

بررسی آزمایشگاهی اثرات نانوکلوذیت بر خصوصیات فیزیکی مخلوط های آسفالتی

رامین بیات^{۱*}، سیامک طلعت اهری^۲

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تبریز

چکیده

در سال های اخیر نانوکلوذیت به دلیل ویژگی های منحصر به فرد توانسته در اکثر علوم ورود پیدا کرده و تاثیرات شگرف خود را بر جای بگذارد. از این ماده در مهندسی روسازی جهت بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی مخلوط های آسفالتی استفاده می شود. با توجه به نوع دانه بندی، در طرح اختلاط آسفالت، نانوکلوذیت جایگزین فیلر که ریزدانه مخلوط است می شود و می بایست به قیر افزوده شده، مخلوط گردد و سپس مابقی مصالح به آن افزوده شود. استحکام و روانی مارشال تابع نوع، مقدار و مشخصات فیلر است. در این پژوهش با افزودن درصد های مختلف نانوکلوذیت به مخلوط آسفالتی ملاحظه شد که این نانو افزودنی موجب افزایش مقاومت مارشال و حجم فضای خالی مخلوط آسفالتی و کاهش روانی، حجم فضای خالی مصالح سنگی و وزن مخصوص می گردد. نتایج حاکی از آن است که نانوکلوذیت نقش پرکنندگی بالایی داشته، چسبندگی بین مصالح و قیر را بهبود بخشیده، افزایش حجم قیر را در پی داشته و نهایتاً موجب افزایش ضخامت غشای قیری در اطراف سنگدانه ها می گردد.

کلمات کلیدی: نانوکلوذیت، آسفالت، مقاومت، اختلاط، مارشال.

ایمیل نویسنده مسئول: ramin.bayat67@gmail.com

۱- مقدمه

لایه ای و پراکنشی که ساختار لایه ای بیشترین تقویت را در بستر پلیمری ایجاد می کند و همچنین برای بررسی نوع ساختار نانورس می توان از آنالیز XRD استفاده نمود [۹]. Chong, K.P. (۲۰۰۹) در مقاله خود بیان می کند که استفاده از نانورس در مخلوط آسفالتی باعث افزایش عمر روسازی های آسفالتی می گردد [۱۳]. Steyn, W.J.M و همکاران (۲۰۰۹) در مقاله ای تحت عنوان عملکرد های نانوتکنولوژی در مهندسی روسازی بر افزایش مقاومت مخلوط های آسفالتی با استفاده از نانورس دلالت می کنند. Ghile, D.B [۱۴] (۲۰۰۶) در پایان نامه کارشناسی ارشد خود با عنوان تاثیرات نانورس بر خواص رئولوژی قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی اظهار داشت که مخلوط آسفالتی با افزایش نانورس تا سه درصد، به نسبت مخلوط بدون نانورس، استحکام بالاتری دارد. [۱۱] جهرمی (۱۳۹۰) در دو تحقیق مختلف به این نتیجه رسید که کاربرد نانورس در قیر، درصد قیر بهینه را اندکی افزایش می دهد و همچنین کاربرد نانورس حساسیت قیر نسبت به حرارت را کاهش می دهد. ضمناً افزودن این نانوافزودنی، مدول برجهنگی قیر را افزایش می دهد. این افزایش در دمای پایین مشهودتر است که می تواند ناشی از پخش خوب نانو رس ها در قیر باشد. همچنین این اصلاح کننده توانایی بهبود رفتار خستگی (مخصوصاً در دمای پایین) را ندارد [۲۰ و ۱۰]. Ghasemnia و همکاران (۲۰۱۲) در مقاله خود عنوان نمودند که آسفالت اصلاح شده با نانوسیلیس دارای سختی بیشتری نسبت به نمونه اصلاح نشده می باشد، به طوری که افزودن ۲٪ نانوسیلیس بیشترین تاثیر را در بهبود مشخصات فیزیکی مخلوط آسفالتی دارد. [۱۵] خدایی و همکاران در نتایج مقاله خود بیان داشتند که افزودن نانورس به قیر، سفتی، ویسکوزیته (چسبندگی) و مقاومت برشی قیر را افزایش می دهد که این امر نیز به کاهش

مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر خستگی یکی از مهم ترین خصوصیات مصالح آسفالتی می باشد که چه در طراحی مخلوط های آسفالتی و چه در طراحی روسازی های انعطاف پذیر از اهمیت ویژه ای برخوردار است. زمانی که یک روسازی انعطاف پذیر تحت تاثیر بارهای تکراری ناشی از وسایل نقلیه قرار می گیرد، لایه روسازی به صورت یک تیر خمشی عمل نموده و در زیر بار چرخ و در سطح روسازی تنش های فشاری و در پایین ترین لایه آسفالتی تنش ها و یا کرنش های کششی به وجود می آید [۲]. خصوصیات قیر و مخلوط های قیری می تواند با مشارکت افزودنی های متنوع از قبیل مشتقات نفتی از نوع پلیمرهای گوناگون و تکنولوژی نانو بهبود پیدا کند. مفهوم استفاده از نانوتکنولوژی برای بهبود رفتار مخلوط های آسفالتی یکی از زمینه های نوظهور در سال های اخیر است. امروزه استفاده از نانوکلوذیت در مخلوط های آسفالتی تاثیرات بسزایی در خواص مکانیکی و فیزیکی آن داشته است [۶]. در این مقاله به بررسی طریقه اختلاط نانوکلوذیت با قیر و مصالح سنگی و تاثیرات درصد های مختلف آن در مخلوط آسفالتی پرداخته می شود.

۲- پیشینه تحقیقات

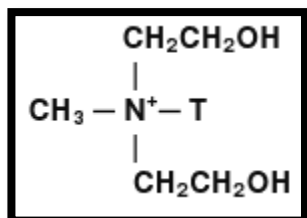
در رابطه با استفاده از تکنولوژی نانو در روسازی آسفالتی در خارج و داخل کشور تحقیقاتی صورت گرفته است که در ادامه به آن ها پرداخته می شود. خدادادی (۱۳۸۶) در تحقیقی بیان می کند که کاربرد نانورس در کارایی دراز مدت آسفالت بسیار موثر است و افزایش تنها ۲ درصد نانورس به قیر سبب افزایش تعداد سیکل های طی شده برای رسیدن به مراحل دوم و سوم شکست خمشی می گردد [۳]. همچنین جهرمی و همکاران (۲۰۰۹) وجود دو نوع ساختار ترکیب نانورس در قیر و پلیمر را بررسی کردند. ساختار

مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانوکلوذیت‌ها طبق جدول (۱) می‌باشد. لازم به ذکر است که نانوکلوذیت استفاده شده در این پژوهش از شرکت نانوسانی نماینده محصولات شرکت Rockwood Additive تهیه شده است [۸].

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانوکلوذیت [۸]

نوع کانی	مونت موریلونیت
اصلاح‌کننده ارگانیک	MT2EOH
درصد رطوبت	کمتر از ۲٪
افت وزنی در برابر اشتعال	حدود ۳۰٪
چگالی	۵-۷ (gr/cm ³)
اندازه ذرات	۱-۲ nm
مساحت سطح ویژه	۵۰۰-۷۵۰ m ² /gr
فاصله خالی بین ذرات	۶۰ Å
PH	۷/۳-۷/۶
مقدار هدایت الکتریکی	۲۵ MV
ضریب تبادل یونی	۴۸ (meg/100gr)

در شکل (۲) آرایش شیمیایی نانوکلوذیت دیده می‌شود.



شکل ۲. آرایش شیمیایی نانوکلوذیت [۸]

۲-۳- سنگدانه ها و قیر

سنگدانه‌ها از معادن سنگ کوهی یا قله سنگ‌های درشت رودخانه‌ای تهیه و طی دو مرحله جداگانه در سنگ‌شکن‌های فکی و سپس دوار (کوبیت) شکسته شدند و پس از شکسته شدن، دانه-بندی شده (بازرند کردن) و در قسمت‌های مجزا به صورت مصالح درشت‌دانه، میان‌دانه و ریزدانه انبار گردیدند. جهت اختلاط این پژوهش از مصالح سنگی کارخانه آسفالت شرکت جهاد نصر- کرمانشاه واقع در کمربندی کرمانشاه، اسلام آباد غرب با طرح اختلاط طبق جدول (۱) نمونه‌برداری انجام شد و دانه‌بندی آن بر طبق شکل (۳) می‌باشد.

جدول ۲. نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی مخلوط آسفالتی

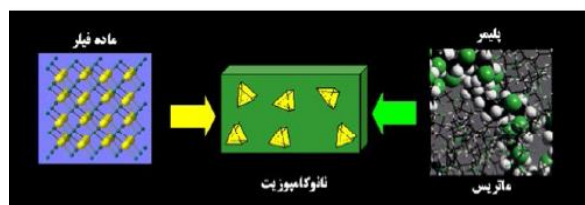
مشخصات مصالح سنگی	درصد اختلاط مصالح سنگی
شن ۲۵ - ۴/۷۵ میلیمتر	صفر
شن ۱۹ - ۴/۷۵ میلیمتر	۷
شن ۱۲ - ۰ میلیمتر	۳۱
ماسه ۶ - ۰ میلیمتر	۵۲
فیلر	۱۰

روانی مخلوط آسفالتی منجر می‌شود [۱۰]. شکرچی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷) در پژوهشی به نتیجه رسیدند که معمولاً دو نوع نانورس به نام‌های کلوذیت و نانوفیل در اصلاح قیر استفاده می‌شود که در این بین کلوذیت تأثیرات بهتری دارد و این یعنی در اصلاح قیر باید به نوع نانورس هم توجه نمود [۴]. تن‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی اعلام کردند در محیط‌های با درجه حرارت بالا عملکرد آسفالت بسیار پیچیده بوده و مقدار مدول دینامیکی آسفالت کمتر خواهد شد. آن‌ها با استفاده از فناوری نانو در آسفالت از طریق یک ماده با ساختار پلیمری، قیر اصلاح شده پلیمری تشکیل دادند که نقش مهمی در اصلاح مدول دینامیکی آسفالت به همراه دارد [۱]. Zhanping You و همکاران (۲۰۰۳) در پژوهشی با عنوان آسفالت اصلاح شده با نانورس که به بحث درمورد نحوه آماده‌سازی و مشخصات آن اشاره دارد، بیان نمودند که مقاومت آسفالت حاوی نانورس در برابر شیارشدگی بیشتر است و خصوصیات قیر را بهتر از SBS اصلاح می‌کند [۱۲].

۳- مواد و مصالح مصرفی

۱-۳ نانوکلوذیت

نانورس‌ها شامل صفحات کوچک و نامنظم رسی هستند که در حدود ۱ نانومتر ضخامت و کمتر از ۱ میکرومتر طول دارند. در شرایط مناسب فضاهای خالی بین صفحه‌های رس می‌تواند به وسیله مونومرها، اولیگومرها (زنجیره‌های کوتاه پلیمری) یا پلیمرها اشغال شود. 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 صورت پراکنشی یا لایه‌ای خواهد بود. برای تشخیص نوع ساختار نانورس در قیر از تکنیک پراش اشعه ایکس، استفاده می‌شود. ذرات فیلر با شبکه بلوری منظم در یک پلیمر با ساختار نامنظم می‌توانند یک نانوکامپوزیت را بسازند (شکل ۱). این مواد به عنوان افزودنی برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها و بهبود قابل توجه خواص مواد پلیمری به کار می‌روند و دارای انواع مختلفی به شرح زیر می‌باشند: مونت‌موریلونیت، بنتونیت، کائولینیت، هالوسیت، هکتوریت؛ که معمول‌ترین نوع آن‌ها مونت‌موریلونیت‌ها می‌باشند [۵] و [۶].



شکل ۱. نحوه تشکیل نانوکامپوزیت [۳]

نانوکلوذیت‌ها مونت‌موریلونیت‌های طبیعی هستند که توسط نمک آمونیوم چهارعضوی اصلاح شده‌اند و به عنوان یک افزودنی در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی بسیار کارا می‌باشد. اصلاح‌کننده این ماده MT2EOH بوده که متشکل از متیل، پیه، هیدروکسیل و آمونیوم چهارعضوی می‌باشد.

۳-۳- اختلاط نانوکلویت و مخلوط آسفالتی

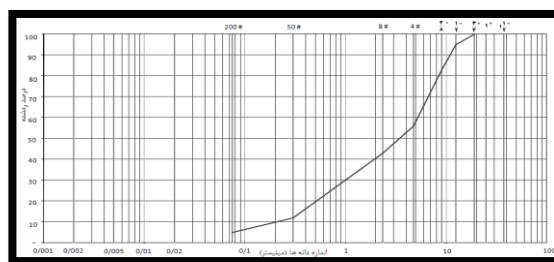
در طرح اختلاط آسفالت، شن درشت‌دانه و ریزدانه، ماسه، فیلر و قیر با درصدهای مشخص مخلوط می‌گردند. با توجه به اینکه فیلر ریزدانه‌ترین بخش مخلوط است، نانوکلویت به نسبت درصد وزنی مورد استفاده، جایگزین آن بخش از فیلر می‌گردد. برای اختلاط نانوکلویت و قیر، ابتدا بایستی قیر را تا حدی ذوب نمود که کندروانی کینماتیک آن معادل 170 ± 2 سانتی‌استوکس باشد و در حالی که مخلوط‌کن در حال همزدن آن می‌باشد به مرور نانورس را به آن افزود (عموماً توسط نمک‌پاش) تا کامل و به صورت همگن مخلوط گردند و نیز از توده شدن نانوکلویت در قیر جلوگیری شود؛ در زمان اختلاط به دلیل بالا بودن دما، نفوذ و تماس حباب‌های هوا با قیر اجتناب‌ناپذیر بوده و اکسیداسون تسریع می‌گردد. لذا پارامترهای متعددی همچون زمان، سرعت و دمای اختلاط برای کل نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد تا پدیده پیرشدگی نسبتاً یکسان باشد. پس از اختلاط قیر و نانوکلویت می‌بایست به مخلوط حاصله مابقی مصالح را که در گرمخانه، گرم شده‌اند را اضافه کرده و مخلوط نمود تا مادامی که قیر تمامی فضای روی سنگدانه‌ها را پوشش دهد؛ لازم به ذکر است که در حین اختلاط بایستی مراقب سوخته شدن قیر هم بود.

۴-۳- ساخت نمونه های آسفالتی

جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی سه نمونه برای هر درصد نانوکلویت تهیه می‌گردد؛ با توجه به اینکه طبق نشریه ۲۳۴ نسبت فیلر ناپیستی کمتر از ۱۰٪ وزنی مخلوط باشد، بنابراین در این پژوهش از درصدهای ۱ الی ۵ درصد نانوکلویت جهت اختلاط استفاده شده است. روش ساخت و تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی جهت اختلاط آسفالت بر اساس روش استاندارد D1559 - ASTM انجام می‌گردد و در این روش نمونه‌های مخلوط آسفالتی متراکم شده در استوانه‌ای با ارتفاع حدود ۶۳/۵ و قطر ۱۰۱/۶ میلیمتر (۴ اینچ) تهیه می‌گردد. پس از عمل اختلاط که با دستگاه مخلوط کن و یا بطور دستی انجام می‌گردد و پس از اطمینان از پوشش کامل مصالح سنگی با قیر، نمونه مخلوط آسفالتی به داخل قالب فلزی مربوطه که دارای قطر ۱۰۱/۶ میلیمتر (۴ اینچ) و ارتفاع حدود ۷۵ میلیمتر است، ریخته و متراکم می‌گردد. دمای تراکم، معادل دمایی است که در آن دما، کندروانی قیر برابر 280 ± 30 سانتی‌استوکس گردد و عمل تراکم با چکش فلزی که دارای سطح مقطع به شکل دایره (به قطر ۹۸/۴ میلیمتر) و به وزن ۴/۵ کیلوگرم که از ارتفاع مشخص ۴۵۷ میلیمتری (۱۸ اینچ) بطور آزاد سقوط می‌کند، انجام می‌گردد. تعداد ضربات تراکم ۷۵ ضربه برای هر طرف نمونه انتخاب می‌شود [۷].

۵-۳- تعیین پارامترهای مخلوط آسفالتی

پس از تعیین وزن مخصوص مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده نمونه‌ها به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در آب 60 ± 1 درجه سانتی گراد قرار گرفته و بعد از آن بلافاصله مقدار استحکام و روانی آن به وسیله دستگاه جک مارشال بر اساس روش استاندارد D1559 - ASTM تعیین می‌شود. در طرح اختلاط مخلوط های آسفالتی به

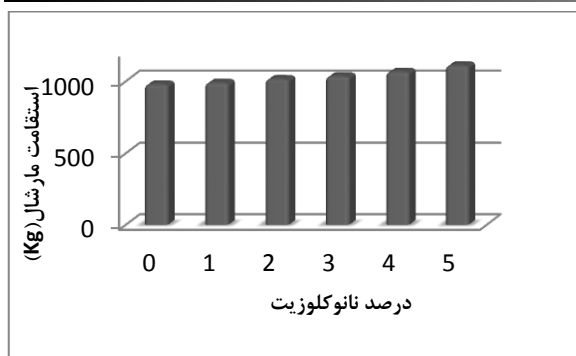


شکل ۳. نمودار دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی

قیر مصرفی از در این پژوهش از نوع ۶۰/۷۰ بوده که دمای اختلاط آن برای دانه‌بندی مورد استفاده در محدوده ۱۵۰ - ۱۴۴ درجه سانتی‌گراد و دمای تراکم در محدوده ۱۳۸ - ۱۳۴ درجه سانتی‌گراد بوده است. مشخصات قیرمصرفی در این پژوهش طبق جدول (۳) می‌باشد. لازم به ذکر است که در این پژوهش از درصد قیر بهینه ۵٪ استفاده شده است که به روش مارشال بدست آمده است.

جدول ۳. مشخصات قیر مصرفی

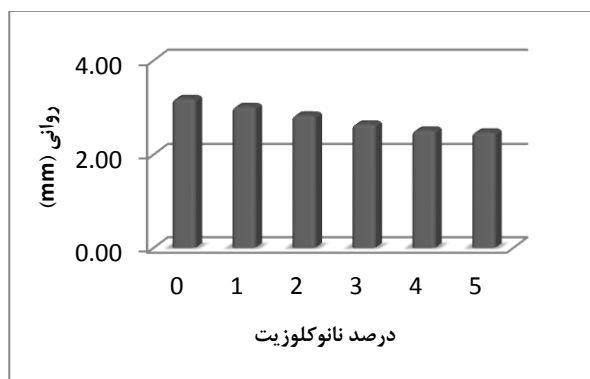
آزمایشات قیر های خالص	نتایج ASTM	مشخصات قیرهای خالص ۶۰-۷۰ طبق جدول ۱-۱۴ نشریه ۱۰۱	
		حداقل	حداکثر
وزن مخصوص در ۲۵C	۱/۰۱۶	-	-
درجه نفوذ در ۲۵C (۱۰۰ گرم - ۵ ثانیه)	۶۹	۶۰	۷۰
نقطه نرمی (ساجمه - حلقه) برحسب سانتیگراد	۴۹/۱	۴۹	۵۶
مقدار کشش در ۲۵ برحسب سانتیمتر	بیشتر از ۱۰۰	۱۰۰	-
حلالیت در تری کاروباتیلن	۹۹/۵۳	۹۹	-
درجه اشتعال (روپاز - کلوند) سانتیگراد	۳۱۰	۲۳۲	-
ویسکوزیته کینماتیک در ۱۲۰C (سانتی استکس)	۶۵۴	-	-
ویسکوزیته کینماتیک در ۱۳۵C (سانتی استکس)	۳۳۱	-	-
ویسکوزیته کینماتیک در ۱۶۰C (سانتی استکس)	۱۲۲	-	-
افت حرارتی درصد	۰/۰۵	-	۰/۸
درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی	۴۰	-	-
نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه	۵۷/۹۷	۵۴	-
مقدار کشش قیر بعد از آزمایش در ۲۵C	بیشتر از ۱۰۰	۵۰	-
حساسیت حرارتی قیر : PI - (برحسب درجه نفوذ در ۲۵C و نقطه نرمی قیر) PVN - (برحسب درجه نفوذ در ۲۵C و غلظت برحسب	-۰/۶۵ -۰/۹۱	-	-



شکل ۴. اثر درصدهای مختلف نانوکلوژیت بر مقاومت مارشال

۲-۴ روانی مارشال

روانی مارشال نیز تابع نوع، مقدار و مشخصات فیلر است. با توجه به اینکه نانوکلوژیت چسبندگی بین فضای قیر و سنگدانه‌ها را بهبود می‌بخشد، طبیعتاً روانی کاهش خواهد یافت. با بررسی نمودار مربوطه ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد نانوکلوژیت، روانی نمونه‌ها کاهش می‌یابد به طوری نمونه حاوی بالاترین درصد نانوکلوژیت نسبت به نمونه غیرمسلح حدود ۱/۳٪ روانی کمتری دارد (شکل ۵).



شکل ۵. اثر درصدهای مختلف نانوکلوژیت بر روانی

۳-۴ حجم فضای خالی مصالح سنگی (VMA)

در طرح مخلوط آسفالتی، حداقل حجم منافذ در سنگدانه‌ها تابع بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها است که با ریزتر شدن سنگدانه‌ها، افزایش می‌یابد. با توجه به این موضوع که وجود نانورس موجب افزایش ضخامت غشای قیری در اطراف سنگدانه‌ها می‌گردد، درصد فضای خالی مصالح سنگی حاوی نانوکلوژیت کاهش می‌یابد به نحوی که نهایتاً حدود ۱/۱٪ فضای خالی مصالح سنگی کاهش می‌یابد (شکل ۶).

۴- تحلیل نتایج

۱-۴ مقاومت مارشال

استحکام و مقاومت مارشال تابع نوع، مقدار و مشخصات فیلر است. نانوکلوژیت فضای بین ذرات درشت‌دانه را پر کرده و سبب افزایش مقاومت، تراکم و نهایتاً باربری می‌گردد. این نانو افزودنی ضربه پذیری را افزایش داده و تغییر شکل نسبی را نیز کاهش می‌دهد.

با توجه به نقش پرکنندگی بالای نانوکلوژیت و نتایج حاصل از آزمایشات و نمودارهای مربوطه می‌توان اظهار داشت که مقاومت مارشال با افزایش درصد نانوکلوژیت افزایش می‌یابد، به نحوی که نمونه حاوی ۵٪ نانوکلوژیت نسبت به نمونه بدون نانوکلوژیت حدود ۱/۵٪ مقاومت بیشتری دارد (شکل ۴).

روش مارشال، مقادیر وزن مخصوص حقیقی مخلوط آسفالتی، وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی، وزن مخصوص قیر، حداکثر وزن مخصوص مخلوط آسفالتی، استحکام مارشال و روانی مخلوط آسفالتی متراکم شده تعیین می‌گردد. سایر کمیت‌های مورد نظر به روش محاسبه با استفاده از روابط زیر تعیین می‌گردد [۷].

$$(۱) \text{ وزن مخصوص موثر مصالح سنگی } G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

$$(۲) \text{ حداکثر وزن مخصوص مخلوط آسفالتی در درصد های مختلف قیر } G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{se}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

$$(۴) \text{ درصد قیر موثر مخلوط آسفالتی } P_{ba} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} P_s$$

$$(۵) \text{ درصد فضای خالی مصالح آسفالتی } = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 - P_b} \times 100$$

$$(۶) \text{ درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی متراکم شده } V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

که در این روابط P_b = درصد قیر مخلوط آسفالتی نسبت به درصد وزنی کل مخلوط آسفالتی، G_b وزن مخصوص قیر، P_s درصد مصالح سنگی نسبت به وزن کل مخلوط آسفالتی، G_{sb} وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی، P_{ba} درصد جذب قیر مصالح سنگی نسبت به وزن مصالح سنگی، G_{sb} وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی، G_{sa} وزن مخصوص ظاهری مصالح سنگی و G_{se} وزن مخصوص موثر مصالح سنگی می‌باشند.

۵. نتیجه گیری

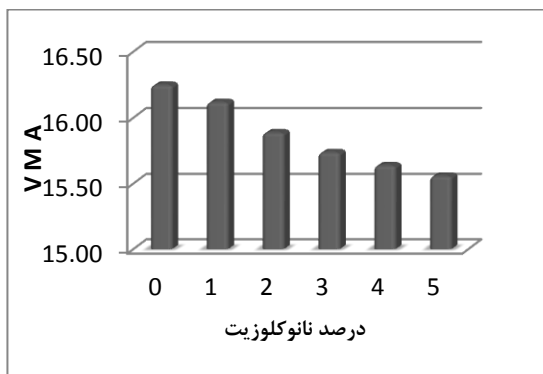
کاربرد نانومواد در بهبود رویه های روسازی آسفالتی و بتنی، چند سالی است که مورد توجه محققین راه قرار گرفته است. همین امر سبب شده است آزمایشات گوناگونی برای اثبات این مدعا انجام گیرد. نتایج این آزمایشات تا حد بسیاری بر کارآمد بودن استفاده از نانوذرات دلالت دارد.

ذرات فیلر با شبکه بلوری منظم در یک پلیمر با ساختار نامنظم می توانند یک نانوکامپوزیت را بسازند. این مواد به عنوان افزودنی برای ساخت نانوکامپوزیت ها و بهبود قابل توجه خواص مواد پلیمری به کار می روند و دارای انواع مختلفی می باشند که معمول ترین نوع آن ها مونت موریلونیته ها می باشند.

نانوکلوژیت ها یک نوع نانورس هستند که در بهبود عملکرد مخلوط های آسفالتی نقش بسزایی ایفا می کنند. استحکام و مقاومت مارشال تابع نوع، مقدار و مشخصات نانوکلوژیت است. نانوکلوژیت فضای بین ذرات درشت دانه را پر کرده و سبب افزایش مقاومت، تراکم و نهایتاً باربری می گردد. این نانو افزودنی ضربه پذیری را افزایش داده و تغییر شکل نسبی را نیز کاهش می دهد. اختلاط این ماده با قیر بایستی پس از ذوب قیر و در حالی که مخلوط کن فعال است به مرور به قیر افزوده شده و مخلوط گردد. با توجه به افزودن درصد های ۱ الی ۵ درصد نانوکلوژیت با درجه خلوص ۹۹/۹٪ به مخلوط آسفالتی و انجام آزمایشات مارشال انجام شده بر روی نمونه های آسفالتی و محاسبات لازم، نتایج حاکی از آن است که افزودن نانوکلوژیت به میزان ۵٪، مقاومت مارشال را نسبت به نمونه بدون نانوکلوژیت حدود ۱۱/۵٪ افزایش می دهد و نیز افزایش درصد های آن در مخلوط آسفالتی، افزایش حجم فضای خالی و کاهش روانی و درصد فضای خالی مصالح سنگی را در پی خواهد داشت

۶. منابع

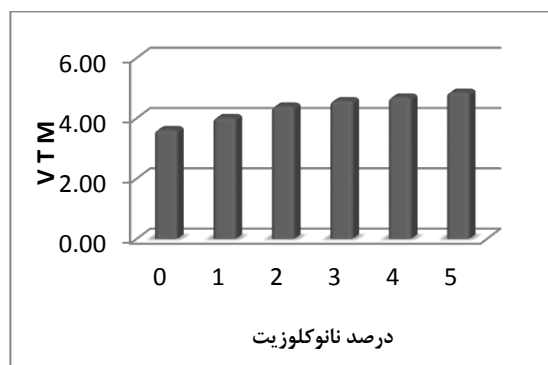
- [۱] تنزاده، ج.، تنزاده، ز. بررسی تاثیر مواد نانو و پلیمری در بهبود خصوصیات عملکردی قیرو تغییرات مدول دینامیک آسفالت به عنوان یک ماده ویسکو الاستو پلاستیک؛ نهمین کنگره ملی مهندسی عمران؛ دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (۱۳۹۱)
- [۲] غفارپور جهرمی، س. تاثیر نانورس و کربنات کلسیم رسوبی بر رفتار مهندسی مخلوط های آسفالتی؛ ششمین کنگره ملی مهندسی عمران؛ دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، (۱۳۹۰)
- [۳] خدادادی، ا.، کوکبی، م. و صالحی، س. اثر افزودنی نانورس بر عملکرد دراز مدت روسازی های آسفالتی؛ دومین همایش دانشجویی فناوری نانو؛ دانشگاه کاشان، کاشان، ایران (۱۳۸۶)
- [۴] اکبری مطلق، ع. مقاوم سازی جاده ها با استفاده از نانو لوله کربنی؛ چهارمین همایش ملی مقاوم سازی و حفظ بناهای ماندگار؛ اراک، ایران (۱۳۹۰)
- [۵] شکرچی زاده، م.؛ باباپور، ح. حاجی سامی، ب. مقاومت در برابر ساییدگی روسازی بتنی حاوی مواد نانو؛ چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران؛ تهران، ایران، (۱۳۸۷)



شکل ۶. اثر درصدهای مختلف نانوکلوژیت بر مقاومت VMA

۴-۴ حجم فضای خالی کل مخلوط (VTM)

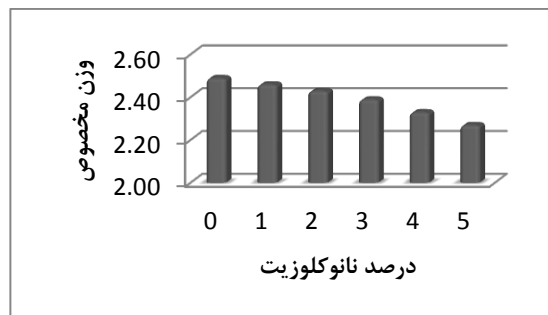
با افزایش درصد نانوکلوژیت در مخلوط، حجم فضای خالی کل مخلوط افزایش می یابد و در ۵٪ میزان آن معادل ۴/۸۷ می باشد که این مقدار نشان دهنده افزایش ۱/۳۵٪ نسبت به مخلوط بدون نانوکلوژیت می باشد که این موضوع می تواند ناشی از واکنش های شیمیایی نانوکلوژیت با مخلوط باشد (شکل ۷).



شکل ۷. اثر درصدهای مختلف نانوکلوژیت بر VTM

۳-۴ وزن مخصوص

با افزایش درصد نانوکلوژیت در مخلوط، وزن مخصوص کاهش می یابد که این مساله می تواند ناشی از افزایش حجم قیر و افزایش حجم مصالح سنگی در مخلوط باشد. با توجه به نمودار، وزن مخصوص مخلوط حاوی ۵٪ نانوکلوژیت حدوداً ۱/۱٪ از مخلوط آسفالتی بدون افزودنی کمتر است (شکل ۸).



شکل ۸. اثر درصدهای مختلف نانوکلوژیت بر وزن مخصوص

- [۶] نوری، ا. ، خدایاری، م. مقدمه ای بر فناوری نانو، انتشارات سازش؛ چاپ سوم، تهران ، ایران ، (۱۳۸۹)
- [۷] معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه ریزی. نشریه شماره ۲۳۴؛ انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی؛ تهران، ایران ، (۱۳۸۲)
- [۸] شرکت نانوسانی. مشخصات فنی محصولات نانو شرکت راک وود، مشهد، ایران ، (۱۳۹۱)
- [9] Jahromi, S.G., Ahmadi, N.L. International Journal of Earth Sciences and Engineering. 941-944, (2011).
- [10] Jahromi, S.G., Khodaii. Construction and Building Materials 23(8) , (2009).
- [11] Ghile D. B. "Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures", M.S. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, (2006).
- [12] You, Z., Mills-Beale, J., Justin, F., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q., Goh, S.W. Constr. Build.Mater. 25(2), 1072-1078 (2011).
- [13] Chong, K.P. Paisley, Scotland, 24(8) 13-21 , (2003).
- [14] Steyn, W.J.M. ASCE Jnl. of Transportation Engineering 135(10), 764-772 , (2009).
- [15] Ghasemia, M. Marandia, b. Tahmooresib, M. kamalia, R.J. Journal of Basic and Applied Scientific Research. 18(5) 1338-1344, (2012).