. Yu | ۱۲ |
| نتیج بررسی اثر آهک شکفته به‌عنوان ترکیب ضد پیرشدگی در نشان داد، آهک شکفته باعث کاهش قابل توجه در پیرشدگی قیر می‌شود. | ۲۰۱۳ | Procedia Engineering | Hydrated lime as the anti-aging bitumen agent | Iwański, M. and G. Mazurek | ۱۳ |
| نتایج بررسی تاثیر ضایعات پلی اتیلنی و پودر لاستیک بر عملکرد پیرشدگی قیر نشان داد که مقاومت قیر در برابر پدیده پیرشدگی را افزایش می‌یابد. | ۲۰۱۳ | Polymers for Advanced Technologies | Aging properties and mechanism of the modified asphalt by packaging waste | Fang, C., et al. | ۱۴ |

| | | | | | |
|--|------|---|---|-------------------------------|----|
| | | | polyethylene and waste rubber powder | | |
| نتایج بررسی روش کروماتوگرافی نفوذ ژل (GPC) برای تحلیل قیر اصلاح شده با پلیمر SBS نشان داد پلیمر SBS ممکن است در پیرشدگی طولانی مدت خواص اصلاح کنندگی خود در قیرهای SBS را از دست بدهد و پلیمر SBS به صورت جزئی مقاومت قیر در برابر پیرشدگی را افزایش می‌دهد. | ۲۰۱۳ | Journal of Wuhan University of Technology-Mater | Thermal oxidative aging characterization of SBS modified asphalt. | Gu, F. and Y. Zhao | ۱۵ |
| نتیج بررسی اثر مواد جاذب UV بر روی خواص فیزیکی قیر و مقاومت آن در برابر UV نشان داد که قیرهای مختلف در ترکیب با جاذب‌های UV متفاوت، رفتار یکسانی ندارند و این شاخص کاملاً به نوع قیر و ماهیت جاذب‌های UV بستگی دارد. | ۲۰۱۳ | Petroleum Science and Technology | The physical properties and photostability of bitumen with different ultraviolet absorbers. | Feng, Z., J. Yu, and D. Kuang | ۱۶ |

فصل ۳:

روش کار و آزمایش‌های اولیه

در فصل اول به بررسی فرآیند پیرشدگی قیر، تاثیر افزودنی‌های نانو بر رفتار قیر، اصلاح قیر، شرح مسئله و ضرورت انجام این تحقیق و نوآوری پژوهش حاضر پرداخته شد. در فصل دوم تلاش شد، با مطالعه منابع و تحقیقات سالهای اخیر در داخل و خارج کشور، هدف و چالش‌های باقی مانده در زمینه تاثیر نانو مواد بر رفتار پیرشدگی قیرها مشخص شود. همچنین در فصل دوم، با مروری بر منابع و یافته‌های دیگر محققان در سطح دنیا در زمینه انواع اصلاح کننده‌های قیر و آسفالت، معرفی و کاربرد نانو تکنولوژی در مهندسی روسازی و بررسی پیرشدگی قیر به عنوان یکی از عوامل موثر بر رفتار مخلوط آسفالتی است گردید. محوریت انجام فصل دوم، بر پایه تاثیر قیر بر عملکرد روسازیهای آسفالتی، تاثیر نانو تکنولوژی بر رفتار عملکردی قیر، پیرشدگی قیر، آزمایشات شبیه سازی پیرشدگی قیر و مطالعه و ارائه نتایج تحقیقات گذشته قرار داده شد. در این فصل تلاش خواهد شد، روش کار این پژوهش به همراه آزمایشهای اولیه انجام شده در راستای تعیین انتخاب طرح نهایی افزودنی‌های مورد مطالعه مورد بررسی قرار داده شود. مباحث این فصل در قالب انتخاب افزودنی، آماده‌سازی نمونه‌ها با دو نوع نانو مواد و نتایج آزمایشات سنتی قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانو مواد و در نهایت انتخاب طرح نهایی قیر با نانو ارائه خواهد شد.

در یک کار تحقیقاتی، ابتدا بایستی هدف از جمع‌آوری اطلاعات مشخص شود. هدف در این پژوهش بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانو مواد بر خواص پیرشدگی قیرهای اصلاح شده می‌باشد. پس از مشخص کردن هدف بایستی داده‌های مورد نیاز برای دستیابی به هدف مورد نظر گردآوری شود و سپس باید آنها را پردازش و تفسیر نمود. تفکیک داده‌ها کار پردازش را ساده‌تر می‌کند، لذا، در این تحقیق داده‌های مورد نظر به تفکیک آزمایش عملکردی مورد نظر و هدف از انجام آزمایش گروه‌بندی و تفکیک شده‌اند.

۳-۲- قیر

قیر، به عنوان یکی از اجزای تحمل کننده بار در آسفالت، ماده‌ای با رفتار ویسکوالاستیک می‌باشد، به این معنی که در سطح معینی از سختی به عنوان یک جسم جامد الاستیک شناخته می‌شود، اما در همان زمان از نظر جریان و انرژی مستهلک شده به عنوان یک سیال ویسکوز شناخته می‌شود. این ویژگی به زمان و دما بستگی دارد، به طوری که در دمای بالا و مدت زمان طولانی بارگذاری، قیر نرم‌تر شده و رفتاری مشابه با یک سیال ویسکوز پیدا می‌کند ولی در دمای پایین‌تر و سرعت بارگذاری بیش‌تر، قیر سخت‌تر شده و بیش‌تر خاصیت الاستیک پیدا می‌کند.

با توجه به این که قیر عامل رفتار ویسکوالاستیک در مخلوط آسفالتی می‌باشد، نقش مهمی بر بسیاری از جنبه‌های عملکردی روسازی دارد. رفتار قیر به مانند هر ماده ویسکوالاستیک دیگر، تابعی از دما و مدت زمان بارگذاری می‌باشد. مخلوط آسفالتی گرم از مصالح سنگی با خصوصیات الاستیک و قیر با ویژگی‌های ویسکوالاستو-پلاستیک^۱ تشکیل شده است. مصالح سنگی به منظور تحمل بارهای در مخلوط آسفالتی بکار می‌روند. قیر نیز به عنوان چسب عمل نموده و سنگدانه‌ها را به یکدیگر متصل می‌نماید. همچنین قیر باید در برابر نیروهای برشی که در سطح تماس سنگدانه‌ها ایجاد می‌شود مقاومت کند. اگر قیر توانایی حفظ سنگدانه‌ها را در محل خود نداشته باشد، سنگدانه‌ها جابجا خواهند شد و این امر منجر به بروز تغییر شکل‌های ماندگار و یا متلاشی شدن مخلوط می‌گردد. بدون وجود قیر اتصال بین سنگدانه‌ها تحت بارترافیک میسر نخواهد بود، لذا قیر باید آنقدر قدرت چسبندگی داشته باشد که از کنده شدن سنگدانه‌ها در اثر عبور چرخ وسایل نقلیه جلوگیری نماید [۲۹].

قیر مصرفی مورد استفاده در این تحقیق، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می‌باشد، که از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده است. این قیر برای تهیه نمونه‌های قیر اصلاح شده با نانو و خالص مورد استفاده قرار گرفته است.

1 Visco Elasto-Plastic

جدول (۱-۳) مشخصات فیزیکی قیر مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آسفالتی

| آزمایشات قیر خالص | استاندارد آزمایش (ASTM) | قیر ۶۰-۷۰ |
|--|-------------------------------|-----------|
| وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی گراد | D70 | ۱/۰۲۶۱ |
| درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد (۰/۱ میلی‌متر) | D5 | ۶۵ |
| نقطه نرمی بر حسب درجه سانتی گراد | D36 | ۵۵ |
| حلالیت در تری کلرو اتیلن بر حسب درصد | D2042 | ۹۹/۷ |
| ویسکوزیته دینامیکی در ۱۳۵ درجه سانتی گراد (Pa.s) | D2170 | ۰/۳۳۸ |
| درجه اشتعال بر حسب درجه سانتی گراد | D92 | ۳۳۴ |

۳-۳- نانو مواد

در این پژوهش از دو نوع نانو مواد جهت اصلاح خصوصیات پیرشدگی قیر استفاده شده است. نانو رس و نانو اکسید روی (NZno) به دلیل اینکه از خاصیت آنتی‌اکسیدان خوبی برخوردار هستند انتخاب شده‌اند. در ادامه خصوصیات و قابلیت های این نانو مواد به تفکیک بیان می شود.

۳-۳-۱- نانو رس

نانورس‌ها شامل صفحاتی کوچک و نامنظم با ضخامتی در حدود ۱ نانومتر و قطر چندصد نانومتری می باشند. ساختار کریستالی آنها عمدتاً شامل ساختاری به نام T-O-T می باشد: دو لایه نازک از اتم سیلیسیم (چهاروجهی) در طرفین فوقانی و تحتانی و یک لایه آلومینیوم (هشت وجهی). یکی از مهمترین خصوصیات نانورس‌ها نسبت طول به ضخامت بسیار بالای تک تک صفحات (از ۳۰۰ به ۱ و ۱۵۰۰ به ۱ است) است. به علت ساختار صفحه‌ای، نانورس‌ها مواد پلیمری معمول را تقویت می کنند، یعنی خواص مکانیکی آنها را بهتر می کنند، افزایش استحکام، مدول و ثبات ابعادی از این موارد

است [۳۰].

رس‌های مسطح موازی با هم به طور طبیعی آبدوست (متمایل به گروههایی که طبیعتی آبی دارند) هستند، یعنی واکنش آنها با اغلب پلیمرها (با گروههایی که طبیعتی روغنی دارند) ضعیف است. یون-های باردار مثبت سدیم می‌توانند به وسیله یون‌های با بار منفی در صفحات رس جذب شوند و جنگجویی شوند که زره‌های نانورسی در دست دارد. این یون‌ها در واقع می‌توانند بین دو صفحه مجاور به اشتراک گذاشته شوند، این باعث می‌شود صفحات رس خیلی خوب کنار هم نگه داشته‌شوند و بلوک بلوک شوند. اگر جای یون‌های منفی را با یون‌های ضعیفتر عوض شود، از این کار جلوگیری می‌شود و نتیجه باز شدن صفحات نانومتری رس و افزایش برهمکنش بین سطوح نانورس و پلیمر است [۳۰].

رس، طبیعتاً به صورت معدنی بوده و بنابراین در معرض تغییرات طبیعی شکل خود می‌باشند. خلوص رس می‌تواند خصوصیات نهایی کامپوزیت را تحت تاثیر قرار دهد. رس‌ها اغلب شامل آلومینات سیلیکات که یک ساختار لایه‌ای (صفحه‌ای) دارند می‌باشند. رایج‌ترین نوع رس‌ها مونتموریلونیت می‌باشد [۳۱]. ضخامت صفحات مونتموریلونیت با وجه بالا (۱۰۰ تا ۱۵۰۰) یک نانومتر می‌باشد. از خصوصیات مهم این نوع رس، ظرفیت تبادل یونی (CEC) می‌باشد. CEC عددی است که مقدار کاتیون‌های بین سطوح را بیان می‌کند. محدوده CEC مونتموریلونیت از ۸۰ تا ۱۲۰ میلی اکیوالان در ۱۰۰ گرم می‌باشد. مقدار CEC برای کائولینیت بین ۳ تا ۵ می‌باشد [۳۱].

مشخصات فیزیکی و مکانیکی و همچنین آنالیز شیمیایی نانورس (مونتموریلونیت) مورد استفاده در این مطالعه در جداول (۱-۳) و (۲-۳) نشان داده شده است. همچنین در اشکال (۱-۳) تا (۴-۳) به ترتیب نتایج آزمایش FTIR، تصاویر میکروسکوپی، خصوصیات شیمیایی و مشخصات بر اساس آزمایش XRD نانورس مورد استفاده نشان داده شده است.

در این پژوهش از نانورس مونتموریلونیت شرکت نانو سانی مشهد و به میزان ۲، ۴ و ۷ درصد وزن قیر با استفاده از میکسر برش بالا و در دمای 150°C استفاده شد. مدت زمان اختلاط قیر و نانورس در

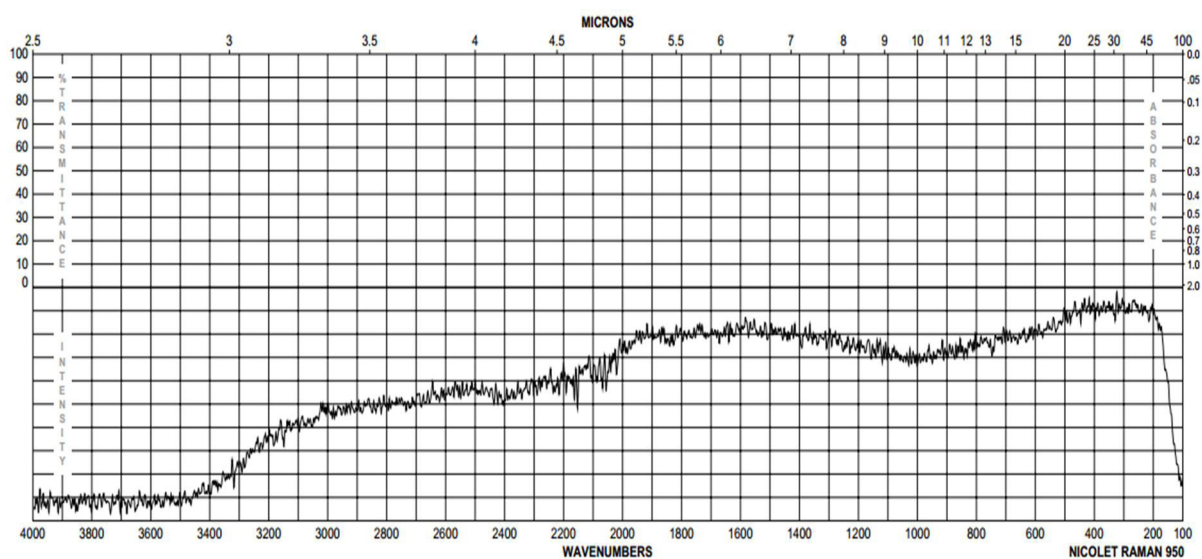
حدود ۳۰ دقیقه و سرعت میکسر ۳۵۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شد.

جدول (۲-۳) مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانو رس مونتمریلونیت [۵۰]

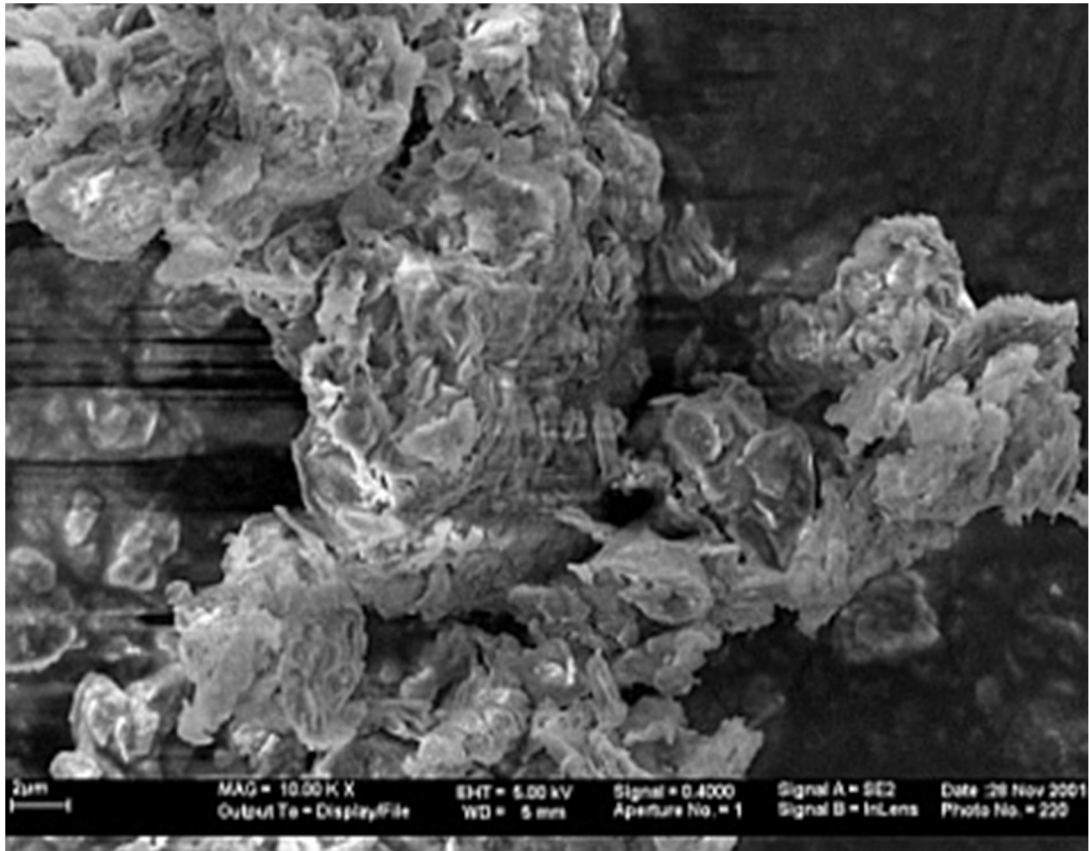
| | |
|-------------------------------|----------------------|
| مونتمریلونیت | نوع کانی |
| 0.5 – 0.7 gr/cm ³ | چگالی |
| 1-2 nm | اندازه ذرات |
| 220-270 (m ² /gr) | مساحت سطح ویژه |
| -25MV | مقدار هدایت الکتریکی |
| 48 (meg/ 100 gr) | ضریب تبادل یونی |
| 60 A° | فاصله خالی بین ذرات |
| Pale yellow | رنگ |
| 1 – 2 % | رطوبت |

جدول (۳-۳) آنالیز شیمیایی نانورس مونتمریلونیت مورد استفاده در این مطالعه [۵۰]

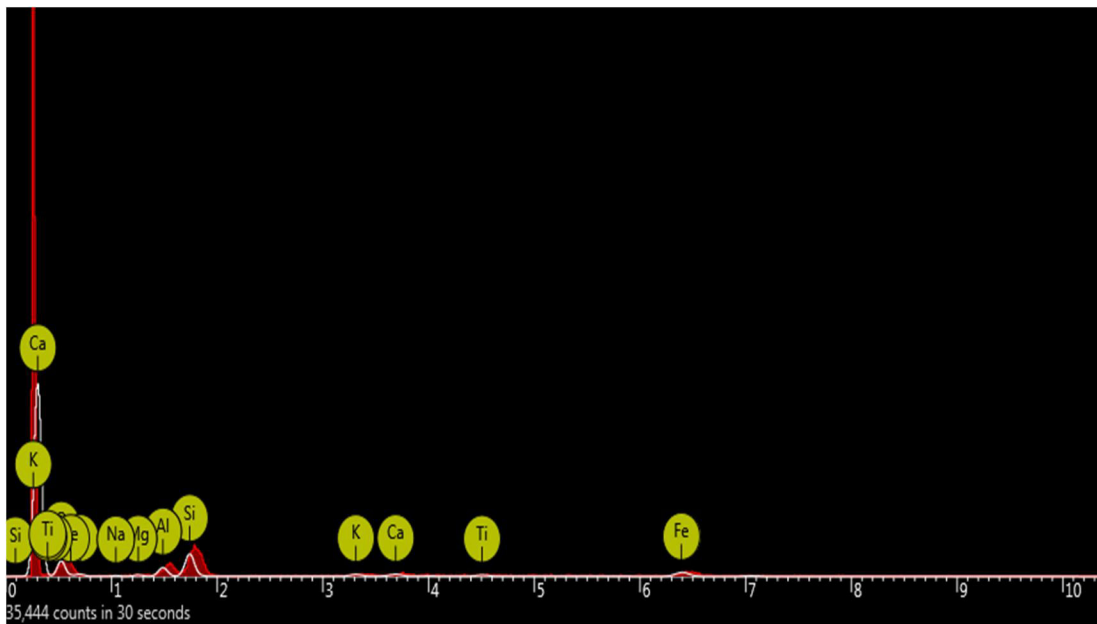
| Number | Sembol | % |
|--------|--------|-------|
| 1 | Na2O | 0.98 |
| 2 | MgO | 3.29 |
| 3 | Al2O3 | 19.60 |
| 4 | SiO2 | 50.95 |
| 5 | K2O | 0.86 |
| 6 | CaO | 1.97 |
| 7 | TiO2 | 0.62 |
| 8 | Fe2O3 | 5.62 |
| 9 | LOI | 15.45 |



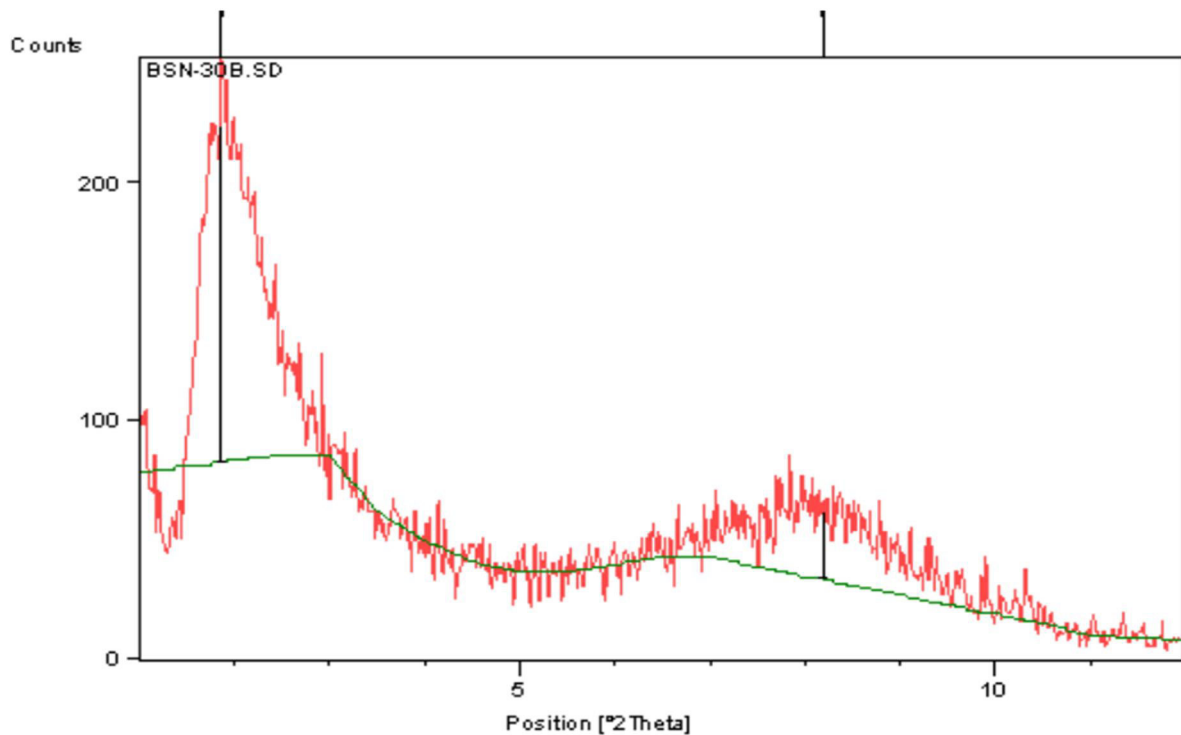
شکل (۱-۳) نتایج FTIR نانو رس مونتمریلونیت مورد استفاده در این مطالعه [۵۰]



شکل (۲-۳) تصویر نانورس مونتمریلونیت مورد استفاده در این مطالعه بر اساس مشخصات فیزیکی [۵۰]



شکل (۳-۳) تصویر نانورس مونتمریلونیت مورد استفاده در این مطالعه بر اساس خصوصیات شیمیایی [۵۰]



| Anchor Scan Parameters | |
|-------------------------------|--------------------|
| Sample Identification: | Sigma Aldrich |
| Comment: | Philips Analytical |
| | |
| Start Position [°2Th.]: | 1.0100 |
| End Position [°2Th.]: | 11.9900 |
| Step Size [°2Th.]: | 0.0200 |
| Scan Step Time [s]: | 1.0000 |
| Anode Material: | Co |
| Generator Settings: | 40 kV, 40 mA |
| Diffractometer Type: | XPert MPD |

شکل (۳-۴) نتایج X-Ray نانو رس مونتمریلونیت مورد استفاده در این مطالعه [۵۰]

۳-۳-۲- نانو اکسید روی

اکسید روی (ZnO) یک نیمه رسانای مهم با شکاف نوار و انرژی تحریک زیاد در دمای اتاق است. در سالهای اخیر اکسید روی عمدتاً به دلیل خواص نوری، الکترونیکی و پیزوالکتریکی منحصربفرد، همچنین کاربرد بالقوه در سلولهای خورشیدی، دیودهای نشر نور آبی، حسگرها و کاهنده‌ها توجه

زیادی را به خود جلب کرده است.

اکسید روی عضوی از خانواده ورتزیت (مواد با ساختار شش ضلعی فشرده) و یکی از غنی‌ترین نانوساختارها است. این ماده می‌تواند در ابزارهای نوری در ناحیه فرابنفش و آبی به کار رود. همچنین این ماده در مقیاس نانو، یک نیمه‌هادی با شفافیت زیاد و لومینسانس قوی در دمای اتاق است و به همین دلیل انتخاب ایده آلی برای انواع حسگرها، دیودهای لیزری، نمایشگرها و الکتروود شفاف است. اکسید روی، زیست سازگار و ایمن بوده و می‌تواند در پزشکی به راحتی به کار رود. نانوذرات اکسید روی از نظر جذب اشعه فرابنفش نیز دارای کاربردهای ویژه‌ای هستند که از جمله آن می‌توان به کاربرد آنها در پماد سوختگی و کرمهای ضد آفتاب به عنوان جذب کننده قوی پرتو فرابنفش و فوتوکاتالیست برای حذف آلودگی‌های محیط زیست اشاره کرد.

در اشکال (۳-۵) تا (۳-۸) مشخصات نانو اکسید روی مورد استفاده در این مطالعه بر اساس خصوصیات شیمیایی و فیزیکی، تصویر SEM، تصویر TEM و آزمایش XRD نشان داده شده است. همچنین در جدول (۳-۳) تحلیل شیمیایی و تجزیه عناصر از نانو اکسید روی (Zno) مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

در این پژوهش از نانو اکسید روی (Zno) شرکت نانو سانی مشهد و به میزان ۰/۷ ، ۱/۴ و ۲/۱ درصد وزن قیر استفاده شده است. نحوه اختلاط قیر و نانو اکسید روی (Zno) به این صورت بود که در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نانو اکسید روی (Zno) به قیر اضافه شد و با استفاده از میکسر برش بالا قیر و نانو با هم میکس شدند. مدت زمان اختلاط قیر و نانو اکسید روی (Zno) در حدود ۳۰ دقیقه و سرعت میکسر ۳۵۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شد.

Zinc Oxide Nanoparticle (ZnO, 99+%, 10-30 nm)

Details: Zinc Oxide

Nanopowder (ZnO)

Purity: 99+%

APS: 10-30 nm

SSA: 20-60m²/g

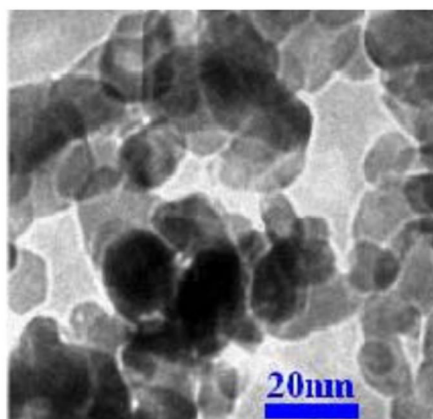
Color: milky white

Crystal phase: single

Crystal Morphology:

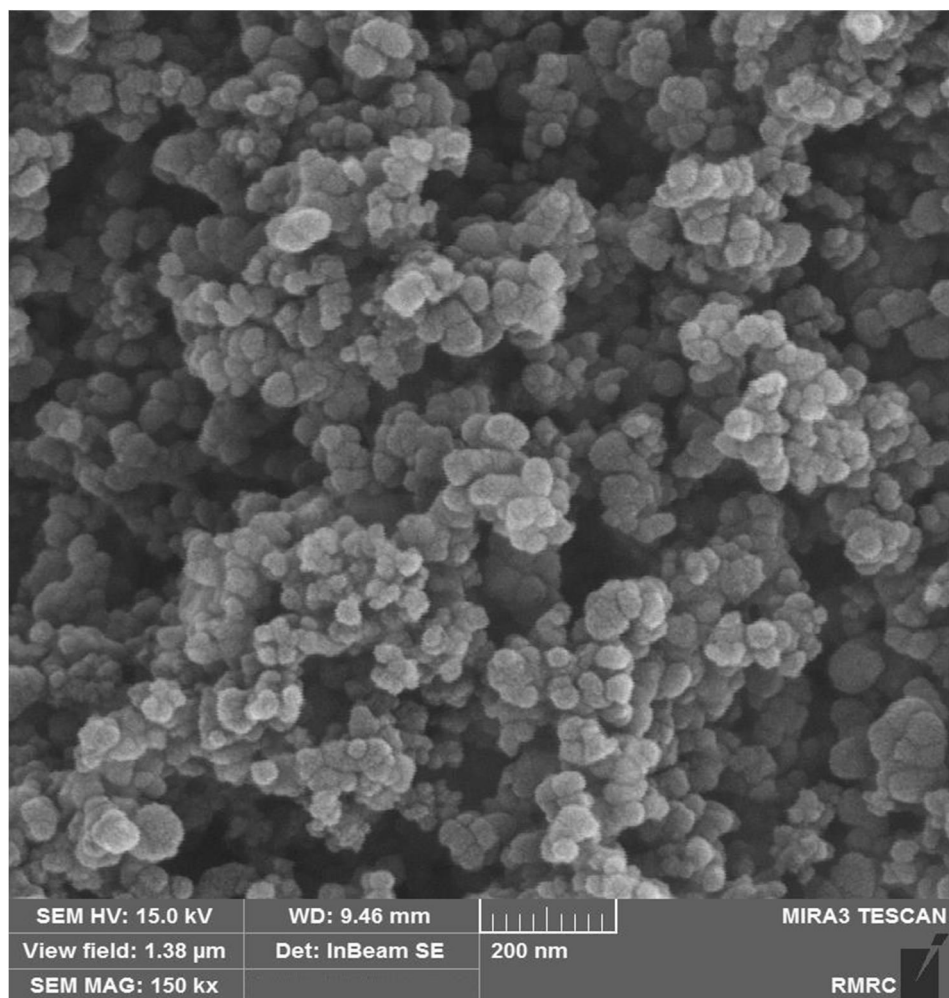
nearly spherical

True density: 5.606 g/cm³

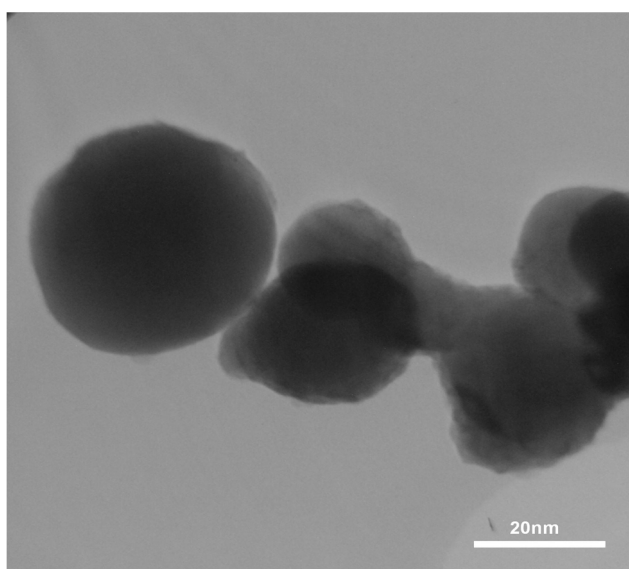


| | |
|--------------------------|------------------------|
| Compound Formula | ZnO |
| Molecular Weight | 81.37 |
| Appearance | White Powder |
| Melting Point | 1,975° C (3,587° F) |
| Boiling Point | 2,360° C (4,280° F) |
| Density | 5606 kg/m ³ |
| Monoisotopic Mass | 79.924061 Da |
| Exact Mass | 79.9241 g/mol |

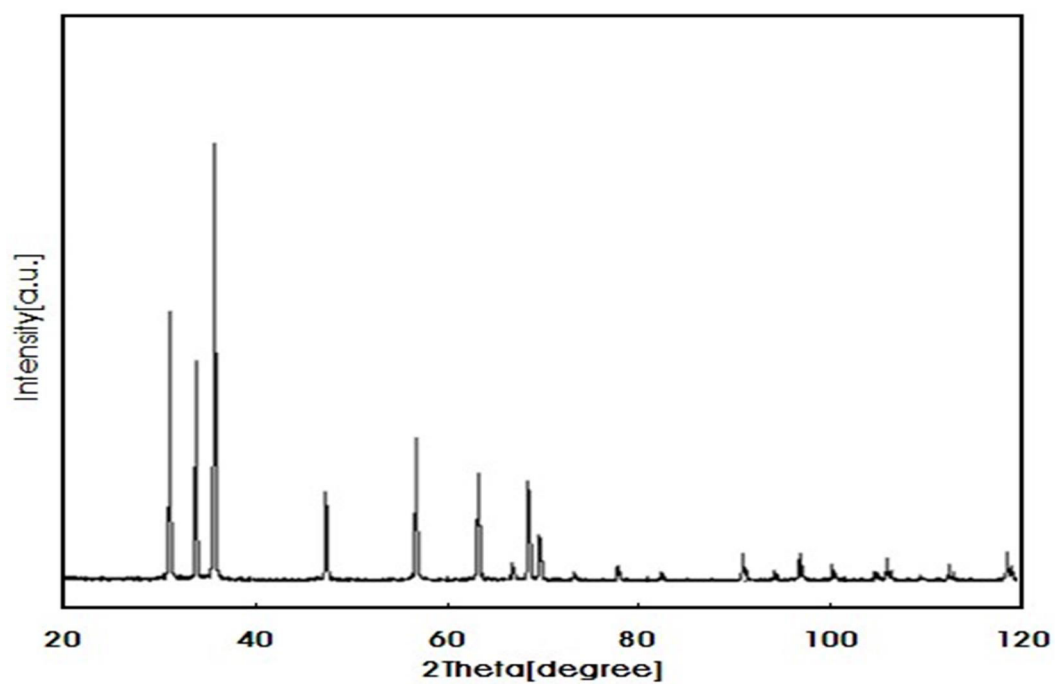
شکل (۳-۵) خصوصیات شیمیایی و فیزیکی نانو اکسید روی (Zno) مورد استفاده در این مطالعه [۵۰]



شکل (۳-۶) تصویر SEM از نانو اکسید روی (Zno) مورد استفاده در این پژوهش [۵۰]



شکل (۷-۳) تصویر TEM از نانو اکسید روی (Zno) مورد استفاده در این پژوهش [۵۰]



شکل (۸-۳) نتایج آزمایش XRD از نانو اکسید روی (Zno) مورد استفاده در این پژوهش [۵۰]

جدول (۳-۴) تحلیل شیمیایی و تجزیه عناصر از نانو اکسید روی (Zno) مورد استفاده در این پژوهش [۵۰]

| Analysis Result | Chemical Composition | Analysis Wt % |
|-----------------------------|---|---------------|
| | Al | 0.001 |
| | Fe | 0.001 |
| | Ca | 0.001 |
| | Mg | 0.001 |
| | Cu | N.D |
| | Mn | 0.001 |
| | Na | 0.001 |
| | Co | 0.001 |
| | Ni | 0.001 |
| | Si | 0.001 |
| | Pb | N.D |
| | K | 0.001 |
| | N | 0.004 |
| | C | 0.001 |
| | S | 0.003 |
| | F.O | 0.06 |
| Analytical Technique | Inductively Coupled/Elemental Analyzer | |
| Analysis project 2 | Particle Size,Purity, SSA,Loss on dry,Sulphated assay | |
| Particle Size nm | 20nm | |
| Purity % | 99.8 | |
| SSA, M2/g | 80-120 | |
| Loss on dry %≤ | 0.2 | |

۳-۴- آزمایشات انجام شده

برای بررسی اثر نانولوله های رس و اکسیدروی بر قیر، ابتدا لازم بود تا میزان ترکیب و اثرپذیری نانو مواد بر روی قیر مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین در اولین مرحله و قبل از انجام آزمایش های اصلی بر روی قیر، لازم بود تا شرایط اولیه ترکیب این مواد تعیین گردد. لذا آزمایشهای لازم در دو بخش اصلی تعریف گردید که بخش اول شامل تعیین درصد بهینه اختلاط نانو مواد و قیر و بخش دوم شامل تعیین اثر فیزیکی یا شیمیایی نانو مواد بر روی قیر بود. بخش اول این پژوهش، به بررسی تاثیر نانو رس و نانو اکسیدروی در درصد های مختلف و در دو حالت اختلاط تنها و ترکیبی نانو مواد با قیر می- باشد. جدول (۳-۴) تنوع قیرهای اصلاح شده با الیاف نانورس و نانو اکسید روی را که در این پایان نامه

مورد سنجش قرار داده شده‌اند را نشان می‌دهد.

جدول (۳-۵) کدبندی قیرهای اصلاح با نانو مواد

| کد قیر اصلاح شده | درصد نانورس | درصد نانو اکسید روی |
|------------------|-------------|---------------------|
| Neat | - | - |
| NC 2% | ۲ | - |
| NC 4% | ۴ | - |
| NC 7% | ۷ | - |
| NZno 0.7% | - | ۰/۷ |
| NZno 1.4% | - | ۱/۴ |
| NZno 2.1% | - | ۲/۱ |
| NC 2%+ NZno 0.7% | ۲ | ۰/۷ |
| NC 4%+ NZno 0.7% | ۴ | ۰/۷ |
| NC 7%+ NZno 0.7% | ۷ | ۰/۷ |
| NC 2%+ NZno 1.4% | ۲ | ۱/۴ |
| NC 4%+ NZno 1.4% | ۴ | ۱/۴ |
| NC 7%+ NZno 1.4% | ۷ | ۱/۴ |
| NC 2%+ NZno 2.1% | ۲ | ۲/۱ |
| NC 4%+ NZno 2.1% | ۴ | ۲/۱ |
| NC 7%+ NZno 2.1% | ۷ | ۲/۱ |

۳-۴-۲- آزمایش تعیین درجه نفوذ قیر

آزمایش تعیین درجه نفوذ برای تعیین قابلیت نفوذ پذیری قیرها بکار می‌رود. برای این آزمایش، یک سوزن فولادی متصل به وزنه ۱۰۰ گرمی را در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر روی قیر به مدت ۵ ثانیه قرار می‌دهند و میزان نفوذ این سوزن را بر حسب دهم میلیمتر بیان می‌کنند. در این آزمایش، پس از گرم کردن و هم زدن قیر، آن را داخل ظرف مخصوص ریخته و پس از رسیدن به دمای محیط، به مدت یک ساعت در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده، سپس ظرف حاوی نمونه را زیر سوزن

دستگاه نفوذسنج برده و سوزن را با سطح نمونه مماس می کنند و تحت نفوذ وزنه ۱۰۰ گرمی به مدت ۵ ثانیه قرار می گیرد. میزان نفوذ سوزن به داخل قیر از روی درجه بندی دستگاه بر حسب دهم میلیمتر قرائت و به عنوان درجه نفوذ یادداشت می گردد. درجه نفوذ کمتر، به معنی قیر سفت تر و درجه نفوذ بیشتر، به معنی قیر شل تر می باشد. شکل زیر نمونه ای از دستگاه های اندازه گیری درجه نفوذ سوزنی را نشان می دهد [۴۲].



شکل (۳-۹) دستگاه اندازه گیری درجه نفوذ سوزنی مطابق با استاندارد ASTM D5

۳-۴-۳- آزمایش تعیین نقطه نرمی قیر

قیرهای خالص در برابر افزایش درجه حرارت به تدریج از حالت جامد به حالت خمیری و در نهایت به حالت مایع تغییر حالت می دهند. نقطه نرمی یکی از معیارهایی است که در تعیین حساسیت قیرها نسبت به درجه حرارت بکار می رود. درجه حرارتی که قیر از حالت جامد به حالت روان در می آید، نقطه نرمی قیر نامیده می شود. قیری که درجه نرمی اش بیشتر باشد، کمتر در مقابل تغییرات درجه حرارت حساس بوده و درجه نفوذ یا کندروانی آن کمتر تغییر می کند. آزمایش تعیین نقطه نرمی با

روش حلقه و گلوله انجام می‌گیرد. در این روش ابتدا قیر گرم می‌شود، سپس قیر در داخل حلقه‌های مخصوص ریخته شده و سطح آن توسط کاردک گرم شده، صاف می‌گردد. حلقه‌ها در محل خود قرار داده می‌شوند. مجموعه در داخل ظرف محتوی آب ۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و گلوله‌ای فلزی با وزن و قطر معین روی قیر قرار می‌گیرد. به ظرف آب از پایین بطور یکنواخت با سرعت ۵ درجه در دقیقه حرارت داده می‌شود. درجه حرارتی که گلوله‌ها، تحت اثر وزن خود از داخل لایه قیر عبور کرده و با صفحه زیرین تماس حاصل می‌نماید، اندازه‌گیری شده و به عنوان نقطه نرمی قیر یادداشت می‌گردد [۴۲].



شکل (۳-۱۰) دستگاه اندازه‌گیری نقطه نرمی مطابق با استاندارد ASTM D36

۳-۴-۴- آزمایش افت وزنی قیر

افت وزنی قیر عبارت است از درصد افت وزنی نمونه قیری که در مدت ۵ ساعت در درجه حرارت ۱۶۳ درجه سانتیگراد در دستگاه مجهز به تهویه قرار می‌گیرد. این آزمایش به آزمایش لعاب نازک نیز معروف است. در حقیقت آزمایش افت وزنی قیر، یک نوع تقطیر قیر می‌باشد که نتیجه آن معیاری

است که فراریت نسبی حلال های قیر را در ۱۶۳ درجه سانتیگراد نشان می دهد. علت انتخاب دمای ۱۶۳ درجه آن است که در این دما، عمل اختلاط قیر و مصالح سنگی برای تهیه آسفالت در این دما صورت می پذیرد. افت وزنی قیرهای خالصی که در راهسازی به کار می روند پس از انجام این آزمایش، کمتر از یک درصد می باشند؛ و معمولاً برای پی بردن به خواص قیری که روی آن آزمایش لعاب نازک انجام شده، پس از پایان آزمایش تحت آزمایش های قابلیت نفوذ و نقطه نرمی قرار می دهند. توجه نمایید که هر چه قیر نرم تر باشد یعنی درجه نفوذ آن بیشتر باشد، افت وزنی آن نیز بیشتر خواهد بود.

از جمله پدیده های مورد ذکر در مورد آسفالت، پدیده پیرشدگی است که علت آن کاهش وزن قیر در اثر حرارت، اکسیداسیون و اشعه UV و تبدیل روغن به رزین و رزین به آسفالتین می باشد که آزمایش افت وزنی قیر می تواند معیاری خوب برای پیش بینی این پدیده باشد. نکته قابل ذکر دیگر این است که حداکثر میزان افت وزنی مطابق آیین نامه، برابر ۰/۸٪ می باشد.



شکل (۳-۱۱) دستگاه تعیین افت وزنی قیر مطابق با استاندارد ASTM D 06

۳-۴-۵- آزمایش ویسکومتر چرخشی (Rotary Viscometer)

این آزمایش جهت حصول اطمینان از قابلیت پمپاژ قیر در پالایشگاه، ایستگاه بارگیری و کارخانه‌ی آسفالت صورت می‌گیرد و خصوصیات روانی قیر در دمای بالا سنجیده می‌شود و در استاندارد ASTM D4402، ویسکومتر بروکفیلد نامیده می‌شود. آزمایش RV برای قیرهای اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده کاربرد دارد و به کمک نتایج این آزمایش می‌توان دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی را بدست آورد. حداکثر ویسکوزیته برای پمپاژ قیر طبق استاندارد آئین‌نامه شارپ ۳ pa.sec می‌باشد [۴۸]. شکل (۳-۱۲) دستگاه تعیین ویسکوزیته قیر مطابق با استاندارد ASTM D4402 را نشان می‌دهد.

در این پایان‌نامه، تست ویسکوزیته قیر در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد و برای قیر در سه حالت پیرنشده، پیرشده لعاب نازک چرخشی (RTFO) و پیرشده محفظه تسریع پیرشدگی (PAV) انجام شده است. این آزمایش در شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک تهران انجام شده است.



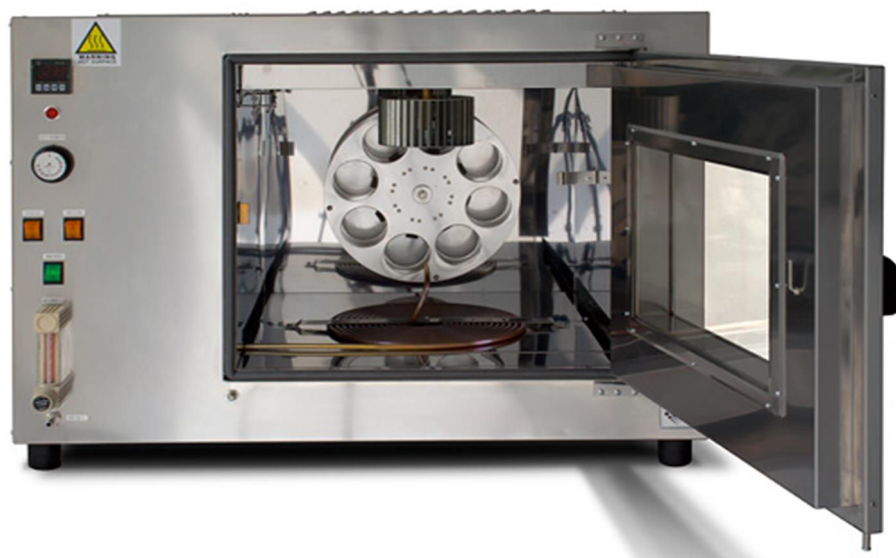
شکل (۳-۱۲) دستگاه تعیین ویسکوزیته قیر مطابق با استاندارد ASTM D4402

۳-۴-۶- ساخت نمونه‌های قیر پیر شده

یکی از نکات مشخص آیین‌نامه آزمایش‌های سوپرپیو، تأکید بر انجام آزمایش‌ها در حالت‌هایی است که مراحل مهم و بحرانی دوره‌ی عمر قیر را شبیه‌سازی می‌کند. این آزمایشات عبارتند از :

- آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) (AASHTOT-T240)

آزمایش لعاب نازک چرخشی^۱ (RTFO) جهت شبیه‌سازی رفتار قیر در مرحله اجرا و در هنگام عملیات اختلاط و ساخت انجام می‌شود تا عمل پیر شدگی در طول عمر تسریع فیزیکی قیر پیر شده، اندازه‌گیری شود. روند آزمایش RTFO به این صورت می‌باشد که ابتدا قیر به آرامی گرم می‌شود به طوری که دمای آن از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر نرود. سپس حدود ۳۵ گرم قیر در استوانه‌های شیشه‌ای ریخته شده و به صورت افقی در یک دیسک عمودی قرار داده می‌شود. دمای دستگاه RTFO ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد، سرعت چرخش دیسک ۱۵ دور در دقیقه، دمیده شدن جریان هوا با شدت ۴۰۰۰ ml/min در داخل استوانه‌ها و مدت زمان آزمایش ۸۵ دقیقه می‌باشد.



شکل (۳-۱۳) دستگاه آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO)

^۱ Rolling Thin-Film Oven

۳-۴-۷- آزمایش محفظه تسریع پیری

آزمایش محفظه تسریع پیری^۱ (PAV) جهت شبیه‌سازی پیر شدگی قیر در طول عمر خدمت روسازی، در مدت زمان نسبتاً کوتاه و در دما و فشار بالا صورت می‌گیرد. روند انجام این آزمایش به این صورت می‌باشد که در حدود ۵۰ گرم از قیرهای بدست آمده از آزمایش RTFO در داخل سینی‌های مربوط به آزمایش PAV ریخته می‌شود. سپس سینی‌ها در طبقات محفظه دستگاه PAV قرار داده می‌شود تا نمونه‌ها به مدت ۲۰ ساعت، در فشار ۲۰۷۰ کیلو پاسکال و دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گیرند. پس از این مدت، سینی‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در داخل یک گرمچال با دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود تا نمونه‌ها به حالت روان برسند سپس نمونه‌ها را از داخل سینی به داخل ظرف‌های کوچک ریخته شده و جهت جداسازی گاز قیر از طریق وکیوم، ظرف‌ها در داخل گرمچال وکیوم با دمای 170 ± 5 درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده می‌شود.



شکل (۳-۱۴) دستگاه آزمایش محفظه تسریع پیری (PAV)

¹ Pressure Aging Vessel

فصل ٤:

تحليل و تفسير نتائج

۴-۱- مقدمه

در فصول قبل اهمیت قیر به عنوان یکی از اجزای اصلی روسازی و تاثیر آن بر رفتار بتن آسفالتی در برابر آسیب‌های وارده مورد ارزیابی قرار داده شد. همچنین رفتار پیرشدگی قیر به عنوان یکی از شاخصهای تاثیرگذار بر عملکرد آن و تاثیر نانو مواد بر این ویژگی مورد ارزیابی قرار داده شد. در این فصل تلاش خواهد شد تاثیر نانو مواد بر رفتار پیرشدگی قیرها در آزمایشات نقطه نرمی، درجه نفوذ، افت وزنی قیر و ویسکوزیته قیر در سه حالت پیرنشده، پیرشده کوتاه مدت (RTFO) و پیرشده بلندمدت (PAV) مورد سنجش قرار داده شود.

۴-۲- نتایج آزمایشات کلاسیک قیر به منظور تعیین درصد بهینه نانو

مواد

در این بخش نتایج قیرهای اصلاح شده با نانورس و نانو اکسید روی در درصدهای مختلف و حالت‌های مجزا هر نانو و ترکیب دو نانو بررسی خواهد شد. هدف از این بخش، تعیین گزینه نهایی قیرهای اصلاح شده با نانو مواد با استفاده از آزمایشات کلاسیک قیر و در نهایت انتخاب طرح نهایی قیر برای انجام آزمایشات پیشرفته قیر می‌باشد.

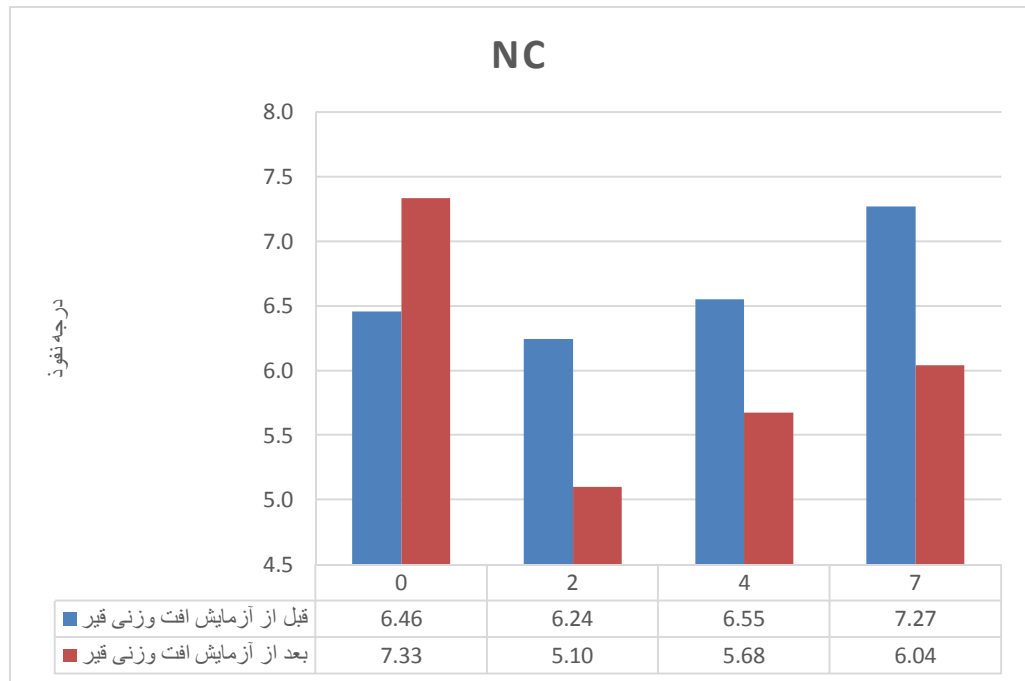
۴-۲-۱- نتایج آزمایش درجه نفوذ قیر

در شکل (۴-۱) تاثیر نانورس بر درجه نفوذ قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج درجه نفوذ قبل از آزمایش افت وزنی قیر، افزودن ۲٪ نانورس به قیر موجب

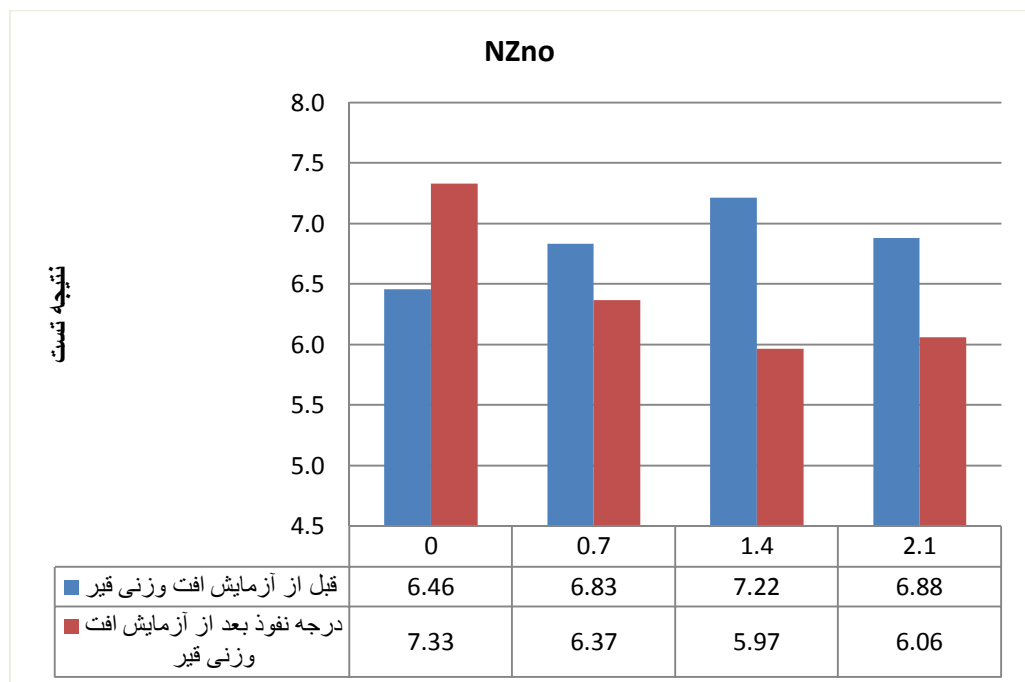
کاهش درجه نفوذ قیر خالص می‌شود. در صورتی که افزایش درصد نانو رس پس از ۲٪ به مقادیر ۴ و ۷ درصد، باعث افزایش درجه نفوذ قیر خالص می‌شود. همچنین، نتایج درجه نفوذ بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان می‌دهد که افزودن نانورس موجب کاهش قابل توجه درجه نفوذ قیر خالص می‌شود. بطوری که، افزودن ۲٪ نانو رس در این حالت، درجه نفوذ قیر خالص را حدود ۳۰٪ کاهش داده است. اما نکته قابل توجه، روند صعودی درجه نفوذ نسبت به قیر حاوی ۲٪ نانورس، پس از افزودن نانورس در درصدهای بالاتر می‌باشد. همچنین، تحلیل تاثیر آزمایش افت وزنی قیر بر درجه نفوذ نشان می‌دهد که این فرآیند موجب پیرشدگی قیر و در نهایت کاهش وزن قیر در اثر حرارت، اکسیداسیون و اشعه UV و تبدیل روغن به رزین و رزین به آسفالتین می‌باشد. در این حالت نانورس، تاثیر بسزایی را در کاهش درجه نفوذ قیر خالص، نسبت به حالت قبل از پیرشدگی داشته است. به عبارت دیگر، تاثیر نانو رس بر کاهش درجه نفوذ قیر، در حالت پس از آزمایش افت وزنی قیر، نسبت به کاهش درجه نفوذ قیر قبل از آزمایش افت وزنی، بطور قابل توجهی بیشتر بوده است که بیانگر تاثیر نانورس بر عملکرد پیرشدگی قیر و در نهایت خاصیت آنتی اکسیدانی این نانوماده می‌باشد.

در شکل (۴-۲) تاثیر نانو اکسیدروی بر درجه نفوذ قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج درجه نفوذ قبل از آزمایش افت وزنی قیر، افزودن نانو اکسیدروی به قیر موجب افزایش درجه نفوذ قیر خالص می‌شود. در صورتی که افزایش درصد نانو اکسیدروی پس از ۱/۴٪ به مقادیر ۲/۱٪ درصد، باعث کاهش درجه نفوذ قیر نسبت به قیر حاوی درصدهای کمتر نانو اکسیدروی می‌شود. این در حالی است که، نتایج درجه نفوذ بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان می‌دهد که افزودن نانو اکسیدروی موجب کاهش قابل توجه درجه نفوذ قیر خالص می‌شود. بطوری که، افزودن ۱/۴٪ نانورس در این حالت، درجه نفوذ قیر خالص را حدود ۲۱٪ کاهش داده است. اما نکته قابل توجه، روند نزولی قابل توجه درجه نفوذ قیر تا ۱/۴٪ نانو اکسیدروی می‌باشد. در صورتی که افزایش نانو اکسیدروی از ۱/۴٪ به ۲/۱٪ تاثیر قابل توجهی بر کاهش درجه نفوذ قیر نداشته است. همچنین، تحلیل تاثیر آزمایش افت وزنی قیر بر درجه نفوذ نشان می‌دهد تاثیر نانو اکسیدروی بر

کاهش درجه نفوذ قیر، در حالت پس از آزمایش افت وزنی قیر، نسبت به کاهش درجه نفوذ قیر قبل از آزمایش افت وزنی، بطور قابل توجهی بیشتر بوده است که نشان‌دهنده تاثیر نانوآکسیدروی بر بهبود رفتار پیرشدگی قیر می‌باشد.



شکل (۴-۱) تاثیر نانورس بر درجه نفوذ قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر

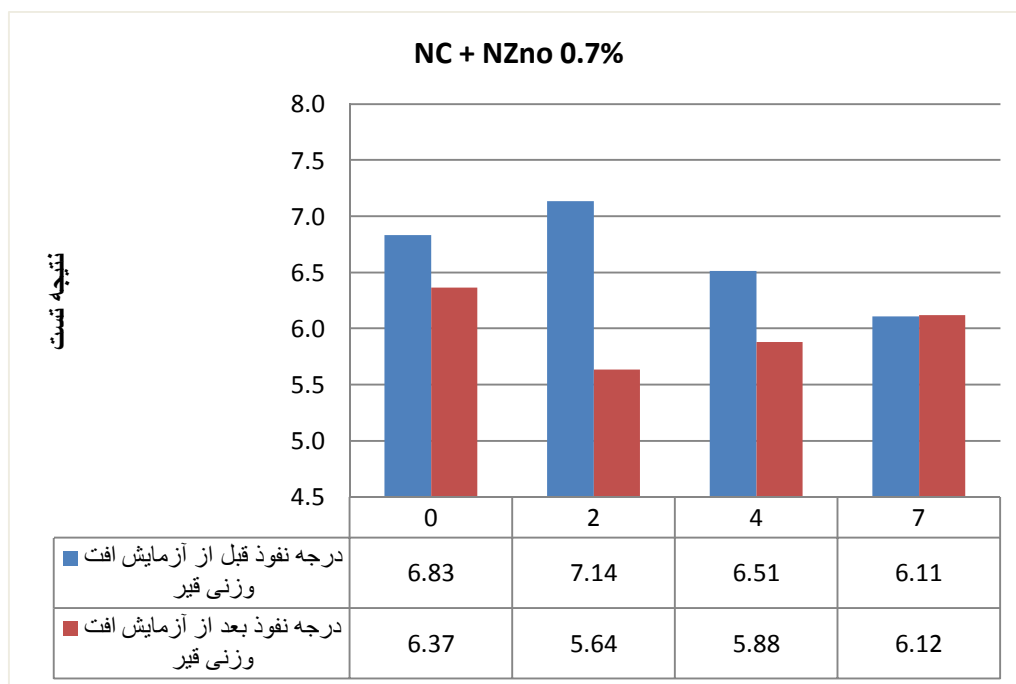


شکل (۴-۲) تاثیر نانوآکسید روی بر درجه نفوذ قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر

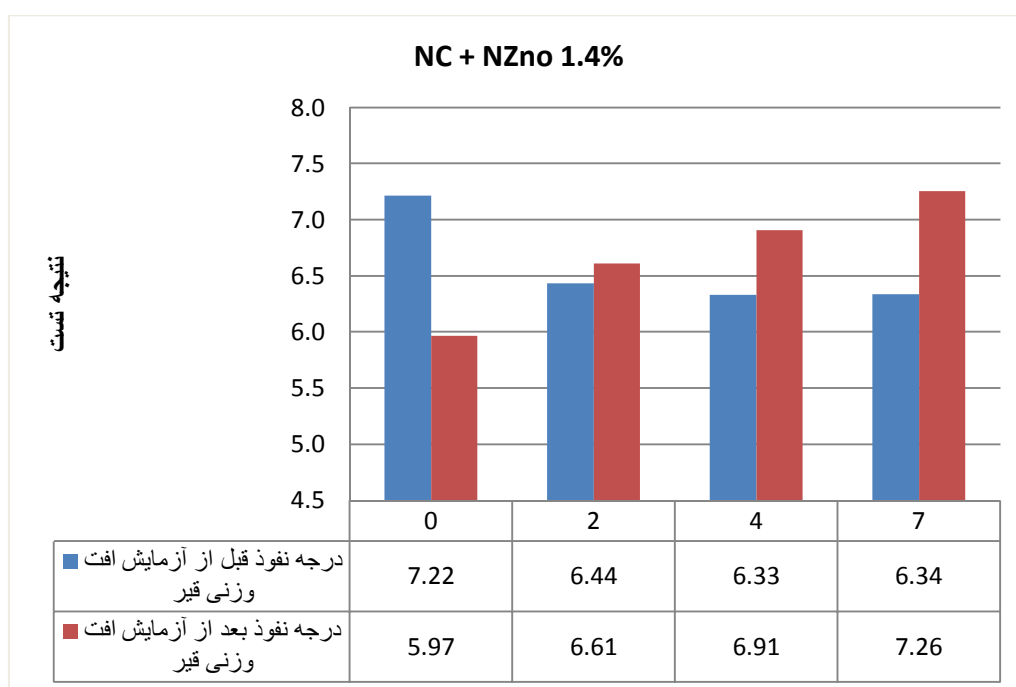
در شکل (۳-۴) تاثیر نانورس را بر درجه نفوذ قیراصلاح شده با ۰/۷٪ نانواکسیدروی را قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج درجه نفوذ قبل از آزمایش افت وزنی قیراصلاح شده با ۰/۷٪ نانواکسیدروی، افزودن ۰/۲٪ نانورس به قیر موجب افزایش درجه نفوذ قیر می‌شود. در صورتی که افزایش درصد نانورس پس از ۰/۲٪ به مقادیر ۴ و ۷ درصد، باعث کاهش درجه نفوذ قیر نسبت به قیر حاوی نانواکسیدروی می‌شود. این در حالی است که، نتایج درجه نفوذ بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان می‌دهد که افزودن نانورس موجب کاهش درجه نفوذ قیر حاوی نانواکسیدروی می‌شود. نکته قابل توجه در این نمودار، یکسان بودن مقدار درجه نفوذ قیر حاوی ۰/۷٪ نانواکسیدروی و ۰/۲٪ نانورس در دو حالت قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر می‌باشد. همچنین، تعیین درصد بهینه نانورس تحت تاثیر پیرشدگی آزمایش افت وزنی بر قیر حاوی نانواکسیدروی نشان می‌دهد، درصد ۰/۲٪ نانورس موجب بیشترین کاهش درجه نفوذ قیر شده است.

در شکل (۴-۴) تاثیر نانورس را بر درجه نفوذ قیراصلاح شده با ۰/۴٪ نانواکسیدروی را قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج درجه نفوذ قبل از آزمایش افت وزنی، افزودن نانورس به قیر موجب کاهش درجه نفوذ قیر می‌شود. این در حالی است که، نتایج درجه نفوذ بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان می‌دهد که افزودن نانورس موجب افزایش درجه نفوذ قیر حاوی نانواکسیدروی می‌شود. این افزایش بطوری است که با افزایش درصد نانورس اختلاف درجه نفوذ قیر بعد از آزمایش افت وزنی به طور قابل توجهی بیشتر از حالت قبل از پیرشدگی است که نشان دهنده عدم بهبود رفتار پیرشدگی قیر می‌باشد.

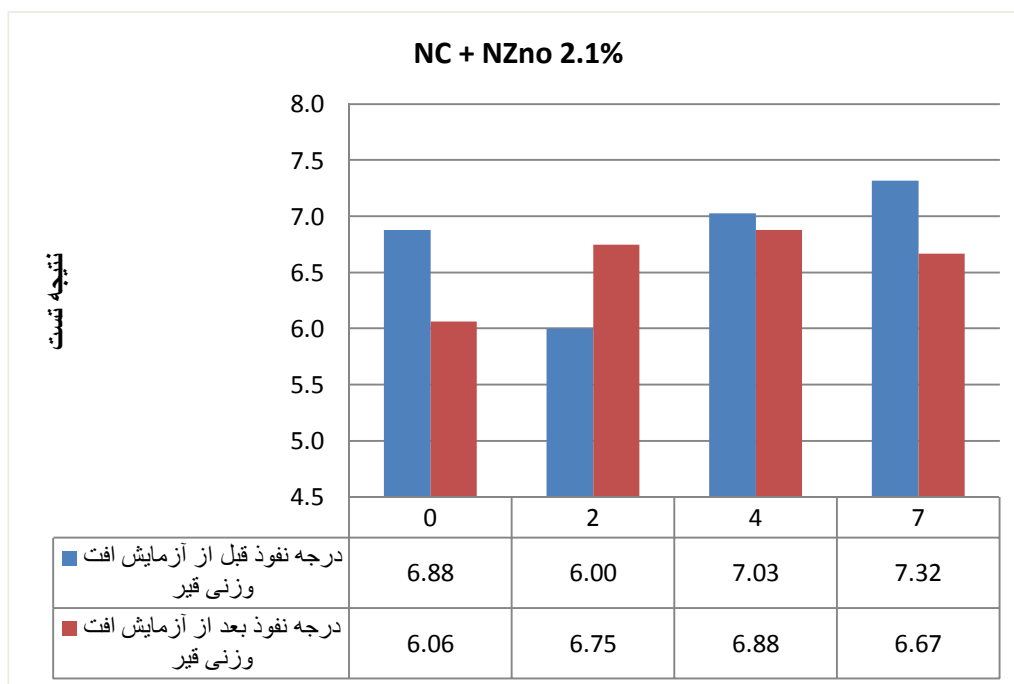
شکل (۵-۴) تاثیر نانورس را بر درجه نفوذ قیراصلاح شده با ۰/۱٪ نانواکسیدروی را قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج درجه نفوذ قبل از آزمایش افت وزنی، افزودن ۰/۲٪ نانورس به قیر موجب کاهش درجه نفوذ قیر و افزایش درصد نانورس باعث افزایش درجه نفوذ قیر می‌شود. این در حالی است که، نتایج درجه نفوذ بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان می‌دهد که افزودن نانورس موجب افزایش درجه نفوذ قیر حاوی نانواکسیدروی می‌شود.



شکل (۳-۴) تاثیر نانورس بر درجه نفوذ قیر اصلاح شده با نانواکسیدروی ۰.۷٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر



شکل (۴-۴) تاثیر نانورس بر درجه نفوذ قیر اصلاح شده با نانواکسیدروی ۱.۴٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر



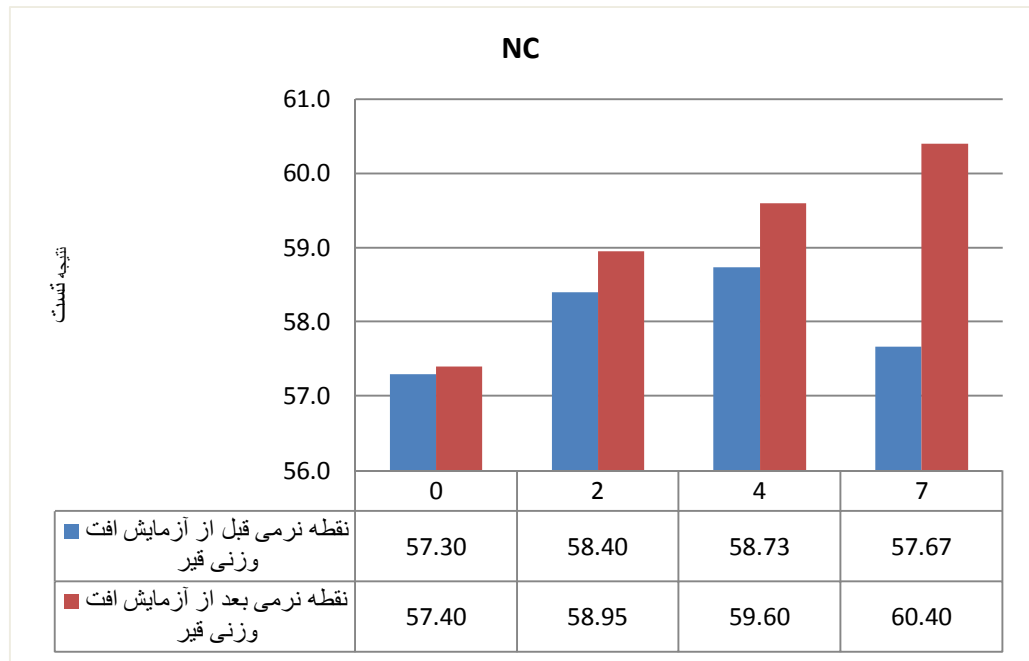
شکل (۴-۵) تاثیر نانورس بر درجه نفوذ قیر اصلاح شده با نانواکسیدروی ۲/۱٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی

۴-۲-۲- نتایج آزمایش نقطه نرمی قیر

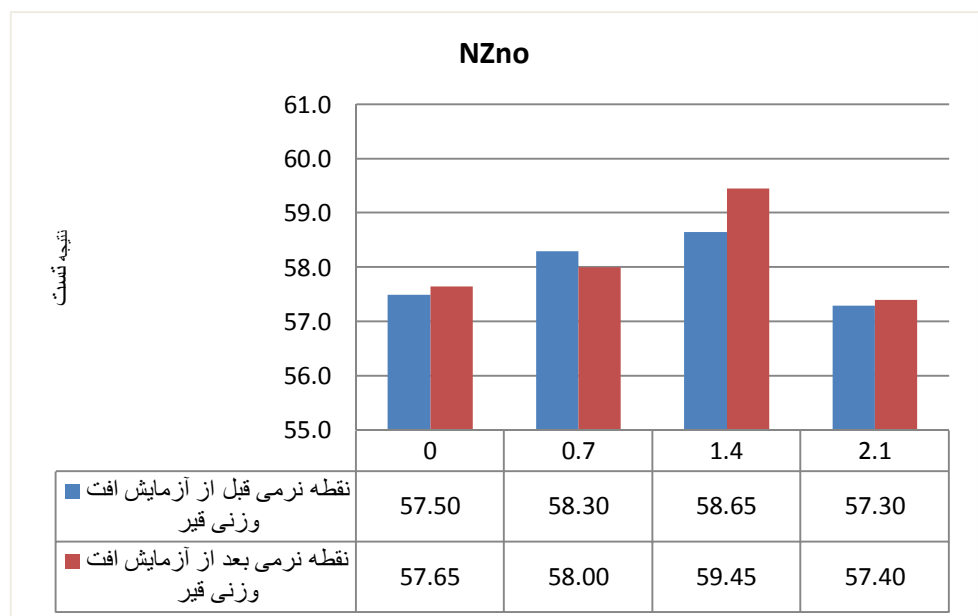
در شکل (۴-۶) تاثیر نانورس را بر نقطه نرمی قیر خالص را قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج نقطه نرمی قیر قبل از آزمایش افت وزنی، افزودن نانورس تا ۰.۴٪ موجب افزایش نقطه نرمی و در نتیجه بهبود عملکرد قیر در دمای بالا می‌شود. این در حالی است که افزایش مقدار نانورس بیشتر از ۰.۴٪ موجب کاهش نقطه نرمی قیر می‌شود. نتایج نقطه نرمی بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان می‌دهد که افزودن نانورس موجب افزایش نقطه نرمی قیر می‌شود. این افزایش بطوری است که، با افزایش درصد نانورس، نقطه نرمی قیر نیز افزایش می‌یابد و بالاترین نقطه نرمی مربوط به قیر حاوی ۰.۷٪ نانورس و در حالت بعد از پیرشدگی می‌شود.

در شکل (۴-۷) تاثیر نانواکسیدروی را بر نقطه نرمی قیر خالص را قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج نقطه نرمی قیر قبل از آزمایش افت وزنی، افزودن نانواکسیدروی تا ۱/۴٪ در دو حالت قبل و بعد از پیرشدگی موجب افزایش نقطه نرمی و در نتیجه بهبود عملکرد قیر در دمای بالا می‌شود. این در حالی است که افزایش مقدار نانواکسیدروی بعد از ۱/۴٪ موجب کاهش

نقطه نرمی قیر می‌شود. به عبارت دیگر، درصد بهینه برای اصلاح قیر با نانوآکسیدروی قبل و بعد از پیرشدگی مقدار ۱/۴٪ می‌باشد و بعد از این درصد، نانوآکسیدروی موجب کاهش نقطه نرمی قیر و در نتیجه تاثیر منفی بر عملکرد دمای بالای قیر می‌شود.



شکل (۴-۶) تاثیر نانورس بر نقطه نرمی قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر

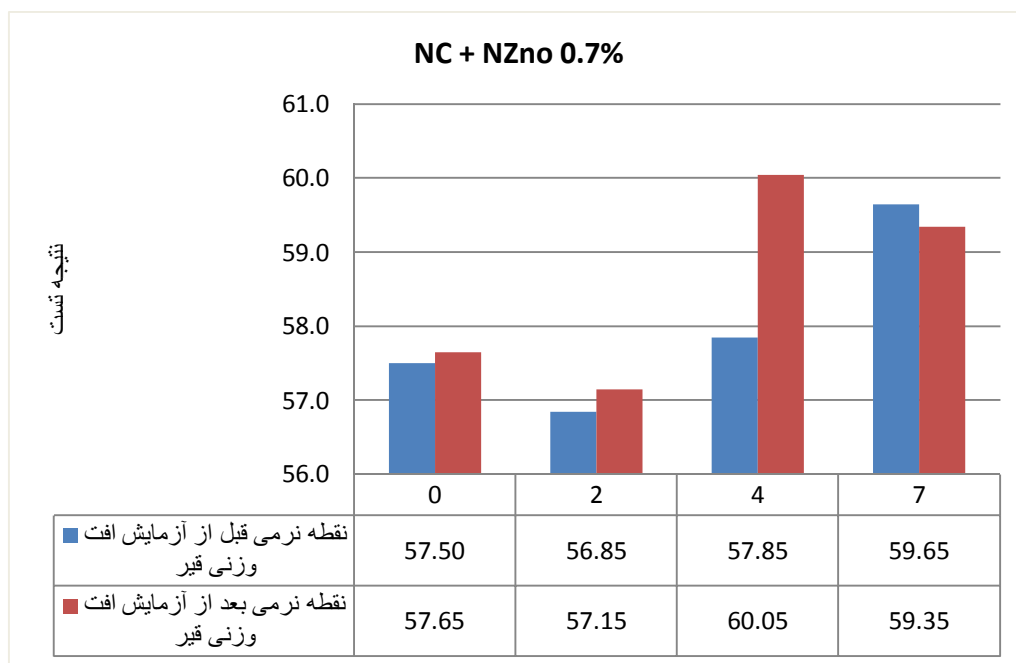


شکل (۴-۷) تاثیر نانوآکسیدروی بر نقطه نرمی قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر

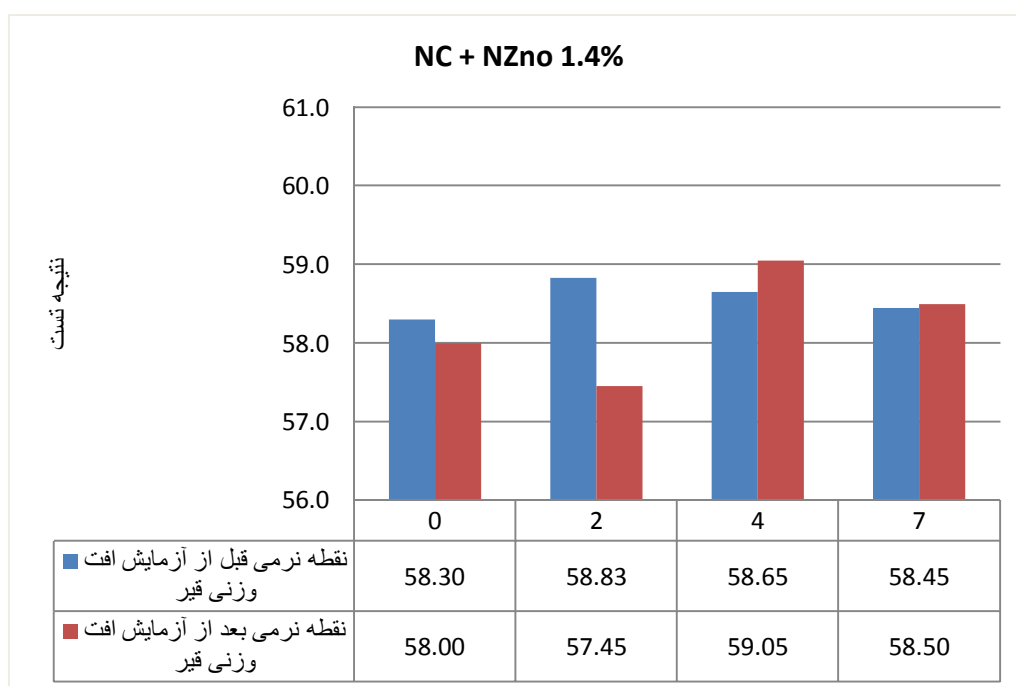
در شکل (۴-۸) تاثیر نانورس را بر نقطه نرمی قیراصلاح شده با ۰/۷٪ نانواکسیدروی را قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج نقطه نرمی قبل از آزمایش افت وزنی قیراصلاح شده با ۰/۷٪ نانواکسیدروی، افزودن ۰/۲٪ نانورس به قیر موجب کاهش نقطه نرمی قیر می-شود. در صورتی که افزایش درصد نانورس پس از ۰/۲٪ به مقادیر ۴ و ۷ درصد، باعث افزایش نقطه نرمی قیر نسبت به قیر حاوی نانواکسیدروی می-شود. این در حالی است که، نتایج نقطه نرمی بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان می-دهد که افزودن ۰/۴٪ نانورس بهترین عملکرد را در افزایش نقطه نرمی قیر حاوی نانواکسیدروی را ایفا می-کند.

در شکل (۴-۹) تاثیر نانورس را بر نقطه نرمی قیراصلاح شده با ۱/۴٪ نانواکسیدروی را قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج نقطه نرمی قبل از آزمایش افت وزنی قیراصلاح شده با ۰/۷٪ نانواکسیدروی، افزودن ۰/۲٪ نانورس به قیر موجب افزایش نقطه نرمی قیر می-شود. در صورتی که افزایش درصد نانورس پس از ۰/۲٪ به مقادیر ۴ و ۷ درصد، باعث کاهش نقطه نرمی قیر نسبت به قیر حاوی نانواکسیدروی می-شود. این در حالی است که، نتایج نقطه نرمی بعد از آزمایش افت وزنی این قیر همانند قیر اصلاح شده با ۰/۷٪ نانواکسیدروی نشان می-دهد که افزودن ۰/۴٪ نانورس بهترین عملکرد را در افزایش نقطه نرمی قیر حاوی نانواکسیدروی را ایفا می-کند.

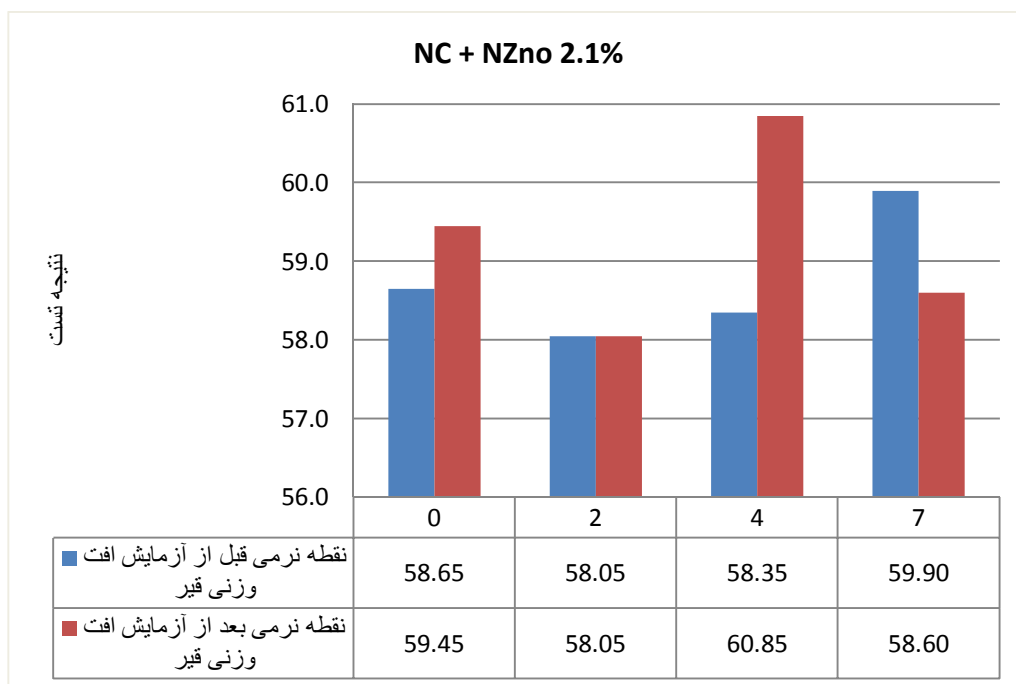
در شکل (۴-۱۰) تاثیر نانورس را بر نقطه نرمی قیراصلاح شده با ۲/۱٪ نانواکسیدروی را قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان داده شده است. نتایج این نمونه در دو حالت پیرشده و پیرنشده نیز مطابق با نمونه‌های قبل (۰/۷ و ۱/۴ درصد نانواکسیدروی) می-باشد.



شکل (۸-۴) تاثیر نانورس بر نقطه نرمی قیر اصلاح شده با نانوآکسیدروی ۰/۷٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر



شکل (۹-۴) تاثیر نانورس بر نقطه نرمی قیر اصلاح شده با نانوآکسیدروی ۱/۴٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر

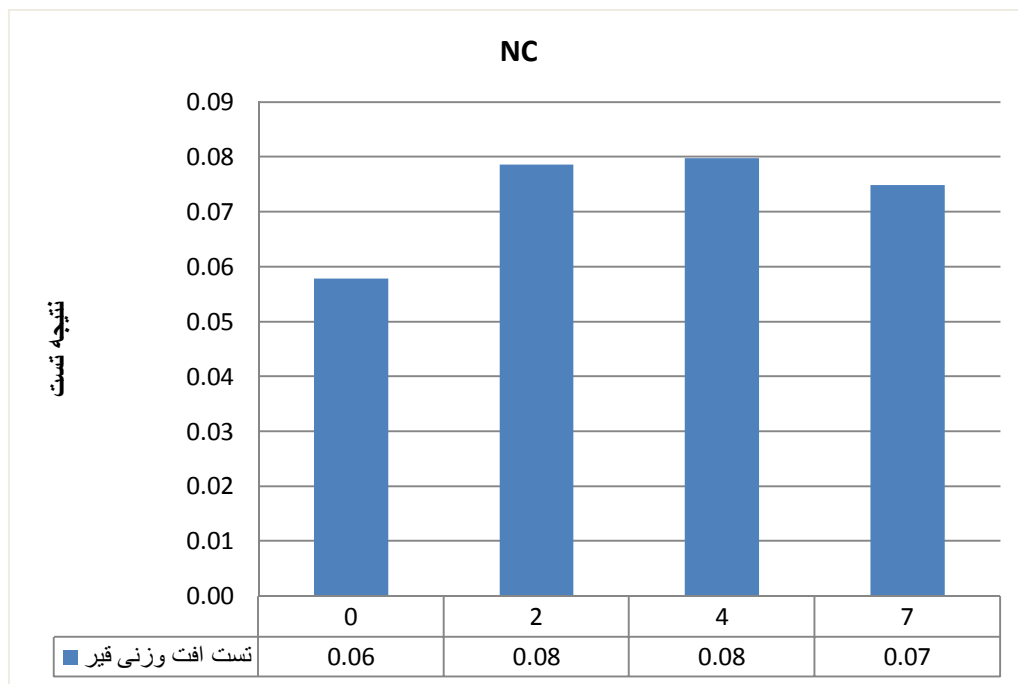


شکل (۴-۱۰) تاثیر نانورس بر نقطه نرمی قیر اصلاح شده با نانواکسیدروی ۲/۱٪ قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر

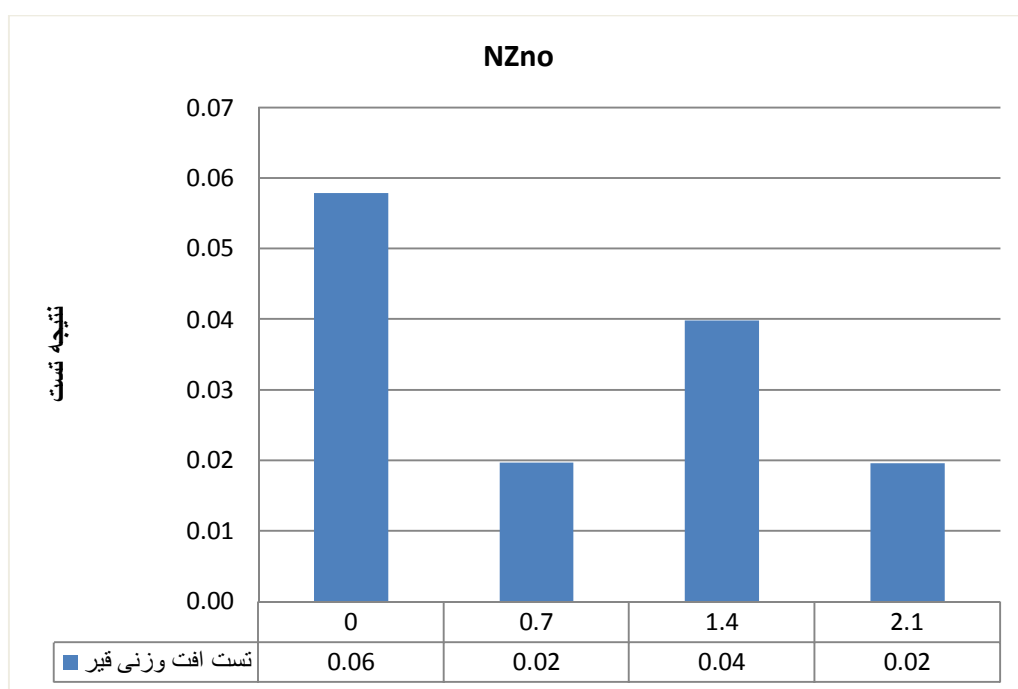
۴-۲-۳- نتایج آزمایش افت وزنی قیر

در شکل (۴-۱۱) تاثیر نانورس بر مقدار افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج، افزودن نانورس به قیر موجب افزایش مقدار افت وزنی قیر خالص می‌شود. در صورتی که افزایش درصد نانو رس پس از ۲٪ به مقادیر ۴ و ۷ درصد، با وجود کاهش ناچیز ولی تاثیر قابل توجهی بر مقدار افت وزنی قیر خالص ندارد. به عبارت دیگر، نانورس به تنهایی نتنها تاثیر مثبتی بر بهبود پیرشدگی قیر ندارد، بلکه مقدار افت وزنی قیر را نیز افزایش می‌دهد.

در شکل (۴-۱۲) تاثیر نانواکسیدروی بر مقدار افت وزنی قیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج، بطور کلی افزودن نانواکسیدروی به قیر موجب کاهش مقدار افت وزنی قیر خالص می‌شود. این در حالی است که قیر حاوی ۰/۷ و ۲/۱ درصد نانواکسیدروی با مقدار افت وزنی حدود ۰/۰۲ دارای بهترین عملکرد پیرشدگی می‌باشد.



شکل (۴-۱۱) تاثیر نانورس بر افت وزنی قیر



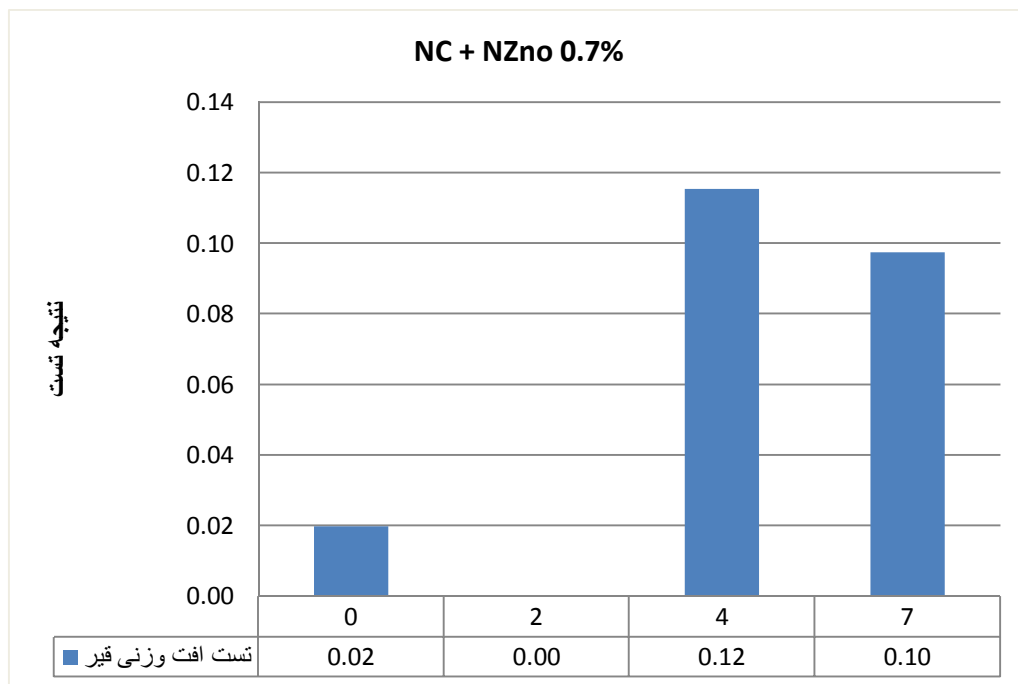
شکل (۴-۱۲) تاثیر نانوآکسیدروی بر افت وزنی قیر

در شکل (۴-۱۳) تاثیر نانورس را بر افت وزنی قیر اصلاح شده با ۰/۷٪ نانوآکسیدروی نشان داده شده

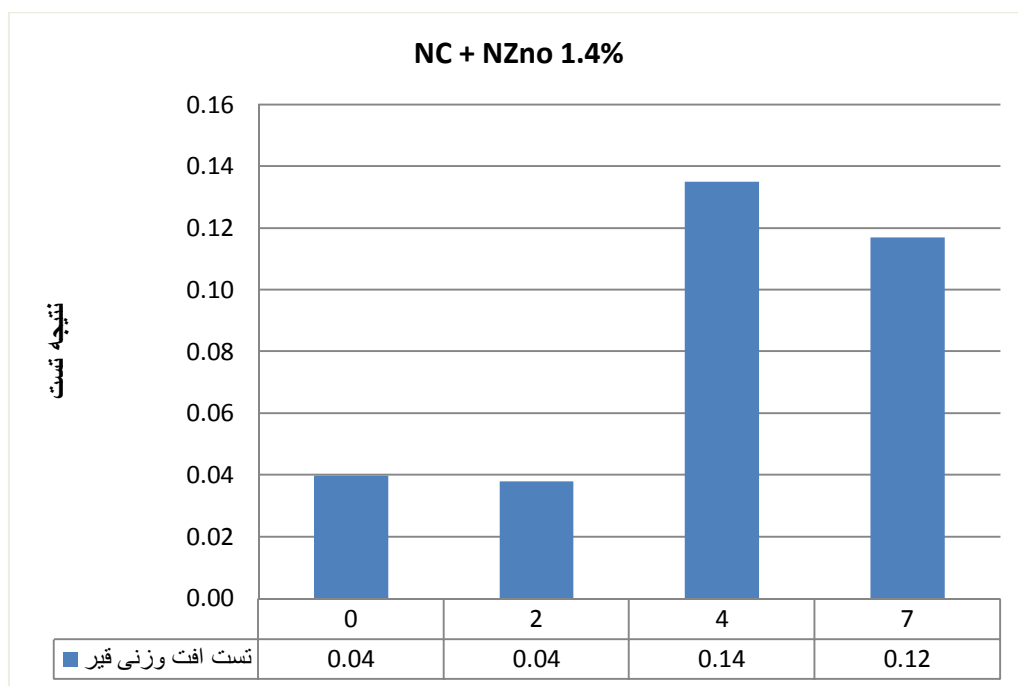
است. بر اساس نتایج افت وزنی قیراصلاح شده با ۰/۷٪ نانواکسیدروی، افزودن ۲٪ نانورس به قیر موجب کاهش افت وزنی قیر می‌شود. در صورتی که افزایش درصد نانورس پس از ۲٪ به مقادیر ۴ و ۷ درصد، باعث افزایش افت وزنی قیر نسبت به قیر حاوی نانواکسیدروی می‌شود. به عبارت دیگر، در نمونه قیر حاوی ۰/۷٪ نانواکسیدروی، ۲٪ نانورس بهترین عملکرد را در بهبود رفتار پیرشدگی ایفا می‌کند.

در شکل (۴-۱۴) تاثیر نانورس را بر افت وزنی قیر اصلاح شده با ۱/۴٪ نانواکسیدروی نشان داده شده است. بر اساس نتایج افت وزنی این قیر، افزودن ۲٪ نانورس به قیر تاثیر قابل توجهی بر افت وزنی قیر ندارد. در صورتی که افزایش درصد نانورس پس از ۲٪ به مقادیر ۴ و ۷ درصد، باعث افزایش افت وزنی قیر نسبت به قیر حاوی نانواکسیدروی می‌شود. در واقع، رفتار پیرشدگی این قیر براساس افت وزنی قیر، همانند قیر حاوی ۰/۷٪ نانواکسیدروی می‌باشد و ۲٪ نانورس بهترین عملکرد را ایفا می‌کند.

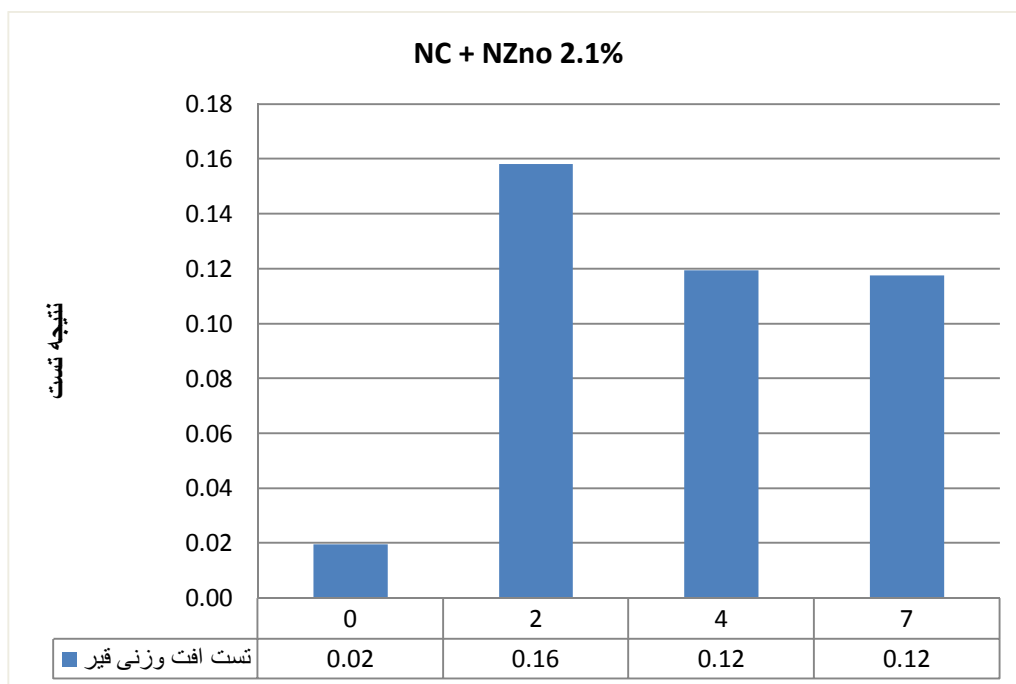
در شکل (۴-۱۵) تاثیر نانورس را بر افت وزنی قیر اصلاح شده با ۲/۱٪ نانواکسیدروی نشان داده شده است. بر اساس نتایج، افزودن نانورس به قیر به شکل قابل توجهی موجب افزایش افت وزنی قیر و در نتیجه اثر منفی بر پیرشدگی قیر دارد.



شکل (۴-۱۳) تاثیر نانورس بر افت وزنی قیر اصلاح شده با نانوآکسیدروی



شکل (۴-۱۴) تاثیر نانورس بر افت وزنی قیر اصلاح شده با نانوآکسیدروی



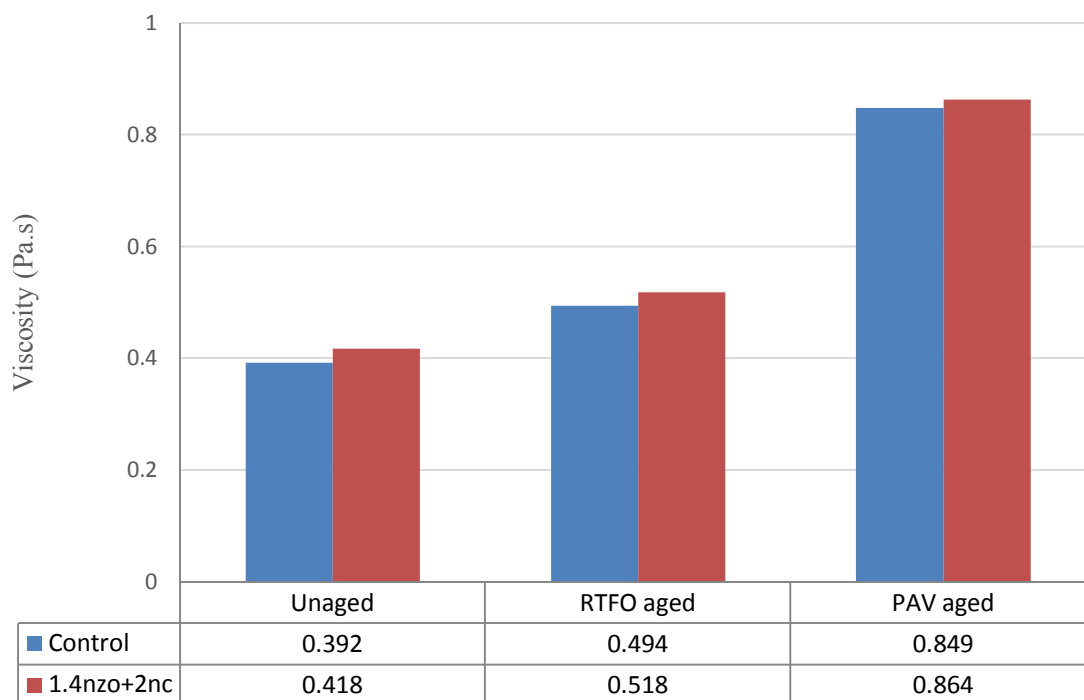
شکل (۴-۱۵) تاثیر نانورس بر افت وزنی قیر اصلاح شده با نانوآکسیدروی

۴-۳- انتخاب طرح نهایی قیر اصلاح شده با نانومواد

پس از تحلیل نتایج آزمایشات درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر قبل و بعد از آزمایش افت وزنی قیر و همچنین نتایج تاثیر نانو مواد بر میزان افت وزنی قیر در بخش قبل، در این قسمت تلاش شد طرح نهایی قیر اصلاح شده با نانو مواد جهت انجام آزمایش RV انتخاب شود. با توجه به نتایج، نمونه قیر حاوی ۱/۴٪ نانوآکسیدروی به همراه ۲٪ نانو رس به عنوان طرح نهایی انتخاب گردید. در ادامه این فصل، تاثیر نانو مواد بر رفتار ویسکوزیته قیر در سه حالت پیرنشده، پیرشده RTFO و پیرشده PAV مورد بررسی قرار داده خواهد شد.

۴-۴- تاثیر نانومواد بر رفتار ویسکوزیته قیر

جهت بررسی تاثیر نانومواد بر ویسکوزیته قیر، نتایج ویسکوزیته خالص و اصلاح شده در سه حالت پیرنشده، پیرشده RTFO و پیرشده PAV در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، قیر حاوی ۱/۴٪ نانو اکسیدروی به همراه ۲٪ نانو رس ($1.4\text{nzO}+2\text{nc}$) در حالت پیرنشده، دارای ویسکوزیته بالاتری نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. بطوری که افزودن نانومواد، موجب افزایش حدود ۷٪ ویسکوزیته قیر در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌شود. همچنین، افزودن نانو ذرات به قیر موجب افزایش ویسکوزیته در دو حالت پیرشده RTFO و PAV می‌شود. بطوری که افزودن ترکیب نانو اکسید روی و نانو رس به ترتیب موجب افزایش ۵ و ۱/۸ درصد ویسکوزیته در دو حالت پیرشده RTFO و PAV می‌شود.



شکل (۴-۱۶) تاثیر ترکیب نانورس و نانو اکسیدروی بر ویسکوزیته قیر

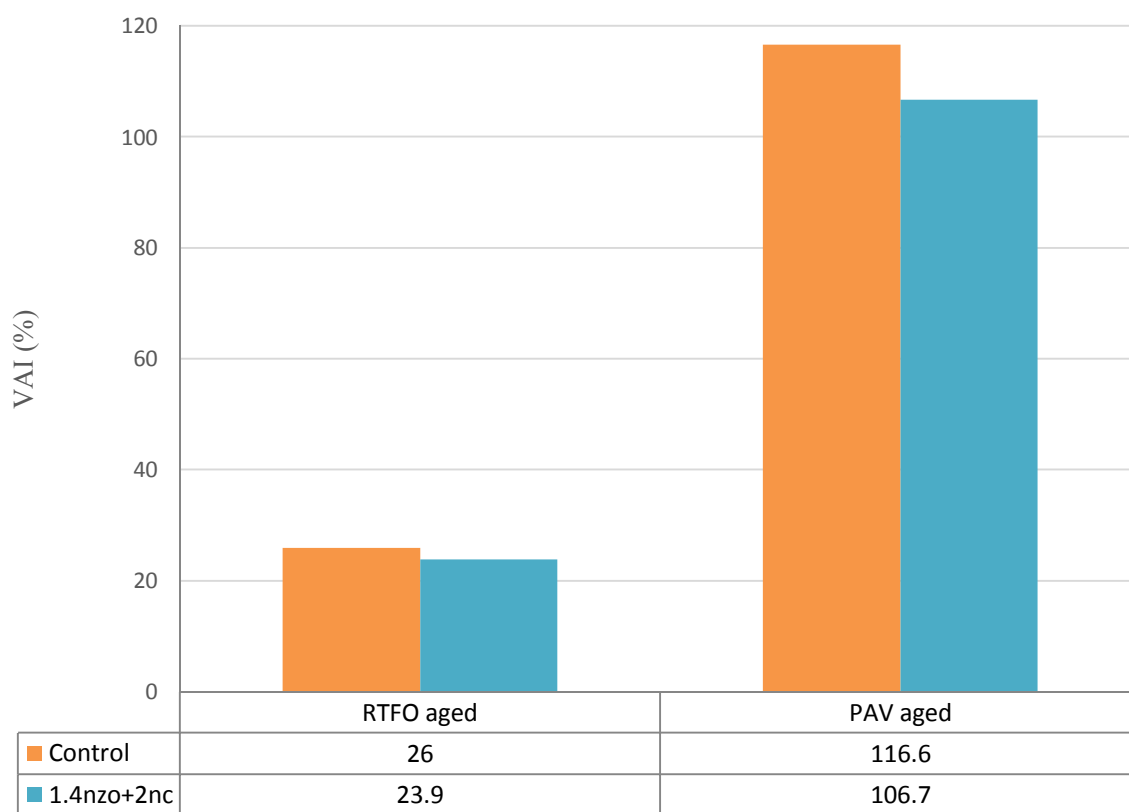
۴-۵- تاثیر نانومواد بر رفتار پیرشدگی قیر

برای اندازه گیری تاثیر پیرشدگی بر ویسکوزیته، شاخص پیرشدگی قیر بر اساس تغییر در ویسکوزیته در دو حالت قبل و بعد از پیرشدگی محاسبه شد. شاخص پیرشدگی ویسکوزیته^۱ (VAI) به عنوان نسبت تغییر ویسکوزیته به دلیل پیرشدگی تقسیم بر ویسکوزیته قیر پیرنشده محاسبه می‌شود [۴۹].

$$VAI = \frac{\text{Aged viscosity value} - \text{Unaged viscosity value}}{\text{Unaged viscosity value}} \times 100.$$

نتایج تاثیر نانوآکسید روی و نانورس بر رفتار پیرشدگی قیر با استفاده از شاخص VAI در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است. با توجه به نتایج، افزودن نانو مواد به قیر موجب کاهش شاخص پیرشدگی در حالت RTFO از مقدار ۲۶٪ به ۲۳/۹٪ شده است. به عبارت دیگر، قیر حاوی ۱/۴٪ نانوآکسیدروی و ۲٪ نانو رس دارای شاخص VAI کمتری نسبت به نمونه قیر خالص می‌باشد. در واقع، نانومواد موجب بهبود پیرشدگی قیر در حالت RTFO شده است. نتایج نمونه‌های PAV نیز نشان می‌دهد، افزودن نانو ذرات باعث کاهش شاخص پیرشدگی از عدد ۱۱۶ به ۱۰۶ شده است. در واقع، افزودن ترکیب نانومواد موجب کاهش ۱۰ واحد شاخص VAI و بهبود خاصیت آنتی اکسیدانی قیر شده است. به طور کلی با توجه به نتایج شاخص پیرشدگی ویسکوزیته، می‌توان نتیجه گرفت که قیراصلاح شده با نانوآکسید روی و نانورس دارای مقاومت پیرشدگی و آنتی‌اکسیدانی بهتری نسبت به قیر خالص می‌باشد.

¹ viscosity ageing index



شکل (۴-۱۷) تاثیر ترکیب نانورس و نانو اکسیدروی بر شاخص پیرشدگی قیر

فصل ۵:

جمع‌بندی و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

پس از بررسی و مرور جوانب مختلف تحقیق در فصل دوم و معرفی مواد و روش‌های بکار رفته در فصل سوم در فصل چهارم به بررسی و تحلیل نتایج آزمایشات پرداخته شد. در ادامه این فصل به ارائه جمع‌بندی نتایج و مشاهدات حاصل از تحقیق جاری پرداخته خواهد شد.

۵-۲- نتیجه‌گیری

اهداف اصلی پژوهش حاضر بر اساس بررسی تاثیر نانو مواد در قالب نانو اکسیدروی، نانو رس و ترکیب همزمان دو نانو بر رفتار پیرشدگی قیر طی آزمایشات نقطه نرمی، درجه نفوذ، افت وزنی قیر، ویسکوزیته قیر و شاخص پیرشدگی ویسکوزیته می‌باشد. براساس آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر بدست آمد:

- افزودن ۲٪ نانورس به قیر موجب کاهش درجه نفوذ قیر خالص می‌شود. در صورتی که افزایش درصد نانورس پس از ۲٪، باعث افزایش درجه نفوذ قیر خالص می‌شود. همچنین، نتایج درجه نفوذ بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان می‌دهد که افزودن نانورس موجب کاهش قابل توجه درجه نفوذ قیر خالص می‌شود. اما نکته قابل توجه، روند صعودی درجه نفوذ نسبت به قیر حاوی ۲٪ نانورس، پس از افزودن نانورس در درصد‌های بالاتر می‌باشد.
- تاثیر نانو رس بر کاهش درجه نفوذ قیر، در حالت پس از آزمایش افت وزنی قیر، نسبت به کاهش درجه نفوذ قیر قبل از آزمایش افت وزنی، بطور قابل توجهی بیشتر بوده است که بیانگر تاثیر نانورس بر عملکرد پیرشدگی قیر و در نهایت خاصیت آنتی اکسیدانی این نانوماده می‌باشد.

- افزودن نانو اکسیدروی به قیر موجب افزایش درجه نفوذ قیر خالص می‌شود. در صورتی که افزایش درصد نانو اکسیدروی پس از ۱/۴٪ به مقادیر ۲/۱٪ درصد، باعث کاهش درجه نفوذ قیر نسبت به قیر حاوی درصد های کمتر نانو اکسیدروی می‌شود. این در حالی است که، نتایج درجه نفوذ بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان می‌دهد که افزودن نانو اکسیدروی موجب کاهش قابل توجه درجه نفوذ قیر خالص می‌شود.
- نتایج نقطه نرمی بعد از آزمایش افت وزنی قیر نشان می‌دهد که افزودن نانورس موجب افزایش نقطه نرمی قیر می‌شود. این افزایش بطوری است که، با افزایش درصد نانورس، نقطه نرمی قیر نیز افزایش می‌یابد.
- افزودن نانو اکسیدروی تا ۱/۴٪ در دو حالت قبل و بعد از پیرشدگی موجب افزایش نقطه نرمی و در نتیجه بهبود عملکرد قیر در دمای بالا می‌شود. این در حالی است که افزایش مقدار نانو اکسیدروی بعد از ۱/۴٪ موجب کاهش نقطه نرمی قیر می‌شود. به عبارت دیگر، درصد بهینه برای اصلاح قیر با نانو اکسیدروی قبل و بعد از پیرشدگی مقدار ۱/۴٪ می‌باشد و بعد از این درصد، نانو اکسیدروی موجب کاهش نقطه نرمی قیر و در نتیجه تاثیر منفی بر عملکرد دمای بالای قیر می‌شود.
- افزایش درصد نانورس پس از ۲٪ به مقادیر ۴ و ۷ درصد، با وجود کاهش ناچیز ولی تاثیر قابل- توجهی بر مقدار افت وزنی قیر خالص ندارد. به عبارت دیگر، نانورس به تنهایی نتنها تاثیر مثبتی بر بهبود پیرشدگی قیر ندارد، بلکه مقدار افت وزنی قیر را نیز افزایش می‌دهد.
- قیر حاوی ۱/۴٪ نانو اکسیدروی به همراه ۲٪ نانورس (1.4nzo+2nc) در حالت پیرنشده، دارای ویسکوزیته بالاتری نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین، افزودن نانو ذرات به قیر موجب افزایش ویسکوزیته در دو حالت پیرشده RTFO و PAV می‌شود..

- قیر حاوی ۱/۴٪ نانو اکسیدروی و ۲٪ نانو رس دارای شاخص VAI کمتری نسبت به نمونه قیر خالص می‌باشد. در واقع، نانومواد موجب بهبود پیرشدگی قیر در حالت RTFO شده است. نتایج نمونه‌های PAV نیز نشان می‌دهد، افزودن نانو ذرات باعث کاهش شاخص پیرشدگی شده است.
- به طور کلی با توجه به نتایج شاخص پیرشدگی و بسکوزیته، می‌توان نتیجه گرفت که قیر اصلاح شده با نانو اکسید روی و نانورس دارای مقاومت پیرشدگی و آنتی‌اکسیدانی بهتری نسبت به قیر خالص می‌باشد.

۳-۵- پیشنهادات

- بررسی رفتار پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانورس و نانو اکسیدروی
- پیشنهاد می‌شود تاثیر نانو مواد بر عملکرد پیرشدگی سایر قیرها از جمله ۸۵-۱۰۰ و ۴۰-۵۰ مورد سنجش قرار داده شود.
- پیشنهاد می‌گردد آزمایش‌های عملکردی و تکمیلی سوپرپیو به منظور سنجش پیرشدگی قیر تحت تاثیر نانومواد ترکیبی انجام شود.

منابع و مراجع:

- 1- Poole Jr, C.P. and F.J. Owens, Introduction to nanotechnology. 2003: John Wiley & Sons.
- 2- Wilson, M., et al., Nanotechnology: basic science and emerging technologies. 2002: CRC Press.
- 3- Mansoori, G.A., Advances in atomic & molecular nanotechnology. United Nations Tech Monitor; UN-APCTT Tech Monitor, 2002; Special Issue: 53, 2002. 59.
- 4- Siegel, R.W. and E. Hu, Nanostructure Science and Technology: R & D Status and Trends in Nanoparticles, Nanostructured Materials and Nanodevices. 1999: Springer Science & Business Media.
۵. ن س.ا. سادات نوری، و م. خدایاری "مقدمه‌ای بر نانو تکنولوژی"، انتشارات نورپردازان، تهران، ۱۳۸۴.
- 6- Oberlin, A., M. Endo, and T. Koyama, Filamentous growth of carbon through benzene decomposition. Journal of crystal growth, 1976. 32(3): p. 335-349.
- 7- Yang, P., The chemistry of nanostructured materials. 2003: World Scientific.
- 8- Hirsch, A. and M. Brettreich, Fullerenes: chemistry and reactions. 2006: John Wiley & Sons.
- 9- Saito, R., et al., Electronic structure of graphene tubules based on C 60. Physical Review B, 1992. 46(3): p. 1804.
- 10- Doebling, S.W., et al., Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. 1996, Los Alamos National Lab., NM (United States).
- 11- Song, X.H., L.X. Zheng, and Z.Q. Li. Temperature compensation in deformation testing for smart concrete structures. in Key Engineering Materials. 2006. Trans Tech Publ.
- 12- Popov, V.N., Carbon nanotubes: properties and application. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2004. 43(3): p. 61-102.

- 13- Iijima, S. and T. Ichihashi, Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. 1993.
- 14- Bethune, D., et al., Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls. 1993.
- 15- Zhu, J., B. Birgisson, and N. Kringos, Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 2014. 54: p. 18-38.
۱۶. احمد گلی، " تحلیل خصوصیات قیر ومخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با استفاده از نانولوله های کربنی " پایان نامه دکتری، دانشگاه علم صنعت ایران، ۱۳۹۲
۱۷. سرایی پور - محمد، "آسفالت"، انتشارات دهخدا، چاپ چهارم، ۱۳۷۷
- 18- Yildirim, Y., Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 2007. 21(1): p. 66-72.
- 19- Brule, B., Polymer-modified asphalt cements used in the road construction industry: basic principles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1996(1535): p. 48-53.
۲۰. فتح‌الهی - سهیلا سادات، "آشنایی با قیر، انواع آن، فرآیند تولید و ساختار شیمیایی آن"، دومین دوره آموزشی قیر و قیرهای اصلاح‌شده، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، ۱۳۸۳.
۲۱. کاوسی، م.ر.ص.ع.ا.ی.و.ا. بهبود خواص قیر با مواد پلیمری. *مجله علوم و تکنولوژی پلیمر*. ۱۳۸۱: p. ص ۱۰۳.
- 22- Read, J., Whiteoak, D., *The Shell bitumen handbook*. fifth ed. 2003.
- 23- American Society for Testing and Materials, *Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*, in ASTM D8-13b. 2013: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 24- McNally, T., *Polymer modified bitumen: properties and characterisation*. 2011: Elsevier.
- 25- Nicholls, C., *Asphalt Surfacing—A Guide to Asphalt Surfacing and Treatments for the Surface Course of Road Pavements*. E and FN Spon. 1998, Routledge Publishers.
۲۶. ابطحی، س.م. س.ح. دیباجی، قیر و افزودنی های آن. ۱۳۸۸: انتشارات دانش پژوهان.

- 27- Yen, T.F. and G.V. Chilingarian, *Asphaltenes and asphalts*, 2. 2000: Elsevier.
۲۸. گلستانی، ب.، بررسی عملی تاثیر افزونه های پلیمری شاخص بر خواص قیرهای کشور با توجه به شرایط آب و هوایی ایران. ۱۳۹۰، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
- 29- Huber, G.A., *Methods to achieve rut-resistant durable pavements*. Vol. 274. 1999: Transportation Research Board.
- 30- ASTM-D6816., *Standard test method for determining low-temperature performance grade (PG) of asphalt binders*. American Society for Testing and Materials & Design, 2002.
- 31- Lan, T., P.D. Kaviratna, and T.J. Pinnavaia, Mechanism of clay tactoid exfoliation in epoxy-clay nanocomposites. *Chemistry of Materials*, 1995. 7(11): p. 2144-2150.
- 32- Montepara, A. and F. Giuliani. Variation in chemical and rheological properties of betumen due to aging action. in International Conference “Chemistry and Ecology of composite materials based on betumen emulsions and modified betumen”, Minsk, Belarus. 1999. Citeseer.
- 33- Mahrez, A. and M. Rehan, Rheological Evaluation of Aging Properties of Rubber Crumb Modified Bitumen. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2003. 5: p. 82۸۳۳.-۰
- 34- Yamaguchi, K., I. Sasaki, and S. Meiarashi, Photodegradation test of asphalt binder using pressed thin film samples. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2005. 32(6): p. 1166-1169.
- 35- Recasens, R., et al., Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2005(1901): p. 10-17.
- 36- Garcia-Morales, M., et al., Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen. *Fuel*, 2006. 85(7): p. 936-9۴۳.
- 37- Durrieu, F., F. Farcas, and V. Mouillet, The influence of UV aging of a styrene/butadiene/styrene modified bitumen: comparison between laboratory and on site aging. *Fuel*, 2007. 86(10): p. 1446-1451.

- 38- Prajapati Harshad, C. and P. Gundaliya, Review on Effect of Aging on Paving Grade Bitumen using Different Filler Material. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2014. 4.
- 39- Zhang, J., et al., Evaluation of the improved properties of SBR/weathered coal modified bitumen containing carbon black. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(7): p. 2678-2687.
- 40- Wu, S., et al., Laboratory study on ultraviolet radiation aging of bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010. 22(8): p. 767-772.
- 41- Jahromi, S.G., B. Andalibizade, and S. Vossough, Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2010. 35(1B): p. 89-103.
- 42- You, Z., et al., Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 2011. 25(2): p. 1072-1078.
- 43- Pan, T.Y., Sun, L. and Q. Yu, An atomistic-based chemophysical environment for evaluating asphalt oxidation and antioxidants. *Journal of Molecular Modeling*, 2012. 18.
- 44- Iwański, M. and G. Mazurek, Hydrated lime as the anti-aging bitumen agent. *Procedia Engineering*, 2013. 57: p. 424-432.
- 45- Fang, C., et al., Aging properties and mechanism of the modified asphalt by packaging waste polyethylene and waste rubber powder. *Polymers for Advanced Technologies*, 2013. 24(1): p. 51-55.
- 46- Gu, F. and Y. Zhao, Thermal oxidative aging characterization of SBS modified asphalt. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2013. 28(1): p. 88-91.
- 47- Feng, Z., J. Yu ,and D. Kuang, The physical properties and photostability of bitumen with different ultraviolet absorbers. *Petroleum Science and Technology*, 2013. 31(2): p. 113-120.

- 48- Wu, S., Q. Ye, and N. Li, Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers. *Construction and Building Materials*, 2008. 22(10): p. 2111-2115.
- 49- Zhang, H., J. Yu, and S. Wu, Effect of montmorillonite organic modification on ultraviolet aging properties of SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 2012. 27(1): p. 553-559.

۵۰. شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان

Abstract

Bitumen is the main element of asphalt mixture and viscoelastic material and its mechanical response depends on temperature and loading time. The asphalt pavement should not be too hard to operate during its design period. Researchers in this field believe that the most important factor of these changes is the gradual hardening phenomenon that causes the appearance of various types of injuries in the pavement. Various processes are involved in the gradual change or hardening of bitumen, including oxidation, photochemical reactions, substrate of volatile matter and bitumen, polymerisation, carbonization and absorption of oils in bitumen by aggregates. In this research, the effect of nanozinkoxide and nanoclay and the combination of two materials on the behavior of bitumen aging in softening point, penetration, loosen heating, bitumen viscosity and viscosity aging index are studied. The results of this study showed that the addition of nanozinkoxide to 1.4% in both the pre and post aging conditions increased the softening point and thus improved bitumen performance at high temperatures. The performance of modified bitumen with the combination of nanomaterials showed that bitumen containing 1.4% nanozinkoxide plus 2% nanoclay in an aged state had a higher viscosity than the Original Bitumen. Also, the addition of nanoparticles to bitumen increases the viscosity in the two aging states of RTFO and PAV. In addition, bitum containing 1.4% nanozinkoxide and 2% nanoclay have a lower VAI index than pure bitumen. In fact, nanomaterials have reduced bitumen aging in RTFO mode. The results of PAV samples also show that the addition of nanoparticles decreases the aging index.

Keywords: bitumen, bitumen aging, nanoclay, nanozinkoxide



Faculty of Civil Engineering
M.Sc. Thesis in Road and Transport Engineering

Investigation and Comparison of Nanoclay and
Nanozinkoxide Effects on Asphalt Aging

By: Omid Farahini

Supervisor:

Dr. Hossein Ghasemzadeh Tehrani

September 2017