

ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانو رس

محمود عامری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مصطفی وامق (مسئول مکاتبات)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حامد روح الامینی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

کیوان بمانا، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: mostafa_vamegh@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۲۱ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۸

چکیده:

حساسیت رطوبتی یا عریان شدگی از اولین مشکلاتی است که از ابتدای تشکیل صنعت ساخت روبه‌های آسفالتی شناخته شده است. اگرچه وزن قیر به عنوان یک جزء تشکیل‌دهنده مخلوط‌های آسفالتی نسبت به سایر اجزا مقدار کمی است، اما اثر مهمی بر روی عملکرد بهینه، دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد. امروزه به منظور اصلاح قیرهای خالص معمولی و ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالتی از مواد افزودنی اصلاح‌کننده قیر استفاده می‌شود. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی اثر نانو رس به عنوان افزودنی قیر برای بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت است. برای این منظور از مصالح سنگی آهکی با دانه‌بندی شماره ۴، پودر سنگ به عنوان فیلر، قیر خالص از نوع ۶۰-۷۰ و از دو نوع نانو رس مونت‌موریلونیت CA و CB به عنوان افزودنی قیر استفاده شده است. برای ارزیابی اثر نانو رس آزمایش مارشال، آزمایش جوشان تگزاس به همراه پردازش تصویر بر روی نمونه‌های متراکم نشده، آزمایش حساسیت رطوبتی و آزمایش مدول برجهندگی بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی حاوی ۲، ۴ و ۶٪ از هر دو نوع نانو رس و نمونه شاهد انجام گرفته است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با افزوده شدن نانو رس در برابر رطوبت را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، نمونه‌های حاوی نانو رس CA عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی نانو رس CB دارند.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، نانو رس، حساسیت رطوبتی، جوشان تگزاس.

۱. مقدمه

اثرات قابل توجهی در ساخت و ساز داشته باشند. نانو رس ها مواد منحصر به فردی هستند که به عنوان مواد افزودنی برای ساخت نانوکامپوزیت ها و بهبود قابل توجه خواص مواد پلیمری بکار می روند. ساختار نانو رس ها شامل صفحاتی کوچک و نامنظم با ضخامتی در حدود ۱ نانومتر و قطر چند صد نانومتری هستند. یکی از مهم ترین خصوصیات نانو رس ها نسبت طول به ضخامت بسیار بالای تک تک صفحات (۳۰۰ به ۱ و ۱۵۰۰ به ۱) است. به علت ساختار صفحه ای، نانو رس ها مواد پلیمری معمول را تقویت می کنند؛ یعنی خواص مکانیکی مواد مانند استحکام، مدول و ثبات ابعادی را بهبود می بخشد. صفحات نانو رس به عنوان محافظ در برابر رطوبت و مواد شیمیایی به خوبی به عنوان حائلی برای جلوگیری از نفوذ یا عبور گازها عمل می کند [Grim, 1959 and Nguyen, 2007].

با توجه به اهمیت موضوع و مشخص شدن اثرات مثبت نانو ذرات بر مواد کامپوزیتی، اخیراً تحقیقاتی بر روی قیرها و مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با نانو ذرات انجام شده است. در سال ۲۰۱۰ تحقیقی توسط Zhanping You و همکاران، روی قیرهای اصلاح شده با نانو رس انجام گرفته است. در این تحقیق آزمایش های ویسکوزیته دورانی (RV) در دماهای ۸۰ تا ۱۷۵ درجه سانتی گراد و رئومتر برشی دینامیکی برای اندازه گیری مدول کل تنش برشی (G*) در محدوده دمایی ۱۳ تا ۷۰ درجه سانتی گراد انجام شده است که مقدار ویسکوزیته بین ۴۱ تا ۱۱۲ درصد افزایش و مقدار G* نیز به طور قابل ملاحظه ای افزایش پیدا کرده است [You et al. 2010]. در تحقیقی که در سال ۲۰۱۰ توسط Goh و همکاران انجام گردید، نتایج نشان داد که افزودن نانو رس و میکروفیبرهای کربنی، اثرات مثبتی بر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های آسفالتی دارد [Goh et al. 2011]. تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۱۲ توسط الشافی ۱ و همکاران بر روی قیر و مقاومت کششی مخلوط های آسفالتی حاوی نانو رس نشانگر افزایش نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ قیر و ویسکوزیته قیر در دمای ۱۳۵ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد و افزایش مقاومت کششی در دمای منفی ۷ و مثبت ۲۵ درجه سانتی گراد است [El-Shafie et al. 2012].

از اهداف اولیه طرح و اجرای روسازی های آسفالتی در سطح جاده ها و راهها، حصول بهترین عملکرد در شرایط آب و هوایی مختلف است. برای عملکرد بهینه روسازی آسفالتی، آسفالت باید از دوام و پایداری خوبی در عمر بهره برداری برخوردار باشد و عوامل محیطی مانند دما، هوا و آب تاثیر بسزایی بر دوام مخلوط آسفالتی دارد. کارآیی روسازی آسفالتی، به چسبندگی و پیوستگی سیستم سنگدانه-قیر بستگی دارد که رطوبت در آسفالت باعث از دست رفتن چسبندگی بین سنگدانه ها و چسبندگی قیری (ترکیب قیر و فیلر) یا از بین رفتن پیوستگی در چسبندگی قیری می شود که نتیجه آن عریان شدگی و قیر زدگی است [Abu El-Maaty, Behiry, 2013; Xiao et al. 2010]. اگرچه مکانیزم حساسیت رطوبتی به طور کامل شناخته شده نیست، ولی عواملی مثل خواص قیر، خواص مصالح سنگی، خواص مخلوط های آسفالتی، کنترل کیفیت در هنگام تراکم، اثر دینامیکی بار ترافیکی و نوع ماده افزودنی ضد عریان شدگی در ایجاد حساسیت رطوبتی و تشدید خرابی ها نقش مؤثری دارند [Kiggundu and Roberts, 1988]. خصوصیات مصالح تشکیل دهنده نقش بسزایی در ویژگی های ساختمانی روسازی بازی می کنند [Abu El-Maaty Behiry, 2013] و اگرچه وزن قیر در مخلوط آسفالتی نسبت به مصالح سنگی کم است، با این حال قیر اثر مهمی بر روی عملکرد بهینه، دوام و پایداری مخلوط های آسفالتی دارد و هر گونه تغییر در عملکرد قیر بر روی عملکرد مخلوط آسفالتی اثرگذار خواهد بود [Ameri, 2011]. قیرهای اصلاح شده یکی از راه حل ها برای غلبه بر کاستی های قیر طبیعی است که منجر به بهبود عملکرد روسازی می شود. اصلاح خواص قیر باعث بالا رفتن کیفیت و افزایش عمر مفید آن می شود [Lewandowski, 1994]. یکی از افزودنی های شاخص برای اصلاح خواص قیر نانو ذرات هستند. در حال حاضر نانو مواد در همه زمینه ها در سراسر جهان مورد استفاده قرار می گیرد. در صنعت روسازی نیز به منظور بهبود خواص قیر و مخلوط های آسفالتی از این فناوری استفاده می شود. نانو ذرات سیلیس، آلومینیم، منیزیم، کلسیم و رس می توانند

۲-۲ افزودنی قیر (نانو رس)

در این پژوهش از نانو رس مونت‌موریلونیت موسوم به CA و CB با درصد‌های ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی قیر با قیر خالص مرجع مخلوط گردیده است.

اختلاط نانو رس با قیر در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه و با توان ۶۵ کیلووات توسط میکسر آلتراسونیک انجام شد. برای اطمینان از توزیع یکنواخت و جلوگیری از کلوخه شدن نانو رس در قیر، نانو رس در ۱۰ مرحله به قیر افزوده شد. نانو رس مصرفی از شرکت نوترینو^۱ تهیه شده است. مشخصات نانو رس مصرفی در جدول ۲ ارائه شده و ساختار مولکولی آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۲-۳ مصالح سنگی

مصالح سنگی ۹۰ تا ۹۵٪ وزنی و ۷۵ تا ۸۵٪ حجمی مخلوط‌های بتن آسفالتی را شامل می‌شود. مشخصات مصالح سنگی بر عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت تأثیر زیادی دارد. جنس سنگدانه، خواص شیمیایی و فیزیکی مصالح سنگی استفاده شده در آسفالت و دانه‌بندی سنگدانه از عواملی هستند که بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی تأثیرگذار هستند [Shen et al. 2005]. فیلرهای معدنی به طور مرسوم در مخلوط‌های بتن آسفالتی برای پر کردن فضای خالی بین مصالح سنگی استفاده می‌شوند. همچنین فیلر باعث بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط می‌شود. قابل ذکر است که مهم‌ترین نقش فیلر در بتن آسفالتی، افزایش عمر روسازی و ازدیاد مقاومت آن در برابر تأثیر آب است [Tabatabai, 2005].

جدول ۱. خصوصیات قیر مورد استفاده

واحد	روش آزمایش	قیر ۷۰/۶۰	خصوصیات
kg/m ³	ASTM D70	۱/۰۳	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
دهم میلی‌متر	ASTM D5	۶۴	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
درجه سانتی‌گراد	ASTM D36	۵۴	نقطه نرمی
سانتی‌متر	ASTM D113	۱۰۲	انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
درجه سانتی‌گراد	ASTM D92	۳۰۵	نقطه اشتعال
درجه سانتی‌گراد	ASTM D70	۳۱۷	نقطه احتراق

همچنین تحقیقات انجام شده توسط ختاک و همکاران در سال ۲۰۱۲، نشانگر این بود که با اصلاح قیر توسط نانو الیاف کربن مقاومت شیار شدگی و همچنین عمر خستگی افزایش پیدا کرده است [Khattak et al. 2013]. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۰۹ توسط غفاریپور و همکاران بر روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو رس انجام شده، نتایج حاصل نشانگر بهبود مقاومت شیار شدگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و افزایش مدول برجهنگی است [Ghaffarpour et al. 2010].

با توجه به اینکه نانو ذرات از جمله نانو رس می‌توانند عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی را بهبود دهند، در این پژوهش با استفاده از آزمایش حساسیت رطوبتی (AASHTO T283) و آزمایش جوشان تگزاس (ASTM D3625) مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانو رس Cloisite 15A و Cloisite 30B مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه نانو رس Cloisite 15A به صورت اختصاری با علامت CA و Cloisite 30B با علامت CB بیان می‌شود.

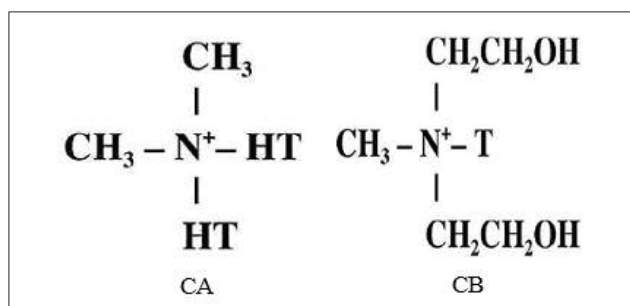
۲. مصالح مصرفی

۲-۱ قیر

قیر استفاده شده در این پژوهش، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ است که از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده است. این قیر برای تهیه نمونه‌های حاوی افزودنی نانو رس نیز مورد استفاده قرار گرفته است. خصوصیات قیر مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات نانورس مصرفی

CA	CB	مشخصات
2M2HT	MT2EtOH	اصلاح کننده آلی
۱۲۵ میلی گرم	۹۰ میلی گرم	مقدار اصلاح کننده در ۱۰۰ گرم رس
< ۰.۲٪	< ۰.۲٪	درصد رطوبت
۰.۴۳٪	۰.۳۰٪	کاهش رطوبت در اثر حرارت
۱.۶۶	۱.۹۸	چگالی (گرم / سانتی متر مکعب)

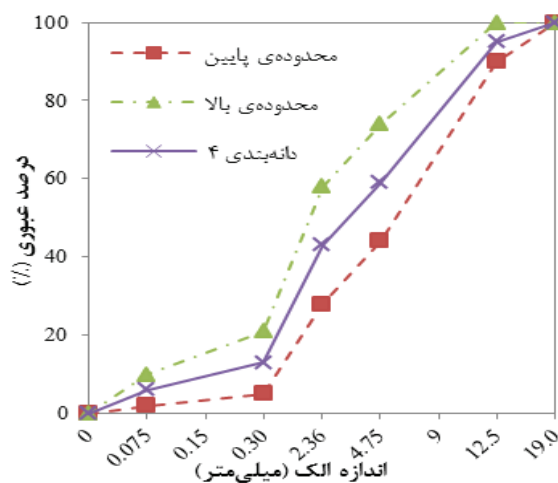


شکل ۱. ساختار مولکولی نانورس مصرفی

۳. روش آزمایش

ابتدا برای تعیین درصد قیر بهینه، نمونه‌های استاندارد مارشال ساخته می‌شود. مقاومت در برابر رطوبت برای نمونه‌های متراکم نشده با آزمایش جوشان تگراس و بر روی نمونه‌های متراکم شده با آزمایش‌های حساسیت رطوبتی و آزمایش مدول برجهنگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از معدن اسب چران واقع در شهرستان رودهن تهیه شده و از نوع سنگدانه‌های شکسته آهکی هستند. پودر سنگ آهک به عنوان فیلر (عبوری از الک شماره ۲۰۰) استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی (مطابق دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای آستر و رویه) مصرفی برای ساخت نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده و خصوصیات مصالح سنگی در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲. حد بالا، پایین و وسط دانه‌بندی شماره ۴

ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانو رس

جدول ۳. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

واحد	استاندارد آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
		رویه	آستر		
درصد	AASHTO T96	۳۰	۴۰	۲۲/۳	حداکثر سایش به روش لوس آنجلس
درصد	BS 812	۲۵	۳۰	۱۶	حداکثر ضریب تورق
درصد	ASTM D5821	۹۰	۸۰	۹۳	حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴
درصد	AASHTO T85	۲/۵	۲/۵	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
درصد	AASHTO T84	۲/۵	۲/۸	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)
gr/cm ³	ASTM C127	-	-	۲/۵۹	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت‌دانه
gr/cm ³	ASTM C128	-	-	۲/۳۲	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریزدانه

۳-۱ آزمایش مارشال (تعیین قیر بهینه)

طرح اختلاط بر اساس طرح اختلاط مارشال (ASTM D1599) است که این روش جزء روش‌های طرح اختلاط تجربی است. جهت تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف قیر تهیه می‌شود. درصد‌های انتخابی قیر ۴/۵٪، ۵٪، ۵/۵٪، ۶٪ و ۶/۵٪ هستند که در هر درصد قیر، سه نمونه ساخته می‌شود. بعد از اختلاط قیر و مصالح سنگی، نمونه در داخل استوانه استاندارد مارشال با قطر ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵/۶ سانتیمتر ریخته شده و توسط چکش مارشال کوبیده می‌گردد. تعداد ضربات لازم برای مدل کردن ترافیک عبوری سنگین، ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه است.

مقدار قیر بهینه بر اساس پارامترهای حداکثر وزن مخصوص، حداکثر مقاومت فشاری، روانی، درصد حجمی فضای خالی آسفالت متراکم شده و درصد حجمی فضای خالی مصالح سنگی در آسفالت متراکم شده به دست آمده است. در جدول ۴ مقدار قیر بهینه و مقاومت مارشال برای هر یک از نمونه قیر نشان داده شده است.

اثر آب بر مصالح پوشانده شده با قیر با استفاده از آب جوشان برای ارزیابی قابلیت عریان شدگی نمونه‌های متراکم نشده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش حدود ۲۵۰ گرم مخلوط آسفالتی متراکم نشده به مقداری آب در حال جوشیدن اضافه می‌شود و به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوشان قرار می‌گیرد و پس از این زمان ابتدا قیر عریان شده از سطح برداشته و اجازه داده می‌شود مخلوط سرد شود. نهایتاً آب را از روی مخلوط حذف و مخلوط جهت خشک شدن روی کاغذ سفیدی قرار داده می‌شود. کاهش درصد مناطق پوشش داده‌شده توسط قیر بر روی سنگدانه به دلیل قرار گرفتن در شرایط آب جوشان به عنوان معیاری برای ارزیابی آسیب رطوبتی در نظر گرفته می‌شود. این آزمایش یک روش سریع برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های متراکم نشده است که بر اساس مشاهدات بصری و به صورت کیفی است و ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی را بررسی نمی‌کند [ASTM D 3625].

۳-۳ آزمایش حساسیت رطوبتی (آزمایش کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده، AASHTO T283)

روش استاندارد AASHTO T283 (مقاومت مخلوط قیری متراکم در برابر آسیب رطوبتی) یکی از معمول‌ترین فرآیندهای آزمایشی برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. این

۳-۲ آزمایش جوشان تگزاس^۳ (ASTM D3625)

روش این آزمایش به وسیله کندی^۴ و همکاران توسعه داده شده است. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D3625 با عنوان

جدول ۴. درصد قیر بهینه و نتایج آزمایش مارشال

نوع نمونه	درصد قیر بهینه	استقامت مارشال (کیلو نیوتن)	روانی (میلی متر)
نمونه شاهد	۴/۹	۸/۷۶	۳/۳۵
	۲٪	۵/۴	۳/۷۰
CA	۴٪	۵/۵	۳/۷۷
	۶٪	۵/۶	۳/۶۴
	۲٪	۵/۲	۳/۶۲
CB	۴٪	۵/۳	۳/۶۴
	۶٪	۵/۴	۳/۴۵

t: ضخامت نمونه بر حسب میلی متر

مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت را با TSR بر حسب درصد نشان می‌دهند که بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود. مقدار ITS در رابطه ۲ مقدار میانگین برای نمونه‌های تحت شرایط اشباع و خشک است. حداقل مقدار TSR باید ۸۰ درصد باشد و هر چه مقدار TSR بالاتر باشد نشان‌دهنده مقاومت بالاتر در برابر رطوبت است.

$$TSR = \frac{ITS_{\text{اشباع}}}{ITS_{\text{خشک}}} \quad (2)$$

۳-۴ آزمایش مدول برجهنگی

یکی دیگر از آزمایش‌های تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش تعیین مدول برجهنگی در شرایط خشک و مرطوب است. آزمایش مدول برجهنگی قطری طبق استاندارد ASTM D4123-82 از مقاومت کششی غیرمستقیم با بارگذاری تکراری انجام می‌شود [Almudaiheem and Al-Sugair, 1991]. مدول ارتجاعی به دلیل اینکه حساسیت بیشتری به تغییر در ویژگی‌های قیر و مخلوط در برابر آسیب ناشی از رطوبت نسبت به مقاومت کششی دارد، مناسب برای ارزیابی حساسیت رطوبتی است [McCann and Sebaaly, 2003].

این آزمایش با دستگاه UTM 5P و بر اساس استاندارد AS 2891.13.1.1995 استرالیا و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام

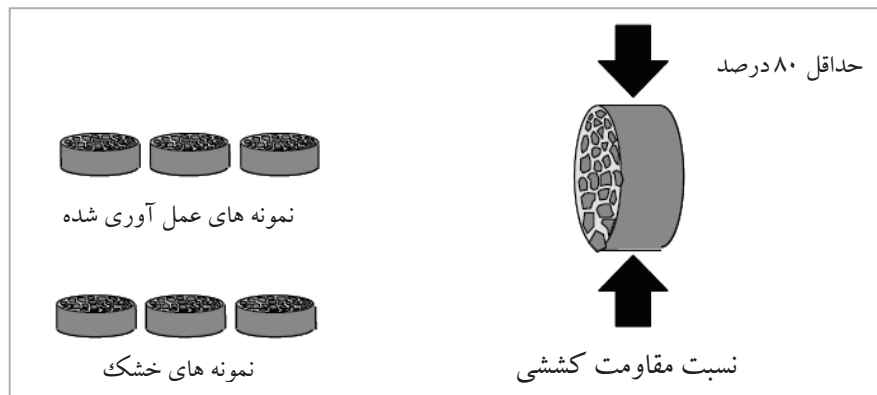
آزمون بر روی نمونه‌های متراکم شده با درصد هوای 1 ± 7 انجام می‌شود. حداقل تعداد نمونه‌ها برای هر نوع مخلوط ۶ عدد است. نیمی از نمونه‌ها باید تحت شرایط استاندارد عمل‌آوری شوند که ابتدا نمونه‌ها برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد زیر شرایط خلأ قرار می‌گیرند. نمونه‌های خلأ و اشباع‌شده، در فریزر در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد برای ۱۶ ساعت و سپس در حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت نگهداری می‌شوند. در نهایت نمونه‌های تحت شرایط قرارگرفته و نیم دیگر نمونه‌ها به درجه حرارت ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد رسانده می‌شوند. هر دو گروه نمونه‌ها برای انجام مقاومت کششی غیرمستقیم تحت بارگذاری با نرخ ثابت (۵۰ mm/min) قرار گرفته و مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه اندازه‌گیری می‌شود [NCHRP Re-283; AASHTO T283; port 444]. بعد از به دست آوردن مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌ها، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) از رابطه شماره ۱ محاسبه می‌شود. در شکل ۳ آزمایش کشش غیرمستقیم و شرایط انجام آن به صورت شماتیک ارائه شده است.

$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (1)$$

ITS: مقاومت کششی بر حسب کیلو پاسکال

P: بیشینه بار بر حسب نیوتن

D: قطر نمونه بر حسب میلی‌متر



شکل ۳. آزمایش کشش غیرمستقیم برای نمونه‌های خشک و مرطوب

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، با افزودن نانو رس به قیر، ابتدا روانی افزایش و سپس با افزایش درصد نانو رس روانی کاهش پیدا می‌کند که افزایش روانی قیر به دلیل افزایش درصد قیر بهینه با افزوده شدن نانو رس به قیر است و کاهش روانی با افزایش درصد نانو ذرات به دلیل افزایش ویسکوزیته و چسبندگی قیر اصلاح شده است. در حالت کلی افزایش روانی نمونه‌های حاوی نانو رس حاکی از تغییر شکل قطری بیشتر در لحظه گسیختگی و در نتیجه انعطاف‌پذیری بهتر است.

شده است. پارامترهای ورودی دستگاه شامل بارگذاری نیمه سینوسی با زمان بارگذاری ۰.۱ و دوره بارگذاری ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه و با ۲۵ بارگذاری اولیه و ۵ بارگذاری اصلی است. تعداد و شرایط نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع در این آزمایش دقیقاً همانند آزمایش حساسیت رطوبتی (AASHTO T283) است.

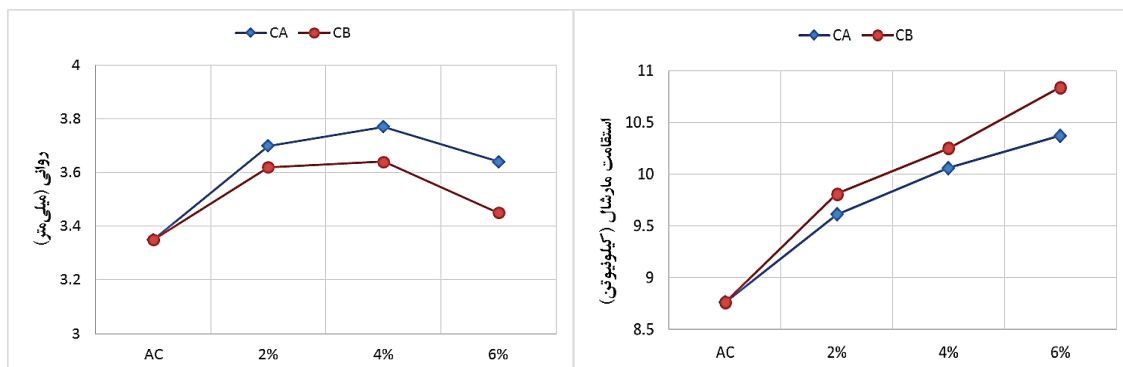
۴. نتایج و تفسیر داده‌ها

۴-۱ آزمایش مارشال

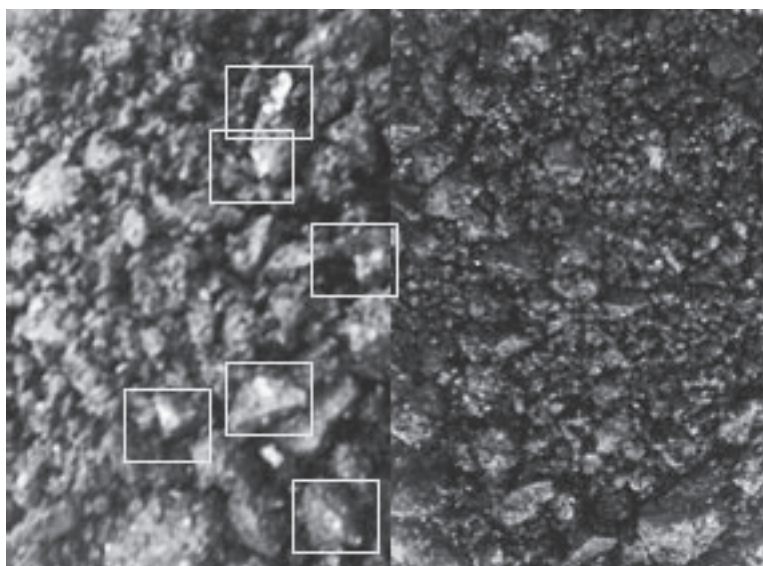
نتایج حاصل آزمایش مارشال برای تعیین اثر نوع قیر مورد ارزیابی قرار گرفت و پارامترهای مختلفی از جمله روانی و استقامت مارشال مخلوط آسفالتی بررسی گردید. با توجه به جدول ۳، با اضافه شدن انواع نانو رس بر استقامت مارشال افزوده می‌شود و علت آن بهبود در خواص قیر اصلاح شده با نانو رس به دلیل بالا بودن سطح ویژه نانو ذرات و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی بیان کرد.

۴-۲ آزمایش جوشان تگراس (ASTM D3625)

از این آزمایش برای ارزیابی بصری و سریع حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. بر اساس ارزیابی بصری نمونه‌ها و مقایسه نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش جوشان تگراس، با افزوده شدن نانو رس به مخلوط آسفالتی مقدار عریان شدگی کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۵ تصویر ارزیابی بصری نمونه قبل و بعد از آزمایش جوشان ارائه شده است.



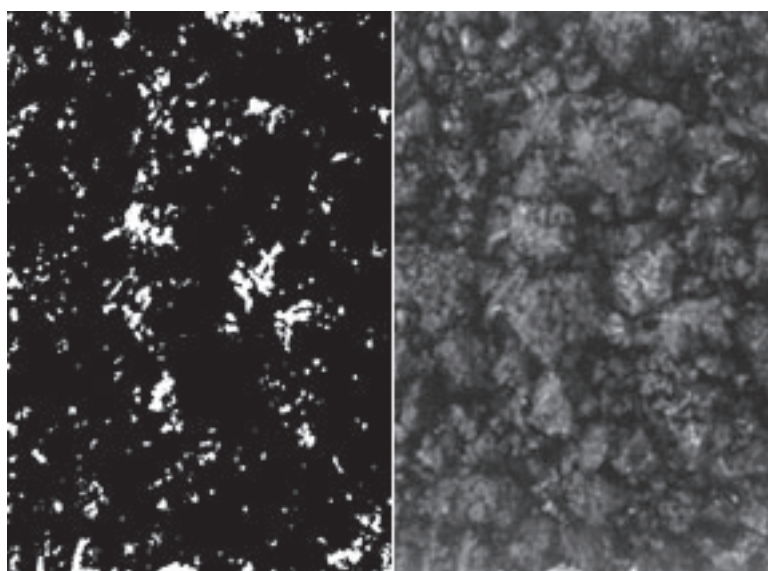
شکل ۴. استقامت مارشال و روانی مخلوط‌های آسفالتی



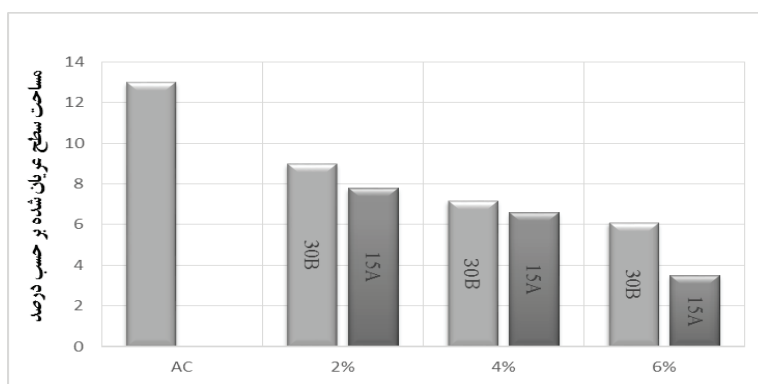
شکل ۵. تصویر نمونه قبل و بعد از آزمایش جوشان برای ارزیابی بصری

نواحی عریان شده به دست آمده است. در شکل ۷ نتایج حاصل از پردازش تصویر بر روی سطح نمونه‌ها به صورت کمی بر اساس مقدار سطح عریان شده و بر حسب درصد ارائه شده است. مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۷، نمونه مخلوط آسفالتی گرم (HMA) حاوی ۶ درصد نانو رس CA کمترین عریان شدگی و نمونه مخلوط آسفالتی شاهد دارای بیشترین مقدار عریان شدگی است. دلیل کاهش عریان شدگی با افزایش نانو رس، افزایش مقدار پوشش قیر روی سنگدانه‌ها و افزایش چسبندگی قیر حاوی نانو رس است.

نتایج حاصل از ارزیابی‌های دقیقی که توسط پردازش تصویر با نرم‌افزار MATLAB بر روی نمونه‌ها انجام گرفته، با ارزیابی‌های بصری هماهنگی خوبی دارد. در شکل ۶ پردازش تصویر انجام شده بر روی یکی نمونه‌های آزمایش جوشان تگراس نشان ارائه شده است که پیکسل‌های سفید نشان‌دهنده نواحی عریان شده (مصالح سنگی بدون قیر) و پیکسل‌های سیاه نشان‌دهنده مصالح سنگی پوشیده از قیر (یا نشانگر خود قیر) هستند. در نهایت با شمارش تعداد پیکسل‌های سفید و مشکی در تصاویر توسط نرم‌افزار، درصد



شکل ۶. تصویر پردازش شده



شکل ۷. نتایج حاصل از پردازش تصویر بر روی نمونه‌ها

آزمایش به تغییر شرایط رطوبتی نسبت به آزمایش‌های دیگر حساس‌تر است. از هر نوع مخلوط سه نمونه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین سه نمونه به عنوان عدد هر نوع مخلوط قرار داده شده است. بر اساس شکل ۱۰، با افزودن نانو رس CA مدول برجهندگی در حالت خشک و اشباع افزایش پیدا می‌کند، ولی در مخلوط‌های حاوی نانو رس CB بیشترین مدول برجهندگی در ۴ درصد اتفاق می‌افتد. مطابق شکل ۱۱ با افزودن نانو رس CA نسبت مدول برجهندگی افزایش و در ۶ درصد از این نانو رس بیشترین نسبت مدول برجهندگی یا مقاومت در برابر رطوبت اتفاق می‌افتد و با افزودن نانو رس CB نسبت مدول برجهندگی افزایش پیدا می‌کند، ولی با افزایش درصد آن در نسبت مدول برجهندگی تغییرات زیادی حاصل نمی‌شود. نتایج این آزمایش در مورد نانو رس CA هماهنگی خوبی با سایر آزمایش‌ها دارد. در مورد نانو رس CB در حالت کلی مقاومت کمتری نسبت به نانو رس CA در برابر رطوبت دارد. نتایج حاصله با سایر آزمایش‌های انجام گرفته هماهنگ است.

۵. نتیجه‌گیری

- افزودن نانو رس باعث افزایش قابل توجه درصد قیر بهینه می‌گردد و این افزایش درصد باعث پوشش بهتر قیر روی سنگدانه می‌شود.

- استفاده از نانو رس به عنوان ماده افزودنی به قیر، اثر قابل ملاحظه‌ای روی استحکام مارشال مخلوط‌های آسفالتی و

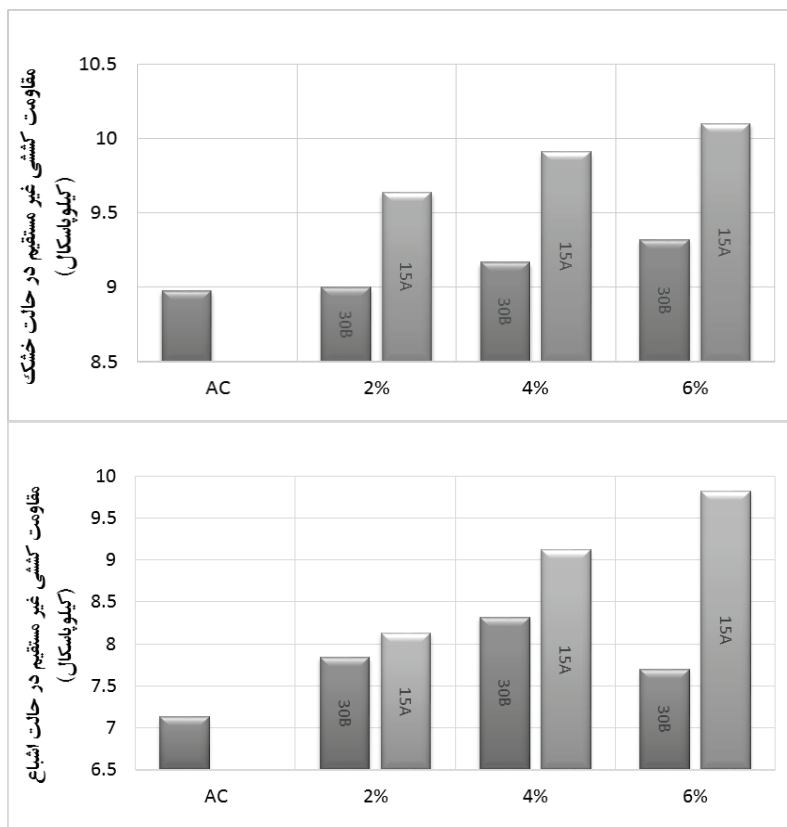
۴-۳ آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (AASHTOT283)

مطابق شکل ۸، با افزودن هر دو نوع نانو رس، مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی در حالت خشک افزایش پیدا می‌کند. در حالت اشباع مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی با افزایش درصد نانو رس CA افزایش یافته است ولی در مخلوط‌های حاوی نانو رس CB بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم در ۴ درصد اتفاق می‌افتد.

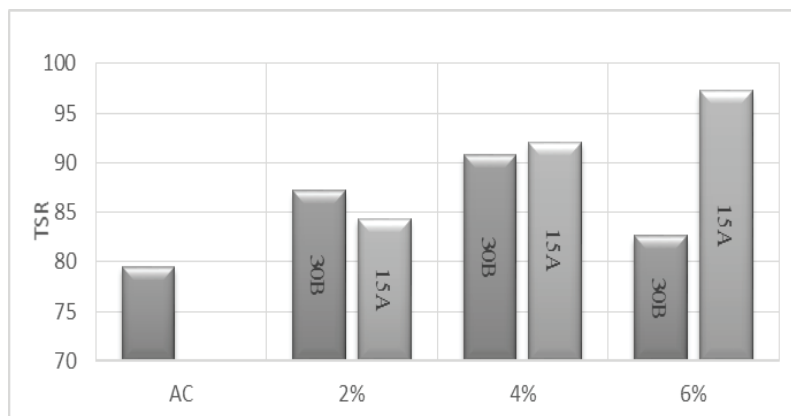
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۹ بیشترین نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت در برابر رطوبت در مخلوط‌های حاوی ۶ درصد نانو رس CA اتفاق می‌افتد که نشانگر این مطلب است که با افزایش درصد این نانو مواد، چسبندگی و پیوستگی در مخلوط‌های آسفالتی افزایش پیدا می‌کند و اجازه جابه‌جایی سریع قیر از روی سطوح سنگدانه‌ها به وسیله آب را نمی‌دهد و سبب می‌شود که مخلوط در طی چرخه‌های یخبندان و ذوب یخ مقاومت بالاتری در برابر رطوبت نسبت به سایر نمونه‌ها داشته باشد. در مخلوط‌های حاوی CB بیشترین مقاومت در برابر رطوبت در مخلوط با ۴ درصد نانو رس اتفاق می‌افتد و پس از آن با کاهش مقاومت در برابر رطوبت همراه است که دلیل آن ترکیب شیمیایی و نوع اصلاح‌کننده مورد استفاده در این نانو رس است.

۴-۴ آزمایش مدول برجهندگی

آزمایش کشش غیرمستقیم برای اندازه‌گیری مدول برجهندگی مخلوط‌های استوانه‌ای با دستگاه UTM 5P انجام شد. این



شکل ۸. مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع



شکل ۹. نسبت مقاومت کششی (TSR)

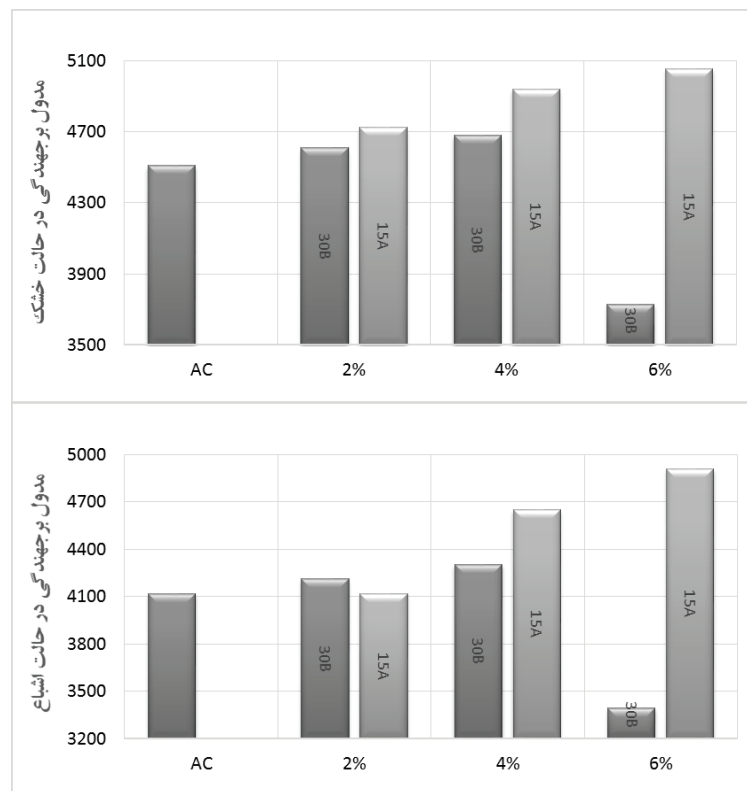
- نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نانو ذرات رس CA تا ۶٪ و نانو ذرات رس CB تا ۴٪ رفتار مخلوط‌های آسفالتی به طور قابل‌توجهی بهبود پیدا می‌کند و مقدار اصلاح‌کننده‌ها در این درصد به مقدار بهینه خیلی نزدیک است.

- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی دارای هماهنگی خوبی هستند، ولی آزمایش مدول برجهندگی حساسیت

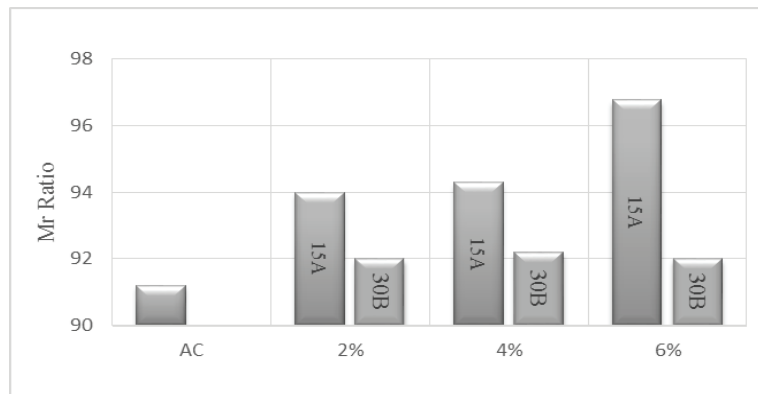
افزایش روانی این نوع مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های شاهد داشته است.

- با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های جوشان تگراس، آزمایش حساسیت رطوبتی و مدول برجهندگی مقاومت مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانو ذرات رس در برابر رطوبت و عریان شدگی به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند.

ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانو رس



شکل ۱۰. مدول برجهندگی در حالت خشک و اشباع



شکل ۱۱. نسبت مدول برجهندگی

دقت بالا و هماهنگی خوب با نتایج سایر آزمایش‌ها ارائه می‌کند. - نمونه‌های ساخته‌شده با نانو رس CA در مقایسه با CB دارای عملکرد بهتری هستند و تأثیر بیشتری بر افزایش مقاومت در برابر رطوبت دارند که دلیل آن را می‌توان تفاوت در ساختار مولکولی، ویژگی‌های فیزیکی و نوع اصلاح‌کننده به کار رفته در آنها تلقی کرد که باعث عملکرد متفاوت قیر در ویسکوزیته، چسبندگی و ... حاوی این نوع نانو رس‌ها می‌شود.

بیشتری نسبت به رطوبت دارد. همچنین در صورتی که آزمایش کشش غیرمستقیم اختلاف کمی بین مقاومت کششی در شرایط خشک و مرطوب نشان دهد، آزمایش مدول ارتجاعی یکی از روش‌های کارآمد و دقیق برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها است.

- آزمایش جوشان تگزاس یک روش ارزیابی سریع است که با استفاده از تکنیک پردازش تصویر به همراه با این آزمایش، نتایج با

Science and Engineering, Volume 35, Number 1B, pp. 89-103.

- Goh, S. W., Akin, K., You, Z. and Shi X. (2011) "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro or nano-modified asphalt mixture", Construction and Building Materials, No 25, pp. 195-200.

- Grim, R. E. (1959) "Physical-chemical properties of soils: clay minerals", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 85(SM2), pp. 1-17.

- Khattak, M. J., Khattab, A. and Rizvi, H. R. (2013) "Characterization of carbon nano-fiber modified hot mix asphalt mixtures", Construction and Building Materials, Volume 40, pp. 738-745.

- Kiggundu, B. M. and Roberts, F. L. (1988) "Striping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods", NCAT Rep. No. 88-02, National Center for Asphalt Technology, Auburn, Ala.

- Lewandowski, L. H. (1994) "Polymer modification of paving asphalt binders", Rubber Chemistry and Technology, Vol. 67, No. 3, pp. 447-480.

- McCann, M. and Sebaaly, P.E. (2003) "Resilient modulus, tensile strength, and simple shear test to evaluate moisture sensitivity and the performance of lime in hot mix asphalt mixtures", Transportation Research Board, Annual Meeting.

- National Cooperative Highway Research Program (2000) "Compatibility of a test for moisture-induced damage with superpave volumetric mix design", NCHRP Report 444, Transportation Research Board, National Academies Press Washington D.C.

- Nguyen, Quang Tran. (2007) "Process for increasing the exfoliation and dispersion of nanoclay particles into polymer matrices using supercritical carbon dioxide", Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

- Shen, D. H., Kuo, M.F. and Du, J. C. (2005) "Properties of gap-aggregate gradation asphalt mixture and permanent deformation", Construction and Building Materials, Volume 19, Issue 2, 2005, pp. 147-153.

۶. پی‌نوشت‌ها

- 1- El-Shafie et al
- 2- Neutrino
- 3- Texas Boiling Test
- 4- Kennedy et al

۷. مراجع

- طباطبایی، امیر محمد (۱۳۸۳) "روسازی راه"، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، چاپ دهم، تهران.

- Abu El-Maaty Behiry, A. E. (2013) "Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures", Ain Shams Engineering Journal, Volume 4, Issue 3, pp. 351-363.

- Almudaiheem, J. A. and Al-Sugair, F. H. (1991) "Effect of loading magnitude on measured resilient modulus of asphalt concrete mixes", Transportation Research Record, No.1317, pp. 139-144.

- American Society for Testing and Materials (2001) "Standard practice for effect of water on bituminous-coated aggregate using boiling water", ASTM D 3625 – 96.

- American Association of State Highway and Transportation Officials (1986) "Resistance of compacted bituminous mixtures to moisture induced damage", AASHTO T 283.

- Ameri, M., Mansourian, A., Aslani, S. S. and Yadollahi, G. (2011) "Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction", Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 3, pp.1379-1387.

- El-Shafie, M., Ibrahim, I. M. and And El Rahman, A. M. M. (2012) "The addition effects of macro and nano clay on the performance of asphalt binder", Egyptian Journal of Petroleum, Volume 21, Issue 2, pp. 149-154.

- Ghaffarpour, S., Andalibzade, B. and Vossough, S. (2010) "Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixture", The Arabian Journal for

ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانورس

- Xiao, F., Zhao, W., Gandhi, T. and Amirhanian, S. (2010) "Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, pp. 1047-1055

- You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J. M., Roy, S., Odegard, J. M., Dai, Q. and Goh, S. W. (2010) " Nanoclay-modified asphalt materials: preparation and characterization ", *Construction and Building Materials*, No 25, pp. 1072–1078.

