مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۱۲۳-۱۲۸، (یادداشت فنی)

Research Note

ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط آسفالتی ساخته‌شده با قیر اصلاح‌شده با بنتونیت

حسن زیاری (استاد)
رضوان باباگلی * **(دانشجوی دکتری)**
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

در این مطالعه عملکرد شیارشدگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی گرم ساخته‌شده با بنتونیت به‌عنوان اصلاح‌کننده‌ی قیر مورد بررسی قرار گرفته است. افزودنی بنتونیت با درصدهای ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ نسبت به وزن قیر برای اصلاح قیر مورد استفاده قرار گرفته است. جهت اختلاط بنتونیت با قیر، از مخلوط کن برشی استفاده شده است. در این مطالعه، عملکرد شیارشدگی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده از طریق آزمایش‌هایی از قبیل: مقاومت مارشال و تغییرشکل دائمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. روش آزمایش مورد استفاده جهت این ارزیابی، آزمون خزش دینامیکی و شیار جای چرخ است. نتایج نشان داده که استفاده از بنتونیت سبب بهبود مقاومت مارشال و مقاومت در برابر تغییرشکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی شده است. همچنین نمونه‌های آسفالتی مقاومت خوبی در برابر تغییرشکل‌های دائمی در آزمایش شیار چرخ از خود نشان داده‌اند.

واژگان کلیدی: قیر اصلاح‌شده، بنتونیت، مقاومت مارشال، تغییرشکل دائمی، مخلوط آسفالتی.

h.ziari@iust.ac.ir
rezvan_babagoli@yahoo.com

۱. مقدمه

قیر یک ماده‌ی سیاه‌رنگ متشکل از هیدروکربن‌های مختلف با وزن مولکولی بالاست و در مخلوط آسفالتی به دلیل نفوذناپذیری در برابر آب و داشتن خاصیت چسبندگی در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین قیر یک محصول جانبی از فرآیند پالایش نفت خام در پالایشگاه‌های نفتی است، که قیمت آن روزانه در حال رشد است. به همین دلیل هر تلاشی در جهت کاهش استفاده از آن موجب صرفه‌جویی اقتصادی و همچنین بهبود شرایط زیست‌محیطی می‌شود.

الیاف در مخلوط‌های آسفالتی برای اهداف مختلفی همچون: تثبیت قیر، بهبود خواص مکانیکی مخلوط، و اصلاح قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. فیبر، غلظت، مدول دینامیکی، حساسیت رطوبتی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌بخشد.[۱] فیبرهای زائد با وجود خاصیت بازگشت به محیط و بهبود هدایت الکتریکی می‌توانند در روسازی مورد استفاده قرار گیرند.[۲]

در مطالعه‌یی در سال ۲۰۱۱، تأثیر دو نوع نانورس[۱] بر خصوصیات قیر مورد بررسی قرارگرفت. در آزمایش‌های تجربی مونتموریلونیت[۲]، نانورس در ۲٪ و ۴٪ وزن قیر در دمای بالا با قیر مخلوط شد تا نانورس در قیر به خوبی پراکنده شود. با انجام آزمایش‌ها بر روی خصوصیات رئولوژیکی قیر مشخص شد قیرهای اصلاح‌شده با نانورس، مدول کل برشی بیشتر و زاویه‌ی فاز کمتر دارند که منجر به تولید قیر کشسان‌تر و سخت‌تر می‌شود. بنابراین قیر اصلاح‌شده با نانورس، مقاومت شیارشدگی بیشتری نسبت به قیر خالص دارد. همچنین با انجام آزمایش کشش مستقیم بر روی قیر خالص و قیر پیرشده و قیر حاوی نانورس مشخص شد که قیرهای اصلاح‌شده، مقاومت کششی بیشتری نسبت به قیرهای خالص دارند و درصد کرنش شکست آنها کمتر است. لذا پتانسیل ترک دمای پایین قیرهای خالص بهتر از قیرهای اصلاح‌شده است.[۳]

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۹، با انجام آزمایش‌های رئولوژیکی[۳]، تأثیر دو نوع نانورس Nanofil-۱۵ و cloisite-۱۵A بر خصوصیات رئولوژیکی قیر بررسی شده است. هنگامی که قیر با مقدار کمی از نانورس اصلاح شد، خواص فیزیکی آن در شرایطی که خاک رس در سطح بسیار ریزی پراکنده شده بود، به خوبی افزایش یافت و نتایج نشان داد که اصلاح‌کردن قیر با نانورس باعث افزایش سختی و مقاومت پیرشدگی قیر می‌شود. اضافه‌کردن درصد کمی نانورس به قیر، منجر به بهبود خصوصیات رئولوژیکی، کاهش درجه‌ی نفوذ و شکل‌پذیری و افزایش نقطه‌ی نرمی و مقاومت پیرشدگی قیر می‌شود. همچنین نتایج آزمایش برش دینامیکی نشان داد که مدول کل برشی (G^*) با کاهش دما یا افزایش بسامد افزایش می‌یابد، در حالی که زاویه‌ی فاز با افزایش دما یا کاهش بسامد افزایش می‌یابد.[۴]

در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۰۵، تأثیر نانورس cloisite-۱۵A با انجام آزمایش‌های مکانیکی در مخلوط‌های آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که نانورس سبب بهبود خصوصیات مخلوط از جمله مقاومت کششی غیرمستقیم، خزش و مقاومت خستگی شده است.[۵]

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۳/۸، اصلاحیه ۱۳۹۲/۹/۳۰، پذیرش ۱۳۹۲/۱۰/۱۴.

Archive of SID
www.SID.ir

در مطالعه‌ی دیگری نیز (۲۰۱۰) خصوصیات رئولوژیکی، مکانیکی و فیزیکی قیر حاوی پلیمر SBS قبل و بعد از اضافه‌شدن نانورس بر قیر بررسی شد و نتایج نشان داد که حضور نانورس باعث بهبود قابل توجهی در مقاومت قیر پلیمری می‌شود، بدون اینکه اثر سوءیی بر دیگر خصوصیات آن داشته باشد. با اضافه‌کردن نانورس، نقطه‌ی نرمی، غلظت و شاخص نفوذ افزایش و درجه‌ی نفوذ کاهش یافته است. بنابراین نانورس می‌تواند خصوصیات کارایی بالای قیر پلیمری را افزایش دهد. همچنین مشخص شد با اضافه‌شدن نانورس مدول کل برشی افزایش و زاویه‌ی فاز کاهش می‌یابد، که بر این اساس مقاومت شیارشدگی قیر افزایش می‌یابد.[۶]

همچنین در مطالعه‌یی که در سال ۲۰۱۰ انجام شد، قیر ۶۰-۷۰ با درصدهای مختلف بنتونیت (۰، ۱، ۲، ۴ و ۶) مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. با بررسی نقطه‌ی نرمی مشخص شد که قیر اصلاح‌شده با بنتونیت و بنتونیت اصلاح‌شده‌ی آلی[۴]، نقطه‌ی نرمی بیشتری دارد. همچنین با انجام آزمایش غلظت مشخص شد که غلظت قیر حاصل افزایش یافته است که علت آن افزایش فاز جامد رس به فاز غلظت قیر است. با انجام آزمایش شکل‌پذیری مشخص شد که شکل‌پذیری قیر با افزایش بنتونیت و بنتونیت آلی اصلاح‌شده کاهش یافته است. علت این تغییر افزایش فاز جامد شکننده‌ی رس به فاز ارتجاعی لزج شکل‌پذیر قیر است. همچنین بررسی تغییرات مدول کمپلکس (G^*) در برابر دما برای قیر اصلاح‌شده با بنتونیت و بنتونیت آلی اصلاح‌شده نشان داد که مدول کمپلکس که شامل مدول کشسان و مدول غلظت است، با افزایش دما کاهش یافته است. تغییرات زاویه‌ی فاز (δ) نسبت به دما برای قیر اصلاح‌شده با بنتونیت و بنتونیت آلی اصلاح‌شده نیز مورد آزمایش قرار گرفت. زاویه‌ی فاز به‌صورت اختلاف فاز بین تنش و کرنش در آزمایش نوسانی تعریف می‌شود. (δ) بیشتر نشان‌دهنده‌ی رفتار غلظت بیشتر و (δ) کمتر نشان‌دهنده‌ی خاصیت کشسان بیشتر است. نتایج حاکی از آن بود که افزایش مواد افزودنی باعث افزایش زاویه‌ی فاز (δ) شده است. با استفاده از آزمون رئومتر تیرچه خمشی[۵] در دمای ۱۲- درجه‌ی سانتی‌گراد، سختی خمشی برای قیر معمولی و اصلاح‌شده بعد از پیرشدگی توسط آزمایش لعاب نازک چرخشی[۶] و آزمایش محفظه‌ی تسریع پیری[۷] محاسبه شد و نتایج نشان داد که افزودن بنتونیت و بنتونیت آلی اصلاح‌شده باعث کاهش سختی نسبت به نمونه بدون افزودنی می‌شود و همچنین باعث مقاومت بیشتر در برابر ترک‌های دمای پایین است. کمتربودن سختی خمشی قیر پیرشده‌ی اصلاح‌شده نسبت به نمونه بدون افزودنی نشان‌دهنده‌ی این است که صفحات رسی در شبکه‌ی قیر از اکسیداسیون مولکول‌ها و تبخیر روغن‌های سبک جلوگیری می‌کند.[۷]

پژوهشگرانی نیز در پژوهش خود (۲۰۰۹) از مونتموریونیت و مونتموریونیت آلی اصلاح‌شده برای اصلاح قیر استفاده کردند. آنها خصوصیات فیزیکی، رفتارهای رئولوژیکی دینامیکی و پایداری در دمای بالای قیر اصلاح‌شده را بررسی کردند و نشان دادند که اضافه‌کردن مونتموریونیت و مونتموریونیت آلی اصلاح‌شده باعث افزایش مقاومت شیارشدگی و پایداری می‌شود. آنها همچنین در مطالعه‌ی دیگری اثر مونتموریونیت را بر روی دمای اکسیداسیون و مشخصات پیرشدگی قیر بررسی کردند.[۸] مطالعه‌ی دیگری نیز (۱۹۹۳) در زمینه‌ی استفاده از نانورس و نانو ذرات سیلیکاتی لایه‌یی به‌عنوان فیلر انجام شده است.[۹] در مطالعاتی نیز نشان داده شده است که نانوکامپوزیت‌های سیلیکاتی پلیمری در مقایسه با آسفالت پلیمری خالص، سبب افزایش قابل توجهی در خصوصیات عملکردی و حرارتی مخلوط آسفالتی شده است.[۱۰و۱۱]

همچنین در سال ۱۳۸۷ تأثیر مقادیر مختلف ماده معدنی بنتونیت بر روی خواص قیر حاوی ۱۶٪ پودر لاستیک مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه از بنتونیت با درصدهای ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ نسبت به وزن قیر استفاده شد. افزودن بنتونیت به قیر حاوی لاستیک باعث کاهش درجه نفوذ قیر شد و نقطه‌ی نرمی قیر حاوی لاستیک افزایش یافت. هر چه میزان درجه نفوذ قیر کمتر باشد، آسفالت تهیه‌شده از آن مقاومت باربری بیشتری دارد و هرچه نقطه‌ی نرمی قیر بیشتر باشد، قیر در دمای بالاتر کارایی خود را حفظ می‌کند. همچنین با افزایش مقادیر بنتونیت، مقادیر حساسیت حرارتی کاهش و شاخص نفوذ قیر افزایش می‌یابد.[۱۲]

۲. روش پژوهش

روش انجام پژوهش شامل: انتخاب مصالح، ساخت نمونه‌های قیر با درصدهای مختلف افزودنی، انجام آزمایش‌های فیزیکی قیر، ساخت نمونه‌های آسفالت با درصدهای مختلف افزودنی، و در نهایت انجام آزمایش‌های مارشال، خزش دینامیکی و شیار جای چرخ بر روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی بوده است.

۱.۲. مصالح سنگی و قیر

در این پژوهش از سنگ شکسته‌ی کوهی معدن اسب چران رودهن با دانه‌بندی شماره‌ی ۴ آیین‌نامه‌ی روسازی آسفالتی و همچنین ۵٪ فیلر پودرسنگ استفاده شده است. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. قیر به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش از نوع قیر خالص ۶۰/۷۰ بوده است که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شده و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ آمده است. افزودنی به‌کاررفته نیز بنتونیت سدیم‌دار[۸] بود که مشخصات فیزیکی و هندسی آن در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. ترکیب قیر و بنتونیت در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه انجام شده است.

۲.۲. روش ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش برای تهیه درصد قیر بهینه ابتدا ۱۸ نمونه مخلوط آسفالتی با درصدهای ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ با قیر بدون افزودنی ساخته شده و پس از انجام آزمایش‌های مارشال، درصد قیر بهینه تعیین شده است. برای تهیه‌ی نمونه‌های حاوی افزودنی، ابتدا مصالح سنگی تا دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و سپس قیرهای با درصدهای مختلف بنتونیت شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ تا دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد گرم و به ازاء هر درصد، ۳ نمونه تهیه شد. سپس مخلوط حاصل تحت روش تراکم مارشال با ۷۵ ضربه متراکم شد. بعد از آن نیز نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت، در دمای آزمایشگاه قرار داده شدند تا سرد شوند. پس از سردشدن، نمونه‌ها از قالب خارج شدند و آزمایش‌های چگالی[۹]، پایداری[۱۰] و روانی[۱۱]،[۱۳] بر روی آنها انجام شد و نتایج با نمونه‌های شاهد مقایسه شدند.[۱۴] زمانی که افزودنی‌های مذکور به قیر اضافه می‌شود، خصوصیات قیر از جمله درجه نفوذ، درجه نرمی و شکل‌پذیری تغییر می‌کند و این خصوصیات اثر مستقیمی در خواص مخلوط‌های آسفالتی دارند. به منظور مقایسه‌ی حساسیت قیرها نسبت به تغییرات درجه حرارت و تعیین سختی نسبی قیرهای خالص، آزمایش‌های مذکور بر روی قیر خالص نیز انجام می‌شود. بدین منظور، نمونه‌های قیر با درصد نسبت وزنی افزودنی بنتونیت به قیر ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ تهیه و آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و شکل‌پذیری انجام و با نمونه‌ی شاهد مقایسه شدند، که نتایج آن در شکل‌های ۱ الی ۴ ارائه شده است. برای ارزیابی تأثیر افزودنی‌ها در عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم، آزمایش‌های مارشال، خزش دینامیکی و شیار جای چرخ بر روی انواع مخلوط‌های ساخته‌شده انجام شدند.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده.

شرح	نتایج آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		استاندارد آزمایش	
		آستر	رویه	AASHTO	ASTM
بیشینه‌ی سایش به روش لس‌آنجلس (درصد)	۲۲٫۳	۴۰	۳۰	T۹۶	–
بیشینه‌ی ضریب تورق با روش BS۸۱۲ (درصد)	۹	۳۰	۲۵	–	–
کمینه‌ی درصد شکستگی در دو وجه روی الک ۴	۹۴	۸۰	۹۰	–	D۵۸۲۱
بیشینه‌ی درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)	۲٫۲	۲٫۵	۲٫۵	T۸۵	–
بیشینه‌ی درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)	۲٫۴	۲٫۸	۲٫۵	T۸۴	–

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر.

نوع آزمایش	استاندارد	نتیجه‌ی آزمایش
نقطه‌ی نرمی	ASTM D۳۶	۴۷ درجه سانتی‌گراد
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه	ASTM D۵	۶۷ دسی میلی‌متر
درجه اشتعال	ASTM D۹۲	۳۰۴ درجه سانتی‌گراد
شکل‌پذیری در دمای ۲۵	ASTM D۱۱۳	بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر
چگالی	ASTM D۷۰	۱٫۰۴۵ gr/cm^3
افت حرارتی	ASTM D۶	٪۰٫۰۵
قابلیت حل	ASTM D۴	٪۹۹٫۵

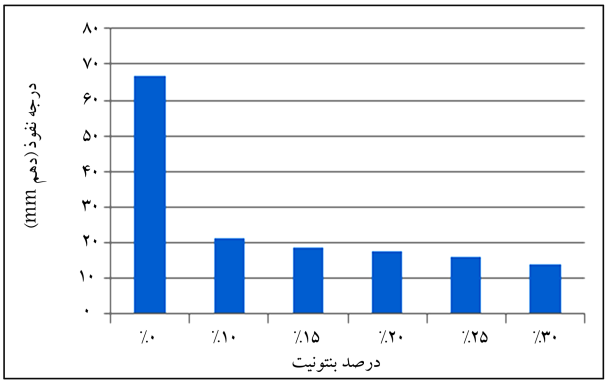
جدول ۳. مشخصات فیزیکی و هندسی بنتونیت.

نوع آزمایش	استاندارد	مقادیر اندازه گیری‌شده
وزن مخصوص	ASTM C۱۶۸	۵٫۲ gr/cm^3
درصد رطوبت	ASTM D۲۲۱۶	٪۶-۱۰
وزن مولکولی	**	۱٫۱۰۰ gr
نقطه‌ی جوش	**	۴۰۰ درجه سانتی‌گراد
نقطه‌ی ذوب	**	۱۴۳۰ درجه سانتی‌گراد
نوع کریستال	**	کریستالی لایه لایه
رنگ	**	جامد کرم
جذب آب	**	٪۶۰۰

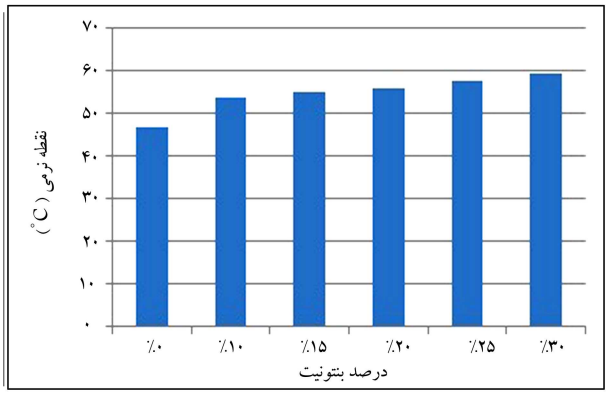
** براساس اطلاعات شرکت درین کاشان.

جدول ۴. دانه‌بندی بنتونیت.

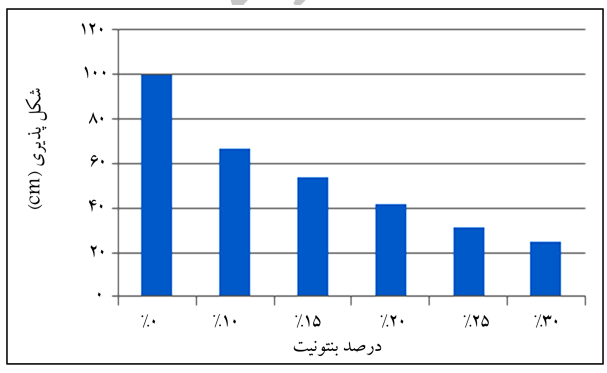
مقدار ماده‌ی مانده	مانده روی الک (٪)		
بر حسب mesh	۱۰۰	۲۰۰	۳۲۵
بنتونیت	۲	۲٫۵	۲۰



شکل ۱. مقایسه‌ی تأثیر افزودنی بنتونیت در درجه‌ی نفوذ قیر.



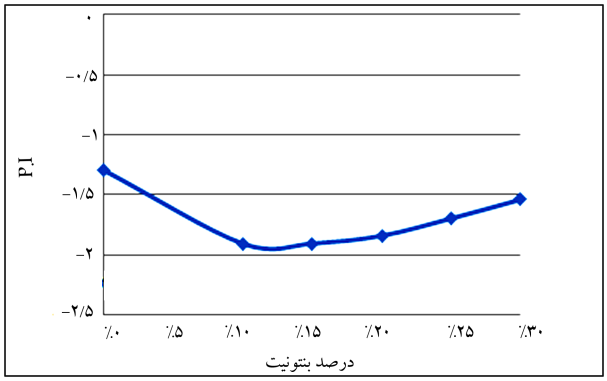
شکل ۲. مقایسه‌ی تأثیر افزودنی بنتونیت در نقطه‌ی نرمی قیر.



شکل ۳. مقایسه‌ی تأثیر افزودنی بنتونیت در شکل‌پذیری قیر (Ductility).

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴. مقایسه‌ی تأثیر افزودنی بنتونیت در نشانه‌ی درجه‌ی نفوذ قیر.

۳. روش کار آزمایش

۱.۳. خزش دینامیکی

جهت بررسی شیارشدگی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شده است. آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های دائم است. آزمایش با استفاده از دستگاه UTM-5P [۱۲] در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد و تحت تنش ثابت ۴۵۰ کیلوپاسکال، که به‌صورت شبه سینوسی اعمال شد، انجام گرفت. در این آزمایش یک تنش ثابت در دمای ثابت با مدت بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه، توسط یک صفحه‌ی صلب به‌صورت عمودی به نمونه وارد شد. نتایج آزمایش بر حسب عدد روانی برداشت شد که معیاری برای نشان‌دادن مقاومت مخلوط در برابر تغییرشکل‌های دائمی است، یعنی هر قدر عدد روانی بزرگ‌تر باشد، مقاومت نمونه در برابر تغییرشکل‌های دائم بیشتر است.

۲.۳. شیار جای چرخ

این آزمایش توسط دستگاه شیار جای چرخ موجود در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. برای هر نوع مخلوط سه نمونه‌ی مارشال در دستگاه قرارگرفت و توسط دو چرخ که حول مرکزشان دوران می‌کنند با فشار حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع مورد بارگذاری قرارگرفتند. بسامد بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سانتی‌گراد است. در مجموع نمونه‌ها تحت ۸۰۰ سیکل بارگذاری قرارگرفتند و پس از آن بیشینه‌ی عمق شیار به‌وجودآمده در هر نمونه اندازه‌گیری و میانگین سه نمونه به‌عنوان عمق شیار هر مخلوط به دست آمد.

۴. تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۱.۴. نتایج آزمایش‌های قیر

با توجه به شکل ۱مشاهده می‌شود که با افزایش درصد بنتونیت، مقدار درجه‌ی نفوذ کاهش یافته و مطابق شکل ۲ با افزایش درصد افزودنی بنتونیت، نقطه‌ی نرمی افزایش یافته است. در شکل ۳، با افزایش درصد افزودنی بنتونیت، شکل‌پذیری کاهش یافته است که این می‌تواند ناشی از افزایش فاز جامد شکننده‌ی رس به فاز ارتجاعی لزج شکل‌پذیر قیر باشد. همچنین با دقت در شکل ۴ می‌توان دریافت که مقدار شاخص نفوذ قیر با افزودن بنتونیت نسبت به قیر خالص کاهش و با افزودن درصدهای مختلف بنتونیت افزایش یافته است. بنتونیت به دلیل داشتن درصد بالای سیلیس (بالای ۷۰٪) در ترکیب خود و همچنین پخش‌شدن مناسب در فاز قیر باعث سخت‌شدن قیر می‌شود. در نتیجه قیر حاصل دیرتر نرم می‌شود، لذا درجه‌ی نفوذ آن کم می‌شود. هرچه میزان درجه‌ی نفوذ قیر کمتر باشد، آسفالت تهیه‌شده از آن بار بیشتری را تحمل می‌کند و هر چه نقطه‌ی نرمی قیر بیشتر باشد، قیر در دمای بالاتری کارایی خود را حفظ می‌کند.

۲.۴. تحلیل نتایج آزمایش‌های مخلوط آسفالتی

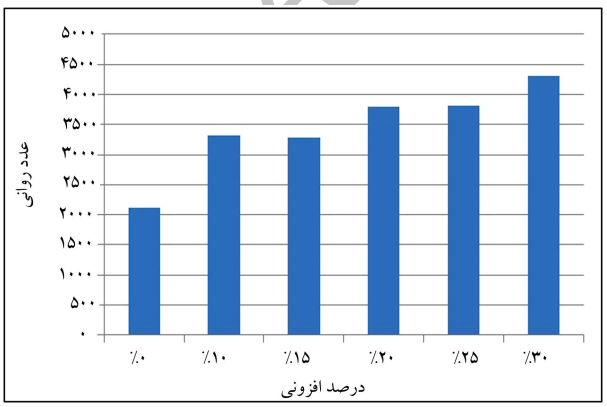
۱.۲.۴. مقاومت مارشال

نتایج مقاومت مارشال و روانی نمونه‌ها در جدول ۵ آمده است. همان‌طور که قبلاً گفته شده است، سه نمونه برای هر درصد افزودنی ساخته شده است و اعدادی که در جدول مذکور ارائه‌شده‌اند، میانگین سه نمونه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقاومت مارشال نمونه‌ها با افزایش درصد بنتونیت افزایش یافته است. به نظر می‌رسد که افزودن بنتونیت سختی قیر را افزایش می‌دهد، به‌طوری که مخلوط‌های حاوی بنتونیت مقاومت مارشال بالاتری را نسبت به نمونه‌های خالص دارند. مقادیر مقاومت مارشال با اضافه‌کردن ۲۰٪ بنتونیت روند افزایشی داشته‌اند و بعد از این درصد افزودنی بنتونیت، مقاومت مارشال کاهش می‌یابد که به علت تأثیر بنتونیت در غلظت قیر است؛ چرا که پوشش قیر بر دانه‌ها سخت‌تر می‌شود، لذا مقاومت آن کاهش می‌یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ بنتونیت دارای بیشترین مقدار نسبت مقاومت مارشال به میزان روانی است. به خوبی تشخیص داده می‌شود که نسبت مقاومت مارشال به روانی، معیاری از مقاومت نمونه‌ها در برابر تنش برشی، تغییرشکل دائمی و شیارشدگی است.[۱۵]

۲.۲.۴. آزمایش خزش دینامیکی

شیارشدگی یکی از خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی است و به تغییرشکل‌های دائمی گفته می‌شود که به‌صورت شیار فرورفته در مسیر چرخ وسائط نقلیه به موازات محور طولی راه دیده می‌شود.[۱۶] لذا در این مطالعه شیارشدگی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرارگرفته است. برای بررسی شیارشدگی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شده است. آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائم است.[۱۷] مطابق شکل ۵، نمونه‌های بدون افزودنی، کمترین عدد روانی و در نتیجه مقاومت پایین را در برابر تغییرشکل‌های دائم دارند.

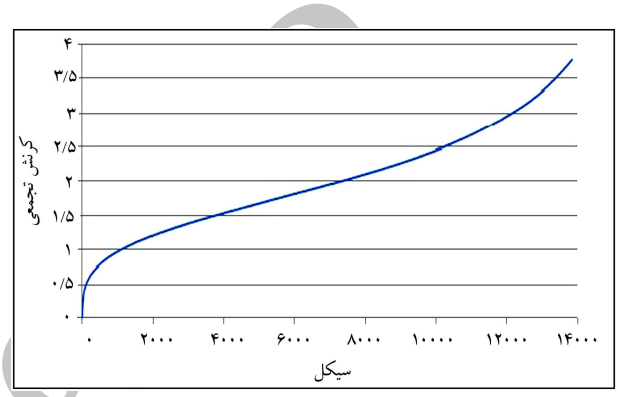


شکل ۵. نمودار نتایج آزمایش خزش دینامیکی نمونه‌ها در دمای ۵۰°C.

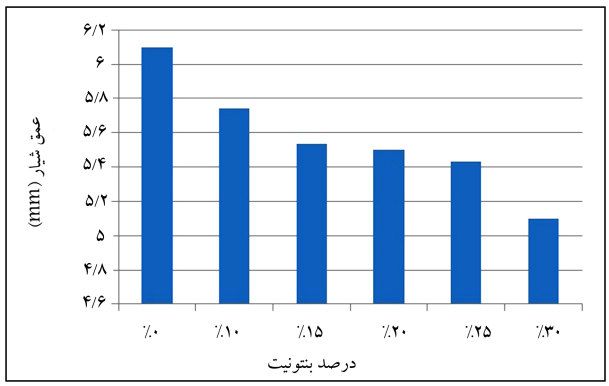
Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۵. نتایج آزمایش مارشال.

نوع نمونه	وزن مخصوص	فضای خالی (٪)	استقامت مارشال (KN)	روانی (mm)	نسبت مقاومت مارشال به روانی (kN/mm)
بدون افزودنی	۴۱٫۲	۳۵٫۲	۴۷۵٫۹	۱۲۵٫۳	۰۳۲٫۳
۱۰٪ بنتونیت	۳۱٫۲	۵٫۸۳	۳۰۵٫۱۱	۴۶٫۳	۲۷٫۳
۱۵٪ بنتونیت	۳۶٫۲	۴٫۶۷	۶۴٫۱۱	۴۴۵٫۳	۳۸٫۳
۲۰٪ بنتونیت	۳۷٫۲	۴۸٫۴	۰۱٫۱۲	۰۷٫۳	۹۱٫۳
۲۵٪ بنتونیت	۳۴٫۲	۴٫۰۹	۵۱٫۱۰	۰۳۵٫۳	۴۶٫۳
۳۰٪ بنتونیت	۳۲٫۲	۴٫۰۲	۴۹٫۹	۷۲٫۳	۵۵٫۲



شکل ۶. نمونه‌یی از خروجی دستگاه UTM برای کرنش تجمعی در برابر تعد
اد سیکل در آزمایش خزش دینامیکی.



شکل ۷. نمودار نتایج مربوط به آزمایش شیار چرخ در دمای ۵۰°C.

مطابق شکل ۵ مشاهده می‌شود که مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی، عدد روانی بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی معمولی دارند. به طوری که با افزایش درصد افزودنی از ۱۰ به ۳۰، عدد روانی از ۳۳۰۰ به ۴۳۰۰ افزایش یافته است. در واقع با اینکه نمونه‌های حاوی بنتونیت عدد روانی بیشتری نسبت به مخلوط آسفالتی معمولی داشته‌اند، کرنش‌های تجمعی بیشتری نیز داشته‌اند. نمونه‌یی از خروجی دستگاه که به‌صورت کرنش تجمعی است، در شکل ۶ نشان داده شده است.

۳.۲.۴. شیار جای چرخ

شکل ۷، نتایج مربوط به عمق شیار حاصله در آزمایش شیار جای چرخ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی افزودنی بنتونیت، عمق شیار کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد دارند که نشان‌دهنده‌ی اثر افزودنی‌ها در کاهش پتانسیل شیارشدگی است. این اثر می‌تواند ناشی از بهبود تراکم و سختی قیر به خاطر خواص مولکولی این افزودنی‌ها باشد.

۵. نتیجه‌گیری

برای ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌ها، آزمایش‌هایی نظیر: استقامت مارشال، خزش دینامیکی و شیار جای چرخ بر روی نمونه‌ها انجام شده است، که خلاصه‌یی از نتایج آن در این بخش ارائه شده است:

۱. به‌کارگیری افزودنی بنتونیت در نمونه‌های آسفالت گرم اثر قابل ملاحظه‌یی در استحکام مارشال این نوع مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های آسفالتی گرم خالص داشته است. به طوری که با افزودن ۲۰٪ بنتونیت به قیر خالص ۶۰-۷۰، باعث افزایش ۲۰٪ در مقاومت مارشال شده است.

۲. در آزمایش خزش دینامیکی، نمونه‌های ساخته‌شده با درصدهای بیشتر بنتونیت شرایط بهتری جهت تحمل نیروهای وارده و مقاومت در برابر شیارشدگی از خود نشان داده‌اند. هر چند این آزمون جهت مقایسه بین نمونه‌های مختلف با درصدهای مختلف اصلاح‌کننده‌ی بنتونیت است، زیرا شرایط مهار جانبی که در واقعیت وجود دارد در آزمایش میسر نیست؛ لذا تغییرمکان‌های بیشتری در مقابل نیروی وارده از خود نشان می‌دهند. ولیکن با وجود این می‌توان نتیجه گرفت که افزودن بنتونیت باعث افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود و می‌تواند جایگزین مناسبی برای اصلاح‌کننده‌های پلیمری (مانند SBS، EVA و...) و غیر پلیمری باشد.

۳. مقایسه‌ی مقدار شیارشدگی مخلوط حاوی افزودنی با مخلوط گرم معمولی نشان می‌دهد که بنتونیت موجب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود.

۴. مقدار عدد روانی نمونه‌های حاوی افزودنی که از آزمایش خزش دینامیکی به‌دست‌آمده است، نشان می‌دهد که عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی از مخلوط‌های آسفالتی کنترلی بهتر است.

Archive of SID
www.SID.ir

پانوشت‌ها

1. Nanoclay
2. Montmorillonite
3. Rheological
4. organically modified Bentonite
5. bending beam Rheometer
6. rolling thin film oven
7. pressure aging vessel
8. sodium Bentonite
9. density
10. stability
11. flow
12. universal testing machine

منابع (References)

1. Chen, H., Xu, Q., Chen, S. and Zhang, Z. "Evaluation and design of fiber- reinforced asphalt mixtures", *Materials and Design*, **30**(7), pp. 2595-2603 (2009).
2. Hejazi, S.M., Sheikh Zadeh, M., Abtahi, S.M. and Semnani, D. "Evaluation of various textiles for mchanical enforcement of asphalt concrete and using a neural network to analysis the results", Tehran, 4th Iranian National Congress on Civil Engineering (2008).
3. You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. and Goh, S.W. "Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization", *Construction and Building Materials*, **25**(2), pp. 1072-1078 (2011).
4. Ghaffarpour Jahromi, S. and Khodaii, A. "Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder", *Construction and Building Materials*, **23**(8), pp. 2894-2904 (2009).
5. Ghile, D.B. "Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures", Delft University of Technology, Msc Thesis TUDelft (2005).
6. Sadeghpour Galooyak, S., Dabir, B., Nazarbeygi, A.E. and Moeini, A.R. "Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites", *Construction and Building Materials*, **24**(3), pp. 300-307 (2010).
7. Zare-Shahabadi, A., Shokuhfar, A. and Ebrahimi-Nejad, S. "Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles", *Construction and Building Materials*, **24**(7), pp. 1239-1244 (2010).
8. Yu, J., Feng, P., Zhang, H. and Wu, S. "Effect of organomontmorillonite on aging properties of asphalt", *Constr. Build. Mater.*, **23**(7), pp. 2636-2640 (2009).
9. Kojima, Y., Usuki, A., Kawasumi, M., Okada, A., Fukushima, Y., Kurauchi, T. and et al. "Sorption of water in nylon 6-clay hybrid", *J. Appl. Polym. Sci.*, **49**(7), pp. 1259-1264 (1993).
10. Chen-Yang, Y.W., Lee, Y.K., Chen, Y.T. and Wu, J.C. "High improvement in the properties of exfoliated PU/clay nanocomposites by the alternative swelling process", *Polymer*, **48**(10), pp. 2969-2979 (2007).
11. Suguna Lakshmi, M., Narmadha, B. and Reddy, B.S.R. "Enhanced thermal stability and structural characteristics of different MMT-clay/epoxy-nanocomposite materials", *Polym Degrad Stabil*, **93**(1), pp. 201-213 (2008).
12. Hamidi, Yaser, Saafi, A. and Tahmooresi, M. "The effect of bentonite on rubberized asphalt", 12Th National Congress of Chemical Engineering (1387).
13. *Iranian Pavement Roads Standard*, Code Number 234, Tehran, IRAN: Presidential Programming Organization (2011).
14. Ziari, H., Tabatabaei, S.A. and Khabiri, M.M. "Applicable guide for ssphalt and bitumen tests", Tehran, IRAN: Iran University of Science and Technology (2006).
15. Garcia Lopez, D., Gobernado Mitre, I., Fernandez, J., Merino, J. and Pastor, J. "Influence of clay modification process in PA6-layered silicate nanocomposite properties", *Polymer*, **46**(8), pp. 2758-2765
16. Tayfur, S., Ozen, H. and Aksoy, A. "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers", *Construction and Building Materials*, **21**(2), pp. 328-337 (2007).
17. National Cooperative Highway Research Program, *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*, Report 465 (2002).

(2005).

Archive of SID

www.SID.ir