بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی افزودنی زایکوترم و درصدهای مختلف خرده آسفالت

علمی – پژوهشی

مهدی گرزی، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
محسن فلاح زواره*، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.fallah@khu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱
صفحه ۸۳-۶۷

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم و مصالح آسفالتی بازیافتی به منظور کاهش هزینه‌ها و حفظ محیط‌زیست به شدت مورد توجه قرار گرفته است. علی‌رغم مزایای زیست محیطی و اقتصادی مطرح شده درباره تکنولوژی آسفالت گرم، نگرانی از عملکرد حساسیت رطوبتی از مهم‌ترین مشکلات مخلوط‌های آسفالتی گرم می‌باشد. در این تحقیق تأثیر درصدهای مختلف تراشه‌های خرده آسفالت بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی افزودنی زایکوترم، مورد بررسی قرار گرفته است. نانو ماده زایکوترم به عنوان افزودنی شیمیایی از تکنولوژی‌های ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم و دو نوع مصالح سنگی متفاوت در برابر خرابی رطوبتی (سیلیسی و آهکی)، در این تحقیق استفاده شده‌اند. در مجموع ۴۸ نمونه مخلوط آسفالتی با درصدهای مختلف از مصالح خرده آسفالت (۰، ۱۵، ۳۰و ۴۵) مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای بررسی حساسیت رطوبتی در این تحقیق از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS) و آزمایش آب جوشان استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزودن خرده آسفالت به مخلوط آسفالتی گرم با مصالح سنگی سیلیسی و نیز آهکی، حساسیت رطوبتی مخلوط افزایش پیدا می‌کند. به طور کلی با افزودن ۴۵درصد خرده آسفالت به مخلوط‌های آسفالتی گرم ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی کاهش حدود ۱۹درصد در شاخص TSR در آزمایش ITS و کاهش حدود ۳۰درصد در پوشش سنگدانه‌ها توسط قیر در آزمایش آب جوشان و در مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی، کاهش حدود ۲۳درصد در شاخص TSR و همچنین کاهش حدود ۲۵درصد در پوشش سنگدانه‌ها توسط قیر مشاهده شد که باعث کاهش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت گرم، خرده آسفالت، حساسیت رطوبتی

۱- مقدمه

آسفالت‌های داغ در دمایی بین ۱۴۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شوند. میزان سوخت مصرفی در چنین شرایطی به علت حرارت دادن سنگ‌دانه‌ها نسبتاً زیاد بوده و در نتیجه، هزینه مصرف انرژی و میزان تولید گازهای گلخانه ای افزایش می‌یابد. آسفالت گرم یک تکنولوژی نوظهور است، که در مورد نگرانی‌ها درباره پدیده گرم شدن زمین و میزان مصرف انرژی در صنعت آسفالت، مورد استفاده قرارگرفته است. تولید آسفالت گرم اجازه می‌دهد دمای اختلاط و تراکم ۱۰تا ۳۸ درجه سانتی گراد نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ کاهش یابد. کاهش انرژی و سوخت مصرفی ناشی از دمای پایین‌تر تولید، سبب کاهش هزینه‌های تولید می‌گردد. از مهم‌ترین مزایای استفاده از مخلوط‌های آسفالتی گرم در برابر مخلوط‌های آسفالتی داغ، صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌باشد. در صورت تولید آسفالت به روش گرم، ۲۰ تا ۳۵٪

در مصرف انرژی صرفه‌جویی صورت خواهد گرفت. در روش‌های تولید آسفالتی که در آن‌ها سنگ‌دانه‌ها دارای دمایی کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند، این صرفه‌جویی تا ٪۵۰ عنوان‌شده است (بهبهانی و ایازی، ۱۳۹۳; Asphalt Institute 1989). با کاهش دما، علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، شرایط بهتری برای کارگران در محیط کار به لحاظ درجه حرارت پایین تر و انتشار مواد سمی کمتر فراهم می‌گردد. تولید آسفالت‌های گرم در دماهای پایین‌تر، سبب کاهش میزان پیرشدگی قیر و کاهش سخت‌شدگی ناشی از اکسیداسیون قیر، انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی، کاهش احتمال ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی و افزایش عمر بهره‌برداری روسازی می‌شود. علاوه بر این، مزایای دیگری مانند امکان اجرای روسازی در هوای سرد، گسترش فصول اجرای روسازی، بهبود کارایی، بازگشایی سریع‌تر ترافیک بعد از ساخت و افزایش فواصل حمل آسفالت را موجب خواهد شد (Kristjansdottir 2006). از طرفی با افزایش طول راه‌ها در کشور و لزوم تعمیر و نگهداری آن‌ها، روسازی‌هایی که دیگر توان سرویس دهی ندارند تخریب می‌شوند و روسازی‌های جدید طراحی می‌گردد. از جمله عملیات تعمیر و نگهداری حذف روکش آسفالتی قبلی و ایجاد روکش جدید است که در طی این فرایند مقدار زیادی تراشه خرده آسفالت (RAP) بر جای می‌ماند.

همچنین RAP شامل مصالح سنگی و قیر می‌باشد، از اینرو کاربرد آن باعث صرفه‌جویی در منابع طبیعی و کاهش هزینه‌ها می‌شود. از طرفی با توجه به محدودیت منابع و مصالح سنگی دست‌نخورده، استفاده از RAP می تواند جایگزین درصد بالایی از مصالح دست‌نخورده در آسفالت شود (Mallick et al. 2008). از آن جایی که مصالح خرده آسفالت دارای قیر پیر شده هستند بنابراین نباید تحت درجه حرارت‌های بالا قرار گیرند پس به نظر می رسد که در مخلوط‌های آسفالتی گرم دارای عملکرد بهتری باشند. ضمن اینکه یکی از مزیت‌های اصلی تکنولوژی آسفالت گرم نسبت به آسفالت داغ قابلیت استفاده از درصدهای بالاتر آسفالت تراشیده شده در مخلوط آسفالتی می‌باشد (ملکی طولابی و حسینی، ۱۳۹۶).

تکنولوژی آسفالت گرم با استفاده از افزودنی‌های آلی، شیمیایی ویا تکنیک کف‌زایی، ویسکوزیته قیر را کاهش می‌دهد و باعث بهبود کارایی و پوشش مصالح سنگی در دماهای پایین می‌شود. کاهش حرارت تولید و تراکم مخلوط‌های آسفالتی گرم در کنار مزایای فراوان، باعث نگرانی‌هایی در مورد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم شده است. به طوری که عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم مبهم است. محققان زیادی بر این عقیده‌اند که کاهش دمای ساخت سبب می‌شود مصالح سنگی به طور مناسب خشک نشوند و وجود رطوبت باعث عدم ایجاد پیوند مناسب بین مصالح سنگی و قیر، در نتیجه سبب خرابی رطوبتی می‌شود. علاوه بر موارد فوق به علت تناقض‌هایی که در نتایج تحقیقات گذشته درباره تأثیر آسفالت تراشیده شده بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی دیده شده به بررسی این پارامتر پرداخته شده است (Hesami et al. 2013). هدف از انجام این تحقیق ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی درصدهای مختلف تراشه‌های خرده آسفالت از لحاظ مقاومت در برابر آب و رطوبت در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی گرم بدون خرده آسفالت (نمونه‌های شاهد) با استفاده از مصالح سنگی آهکی و سیلیسی می‌باشد.

۲- پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در مورد تأثیر RAPبر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA انجام شده است و نتایج مطالعات، عملکرد مختلف و بعضاً متناقض RAP بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات برخی از محققان نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن نوع افزودنی WMA، افزودن RAP تأثیر مثبتی بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط داشته و با افزایش مقدار درصد RAP این تأثیر افزایش می‌یابد (Dinis-Almeida et al. 2016; Fakhri and Ahmadi 2017; Ayazi et al. 2017; Shu et al. 2012; Hill et al. 2013; Zhao et al. 2013). برخی نتایج نیز نشان می‌دهد بکار بردن RAP در مخلوط آسفالتی و افزایش درصد آن به دلیل افزایش ویسکوزیته قیر می‌تواند تأثیر منفی بر مقاومت رطوبتی داشته و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را تشدید می‌کند (Guo et al. 2014; Lu and Saleh 2016; Moghadas Nejad et al. 2014; Liu 2012). علاوه بر نتایج ذکر شده، نتایج تحقیقات Doyle و همکاران و همچنین Mogawer و همکاران نشان داد که استفاده از RAP ممکن است تأثیر ناچیزی بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی داشته باشد (Doyle and Howard 2013; Mogawer et al. 2013).

در سال ۲۰۱۲ لئو و همکارانش اثر درصد RAP و افزودنی‌های آسفالت گرم بر روی عملکرد آسفالت دوباره تولید شده را بررسی کردند. آن‌ها با تهیه نمونه‌های آسفالت با درصدهای ۲۰ و ۶۰ درصد از RAP و در حالت‌های بدون

افزودنی، با افزودنی ساسوبیت و افزودنی اِووترم به بررسی اثر میزان RAP بر روی خصوصیات آسفالت بازیافتی گرم پرداختند، سپس با انجام آزمایش‌های دینامیکی از جمله ویل تراک هامبورگ، پایداری دینامیکی و حساسیت رطوبتی بر روی نمونه‌ها نتیجه گرفتند که افزودن آسفالت بازیافتی (RAP) در مخلوط آسفالت جدید باعث بهبود خصوصیات دمای بالای آسفالت می‌شود اما حساسیت رطوبتی مخلوط را بالا می‌برد (Liu 2012).

۳- مصالح مصرفی

۳-۱- مصالح خرده آسفالت (RAP)

در این مطالعه، مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی درصدهای مختلف تراشه‌های خرده آسفالت (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵درصد) از لحاظ مقاومت رطوبتی مورد بررسی قرار گرفت. در انتخاب درصدهای مذکور دو ملاحظه مهم مد نظر قرار گرفت. نخست آنکه این درصدها باید به حد کافی بزرگ انتخاب می‌شد، چرا که درصدهای کمتر از موارد انتخاب شده، ممکن بود اثر مصالح خرده آسفالت بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم را به طور قابل ملاحظه‌ای نمایان نکند و نتایج تقریبا یکسانی بدست آید. از طرف دیگر انتخاب درصدهای زیاد تراشه نیز مستلزم استفاده از قیر نرم‌تر و یا استفاده از جوانساز می‌باشد (سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۸۵). با توجه به آنکه طراحی این مطالعه بر اساس مطالعه اثر خرده آسفالت با درصدهای مختلف بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) بوده است، استفاده از قیر نرم‌تر و یا استفاده از جوانساز هر دو باعث اضافه شدن متغیر جدید به مطالعه شده که کنترل اثر آنها به سادگی ممکن نخواهد نبود. لذا درصد خرده آسفالت به‌کار رفته در این مطالعه در محدوده مورد اشاره انتخاب گردید. مصالح خرده آسفالتی مورد استفاده در این مطالعه از دپو کارخانه آسفالت هادپی (های‌وی سابق) واقع در گرمدره تهیه شده است. این مصالح از بازیافت روسازی کیلومتر ۲۴ جاده مخصوص کرج که با توجه به اطلاعات گرفته شده از کارشناس بخش روسازی دارای مصالح سنگی رودخانه‌ای و قیر ۶۰/۷۰ می‌باشد، بدست آمده است. مشخصات اولیه این مصالح شامل دانه‌بندی و درصد قیر اولیه آن در ادامه آورده شده است. همچنین مشخصات قیر بازیابی شده از خرده آسفالت در جدول ۱ ارایه گردیده است.

شکل۱. تراشه‌های آسفالت مورد استفاده

۳-۲- قیر

قیر مورد استفاده در این تحقیق، از نوع قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می‌باشد که بیشترین استفاده در راهسازی را دارد و قیر متداول در صنعت راهسازی ایران محسوب می‌شود. این قیر از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده و خصوصیات آن در جدول ۲ درج گردیده است.

شکل۲. قیر مورد استفاده پس از افزودن زایکوترم

۳-۳- مصالح سنگی

در این تحقیق دو نوع مصالح سنگی با خصوصیات متفاوت در برابر خرابی رطوبتی مورد بررسی قرار گرفته است:

۱- مصالح سنگی شکسته‌شده رودخانه‌ای از جنس سیلیسی [تهیه شده از کارخانه‌ای واقع در کرج (گرمدره)]

۲- مصالح سنگی شکسته‌شده کوهی از جنس آهکی [تهیه شده از کارخانه‌ای واقع در دماوند (گیلاوند)]

خصوصیات این مصالح سنگی در جدول۳ ارایه شده است.

۳-۴- افزودنی آسفالت گرم

- **زایکوترم (Zycotherm)**

زایکوترم محصولی با فناوری نانو است که به عنوان یک افزودنی شیمیایی، دوستدار محیط‌زیست بوده و دمای تولید و تراکم مخلوط‌های آسفالتی را تا بیش از ۲۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد. این ماده یک ترکیب ارگانوسیلان است که گروه‌های سیلانول (Si-OH) تشکیل می‌دهد. زایکوترم موجب کاهش ویسکوزیته قیر شده و در نتیجه، قیر در دمای

پایین‌تری به روانی مطلوب خواهد رسید. این محصول با مقدار ۰/۱ درصد نسبت به وزن قیر برای قیرهای اصلاح نشده و ۰/۱۲۵ تا ۰/۱۵ درصد نسبت به وزن قیر برای قیرهای اصلاح شده PMB/CRMB و مخلوط‌های RAP استفاده می‌شود (Zydex 2022) که در این تحقیق از مقدار ۰/۱ درصد نسبت به وزن قیر استفاده شده است.

جدول۱. مشخصات قیر بازیابی شده از خرده آسفالت

آزمایش		استاندارد آزمایش	نتایج آزمایش
قیر باقیمانده از تقطیر	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)	ASTM – D5	۲۹
	خاصیت انگمی (سانتی‌متر)	ASTM – D113	۵۰
	نقطه نرمی (سانتی‌گراد)	ASTM – D36	۶۳/۵

جدول۲. ویژگی‌های قیر ۶۰/۷۰ مصرفی

مشخصات قیر	مقدار	استاندارد
درجه نفوذ در ۲۵درجه سانتی‌گراد (دهم میلی‌متر)	۶۳	ASTM - D5
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۴۹	ASTM - D36
چگالی گرم بر (سانتی‌متر مکعب)	۱/۰۷	ASTM - D70
شکل‌پذیری در ۲۵درجه سانتی‌گراد	+۱۰۰	ASTM - D113

جدول۳. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

خصوصیات مصالح درشت دانه							
شرح	روش آزمایش	مقدار مجاز آیین نامه		مصالح سنگی			
		حداکثر	حداقل			سیلیسی	آهکی
سایش به روش لس آنجلس (درصد)	ASTM C131	۲۵	–	۱۵/۵		۱۸/۶	
درصد شکستگی	ASTM D5821	–	۶۰	۹۷		۹۵	
درصد سنگدانه‌های پهن و دراز	ASTM D4791	۱۵	_	۲		٤	
وزن مخصوص واقعی (g/cm^3)	ASTM C127	_	_	۲/۵۰۹		۲/۷۰۵	
درصد جذب آب	ASTM C127	_	_	۲/۳۰		۰/۸٤	

خصوصیات مصالح ریزدانه						
شرح	روش آزمایش	مقدار مجاز آیین نامه		مصالح سنگی		
		حداکثر	حداقل	سیلیسی	آهکی	
دامنه خمیری PI (درصد)	ASTM D4318	N.P	N.P	N.P	N.P	
ارزش ماسه‌ای (درصد)	ASTM D2419	–	۵۰	۶۷	۷۵	
وزن مخصوص واقعی (g/cm^3)	ASTM C128	_	_	۲/۵۰۰	۲/۶۸۱	
درصد جذب آب	ASTM C128	_	_	۲/۵۵	۰/۹۷	

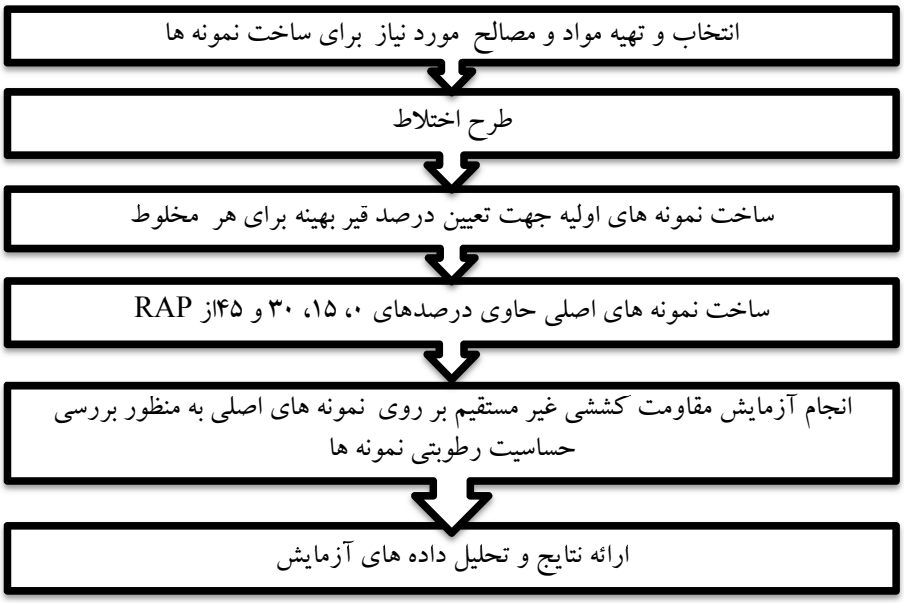
٤- روش انجام تحقیق

٤-١- طرح اختلاط

طرح اختلاط آسفالت بر اساس روش مارشال مطابق استاندارد ASTM D1559 انجام شد و درصد قیر بهینه برای مخلوط آسفالتی گرم ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی در جدول۳ درج گردیده است. دمای اختلاط و تراکم برای همه‌ی نمونه‌ها به ترتیب برابر ۱۳۵ و ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. روند کلی انجام پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.مطابق جدول٤ مشاهده می‌شود که درصد قیر مورد نیاز برای مصالح سیلیسی بیشتر از مصالح آهکی به دست آمده است که از دلایل این موضوع تفاوت در بافت و خصوصیات سطحی مصالح سنگی از جمله خلل و فرج موجود در سطح ذرات و درصد جذب آب آن‌ها می‌باشد. بدین صورت که با افزایش خلل و فرج و در پی آن افزایش جذب آب، درصد قیر بهینه نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی نیز بر درصد قیر بهینه اثرگذار بوده و با افزایش وزن مخصوص حقیقی، درصد قیر بهینه کاهش می‌یابد (گلچین و میرزایی، ۱۳۹۵). مطابق جدول ۳ در این مطالعه، درصد جذب آب مصالح سیلیسی بیشتر از مصالح آهکی بوده و همچنین مصالح سیلیسی، وزن مخصوص حقیقی کمتری را نسبت به مصالح آهکی دارا می‌باشد و لذا افزایش مقدار قیر بهینه در این مصالح نسبت به مصالح آهکی قابل توجیه است.

جدول ٤. درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی در درصدهای مختلف RAP

درصد RAP	۰	۱۵	۳۰	٤۵
درصد قیر بهینه برای مخلوط سیلیسی	۵/٦	۵/۳	٤/۵	٤
درصد قیر بهینه برای مخلوط آهکی	٤/۵	۳/۸	۲/۹	۲/۳



شکل ۳. روند کلی انجام پژوهش

برای تعیین مقدار قیر RAP از روش جداسازی (Extraction) توسط دستگاه سانتریفیوژ استفاده شد که نتایج آن در جدول۵ ارایه گردیده است. در این آزمایش از بنزین به عنوان حلال استفاده شد. مجموعا ٤ نمونه تقریباً ۵۰۰ گرمی از مصالح خرده آسفالتی در هر مرحله آزمایش شد که به طور متوسط درصد قیر مصالح خرده آسفالتی ٤/۸ به دست آمد.

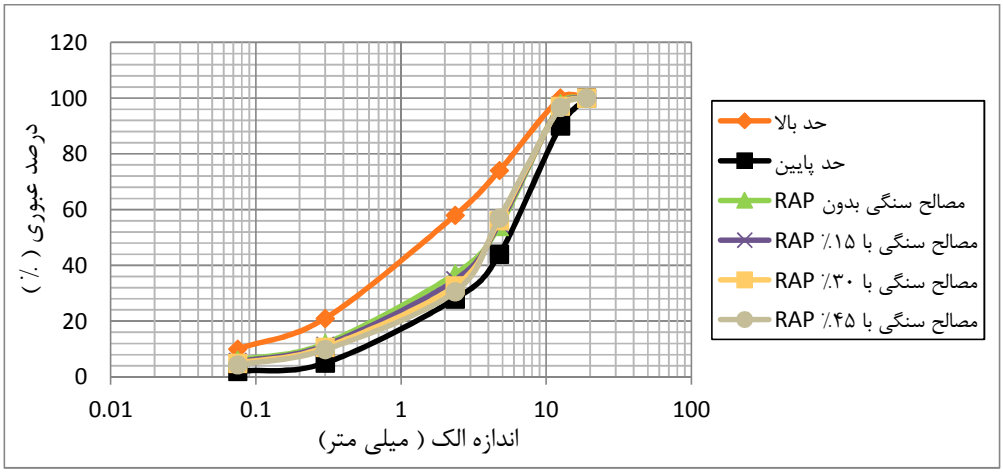
نتایج به دست آمده از این آزمایش برای هر چهار نمونه در جدول۵ درج گردیده است. پس از تعیین مقدار قیر RAP، مصالح خرده آسفالت و مصالح سنگی جدید دانه‌بندی شدند. دانه‌بندی مصالح سنگی با درصدهای مختلف خرده آسفالت در در شکل‌های ۵ الی ۷ نشان داده شده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش جداسازی و تعیین درصد قیر خرده آسفالت

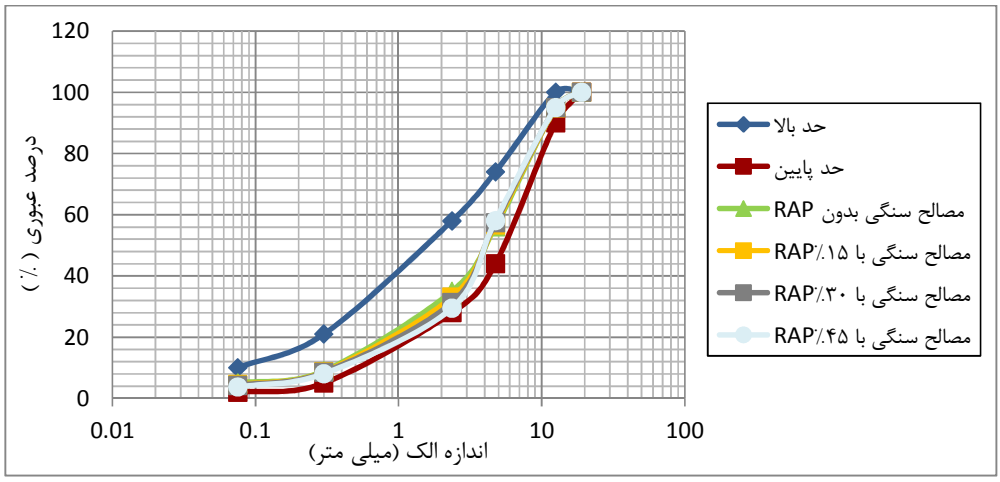
شماره نمونه	وزن مصالح خرده آسفالت و ظرف آزمایش A = (گرم)	وزن مصالح و ظرف پس از آزمایش B = (گرم)	وزن ظرف آزمایش C =(گرم)	درصد قیر ٪ = $\frac{A-B}{A-C}$
۱	۲۷٦۷/۵	۲۷٤۳	۲۲٦۲/۵	٤/۸
۲	۲۷۸۱/۷	۲۷۵۵/۱	۲۲٦۰/۹	۵/۱
۳	۲۷٦۳	۲۷۳۹/۵	۲۲٦۲/۲	٤/۷
٤	۲۸۰۰/٦	۲۷۷٦/۳	۲۲٦۳/٤	٤/۵
میانگین				**٤/۸**

شکل ٤. جداسازی و تعیین مقدار قیر خرده آسفالت با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ

شکل ٥. نمودار دانه‌بندی تراشه‌های خرده آسفالت (RAP)



شکل ٦. دانه‌بندی مصالح سنگی سیلیسی با درصدهای مختلف تراشه آسفالت



شکل ۷. دانه‌بندی مصالح سنگی آهکی با درصدهای مختلف تراشه آسفالت

شکل۸. نحوه قرارگیری نمونه‌ها داخل فک بارگذاری

شکل ۹. ایجاد ترک اولیه و تقسیم نمونه به دو نیم استوانه پس از اعمال بار

با توجه به شکل‌های ۵، ٦ و۷، ملاحظه می‌شود که دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی و مصالح سنگی جدید (اعم از آهکی و سیلیسی) بین دو حد دانه‌بندی شماره ٤ نشریه ۲۳٤ قرار دارد. سعی شده است که حتی‌الامکان از دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی به عنوان پایه استفاده شود تا برای درصدهای مختلف RAP تغییری در دانه‌بندی نمونه‌های مختلف ایجاد نشود.

٤-۲- ارزیابی حساسیت رطوبتی نمونه‌ها

از جمله خرابی‌های متداول ایجاد شده توسط حساسیت رطوبتی می‌توان به عریان‌شدگی و چاله‌ها اشاره نمود. با توجه به درجه حرارت تولید کمتر در مخلوط‌های آسفالت گرم این خرابی در این مخلوط‌ها بحرانی‌تر شده و جزء مشکلات بالقوه آن‌ها می‌باشد. بنابراین ارزیابی عملکرد این خرابی بسیار ضروری می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی و ارزیابی حساسیت رطوبتی نمونه‌ها آزمایش کشش غیر مستقیم (ITS) بر اساس استاندارد AASHTO T283 و آزمایش آب جوشان (ASTM D3625) انجام گرفته است. روش انجام آزمایش کشش غیر مستقیم بدین صورت است که نمونه‌های آزمایش به دو دسته نمونه‌های خشک و اشباع تقسیم می‌شوند. به منظور اعمال شرایط اشباع، ابتدا نمونه‌ها به سطح اشباع ۷۰ الی ۸۰ درصد رسیده، سپس به مدت ١٦ ساعت در

دمای ۱۸- سانتی‌گراد و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. در نهایت همه‌ی نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شوندو بعد از آن آزمایش کشش غیر مستقیم با اعمال بارگذاری با نرخ ثابت ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه۵۰ انجام شده است. مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS) و نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم (TSR) از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$S_t = \frac{2000P}{\pi tD} \quad (1)$$

S_t: مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب کیلوپاسکال

P: حداکثر بار وارده بر حسب N ، D : قطر نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر،

t : ضخامت نمونه‌ها بر حسب میلی متر

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} * 100 \quad (2)$$

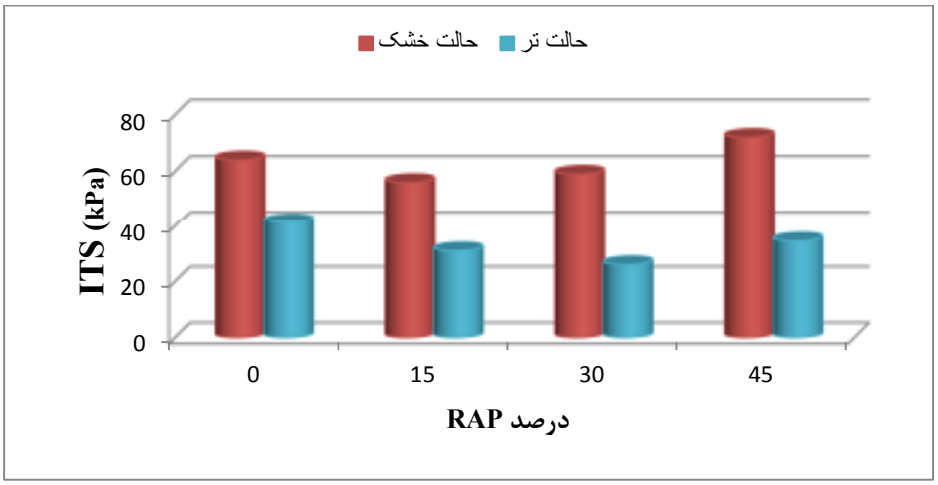
TSR : نسبت مقاومت کششی ، S_2: مقاومت کششی متوسط اشباع ، S_1: مقاومت کششی متوسط خشک

روش انجام آزمایش آب جوشان نیز بدین صورت است که مصالح سنگی و قیر با هم مخلوط شده و وقتی همه مصالح سنگی پوشیده از قیر شدند، در همان دمای اتاق قرار می‌گیرند تا کاملاً هم دما با محیط شوند. سپس مخلوط حاصل در آب جوش به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده می‌شوند. بعد از این مرحله مخلوط را خشک نموده و به صورت چشمی درصدی از کل سطوحی از مصالح سنگی که پوشش قیری روی آنها باقیمانده است تخمین زده می‌شود. برای تحلیل و مقایسه نتایج این آزمایش، نمونه‌ها پس از آزمایش به صورت چشمی اما با دقت کافی مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان پوشش قیر سنگدانه‌ها نسبت به یک نمونه شاهد مقایسه و درصد تغییر پوشش قیر به طور تقریبی تعیین و گزارش می‌شود. این آزمایش یک روش مقدماتی برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بوده و در آن هیچ نوع بررسی مقاومتی صورت نمی‌گیرد.

۵- نتایج و تحلیل

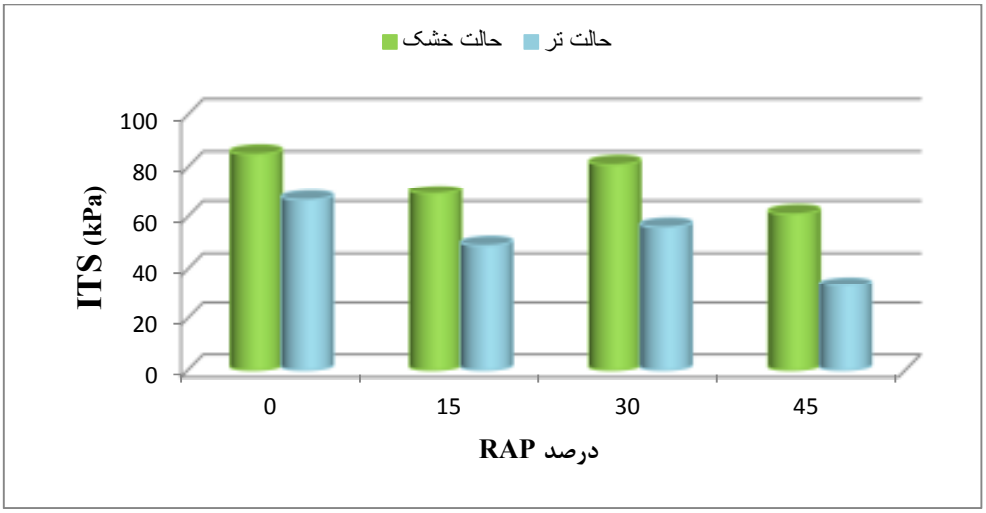
۵-۱- نتایج آزمایش ITS

نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک و اشباع برای مخلوط آسفالت گرم حاوی افزودنی زایکوترم با مصالح سیلیسی و آهکی در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. مقاومت کششی غیر مستقیم برای مصالح سیلیسی با درصدهای مختلف RAP

مطابق شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که مقاومت کششی غیر مستقیم آسفالت گرم حاوی مصالح سیلیسی به طور کلی با افزایش مقدار خرده آسفالت هم در حالت خشک و هم اشباع، کاهش می‌یابد. که علت آن افزایش ویسکوزیته قیر مخلوط به سبب افزایش مقدار RAP و در نتیجه عدم توانایی قیر در چسبندگی و پوشش مصالح می‌باشد که نهایتاً منجر به گسیختگی مخلوط می‌گردد.

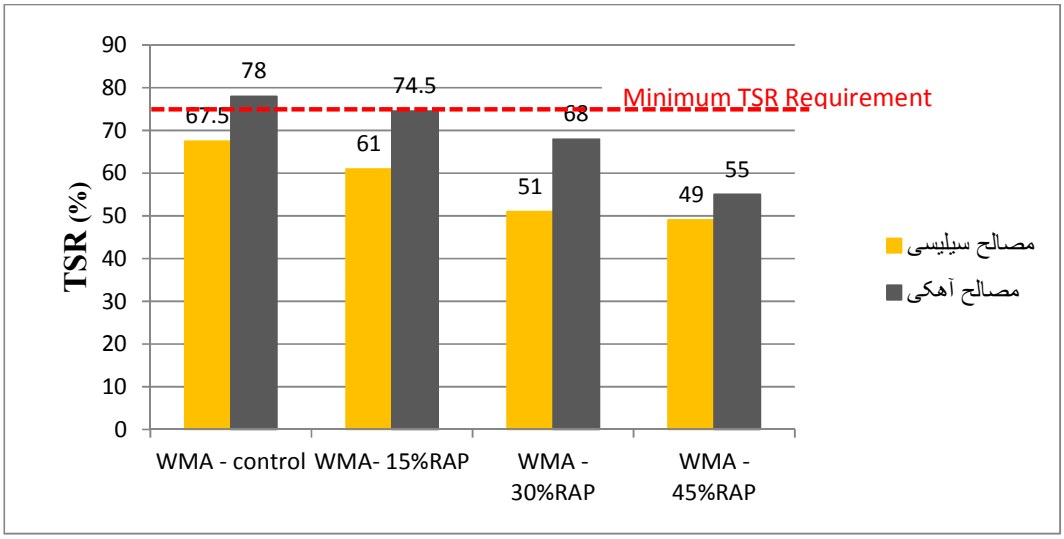


شکل ۱۱. مقاومت کششی غیر مستقیم برای مصالح آهکی با درصدهای مختلف RAP

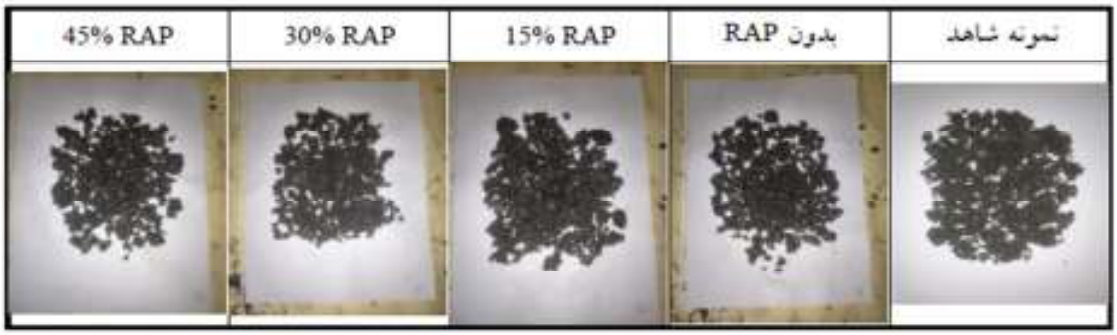
با مشاهده نتایج ITS مخلوط آهکی در حالت خشک و اشباع، به طور کلی با افزایش مقدار خرده آسفالت مقاومت کششی غیر مستقیم در دو حالت کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار، در حالت خشک با افزودن ۱۵ درصد خرده آسفالت، مقاومت کششی مخلوط کاهش یافته و در درصدهای بین ۱۵ تا ۳۰ درصد تغییر مقاومت ناچیز بوده و پس از آن مجددا با افزودن RAP تا حدود ۴۵ درصد نمودار روند کاهشی خود را حفظ کرده و مقاومت کششی غیر مستقیم به پایین‌ترین مقدار خود می‌رسد. در حالت اشباع نیز افزودن RAP منجر به کاهش مقاومت کششی شده است. از آنجایی که قیر موجود در مصالح RAP دچار پیرشدگی شده است و بسیاری از خواص چسبندگی و انعطاف پذیری خود را از دست داده است در برابر رطوبت کاهش مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهد

و این امر دلیل پایین‌تر بودن مقاومت کششی مخلوط حاوی RAP در حالت اشباع است.

همانطور که مشاهده شد در هر دو مخلوط آسفالت گرم با مصالح سیلیسی و آهکی، افزودن خرده آسفالت (RAP) به هر میزان موجب کاهش نسبت مقاومت کششی (TSR) و در نتیجه افزایش حساسیت رطوبتی شده است. که علت آن این است که با افزایش خرده آسفالت و با توجه به اینکه قیر مصالح خرده آسفالتی به شدت سخت بوده، نهایتاً منجر به افزایش ویسکوزیته قیر نهایی مخلوط و پدیده سخت‌شدگی قیر می‌گردد. لازم به ذکر است که منظور از ویسکوزیته چسبندگی نبوده بلکه سفتی و سختی قیر می‌باشد. اکسیداسیون قیر پیر شده باعث تبدیل روغن‌ها به رزین‌ها و رزین‌ها به آسفالتین‌ها می‌شود. این پدیده باعث سخت‌تر شدن قیر و ویسکوزیته بالای آن می‌شود. با افزایش ویسکوزیته، قیر حالت روانی خود را از دست داده و باعث می‌شود نتواند سطح سنگدانه‌ها را به طور مطلوب پوشش دهد و در نتیجه عدم چسبندگی و پوشش مناسب باعث گسیختگی و شکست مخلوط آسفالتی به ویژه در حضور آب می‌شودکه نهایتا منجر به تشدید حساسیت رطوبتی مخلوط می‌گردد. همچنین با توجه به این که روسازی‌های آسفالتی تراشیده شده قبلا در معرض انواع شرایط جوی، آب و یخبندان، مواد شیمیایی و ... بوده‌اند، ممکن است مقاومت خرده‌های آنها در برابر رطوبت کمتر از مصالح دست‌نخورده و جدید باشد. ضمن اینکه مصالح پایه موجود در خرده آسفالت مصرفی در این پژوهش از جنس سیلیسی بوده و می‌تواند مزید بر علت باشد. لذا این کاهش مقاومت رطوبتی با توجه به این مطالب توجیه پذیر است. در شکل ۱۲ نتایج TSR هر دو مخلوط آهکی و سیلیسی برای مقایسه حساسیت رطوبتی بین این دومخلوط ارایه شده است.



شکل ۱۲. مقایسه حساسیت رطوبتی (TSR) مخلوط‌های گرم آهکی و سیلیسی



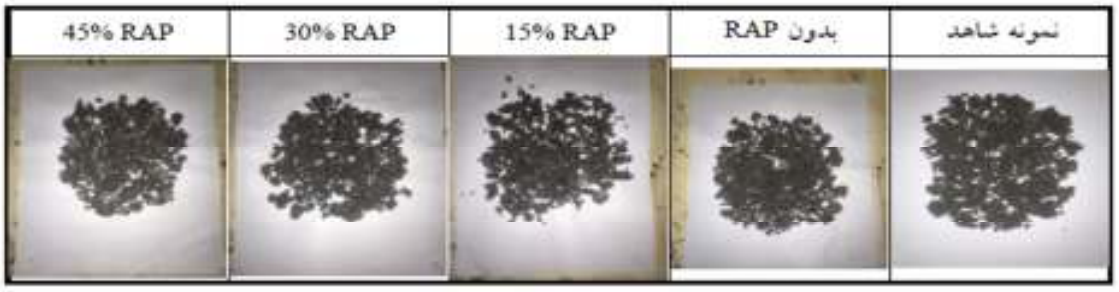
شکل ۱۳. تاثیر RAP بر روی درصد پوشش قیر در تست آب جوشان برای مخلوط سیلیسی

مطابق شکل ۱۱، به طور کلی مقادیر TSR مخلوط با مصالح آهکی بیشتر از این مقادیر در مخلوط با مصالح سیلیسی است و مخلوط‌های سیلیسی کمترین مقدار TSR را به خود اختصاص داده‌اند. در نتیجه حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم (WMA) با مصالح آهکی کمتر از مخلوط گرم با مصالح سیلیسی است. با در نظر گرفتن حداقل مقدار ۷۵٪ برای شاخص TSR (مطابق با نشریه‌ی ۲۳٤ ایران)، مشخص می‌شود که همه‌ی مخلوط‌های آسفالتی گرم ساخته شده با مصالح سیلیسی به همراه درصدهای ۰، ۱۵، ۳۰ و ٤۵ از خرده آسفالت به علت وجود مقادیر بالای سیلیس و آب‌دوست بودن سیلیس، حساسیت بالایی در برابر رطوبت دارندو حداقل مجاز آیین نامه را تأمین نکرده‌اند. اما در مخلوط‌های ساخته شده با مصالح آهکی، نمونه شاهد (بدون RAP) و نمونه ساخته شده با ۱۵ درصد RAP، حداقل مجاز آیین‌نامه را تأمین کرده و در درصدهای بالاتر RAP، مقدار TSR کمتر از حد مجاز دارند.

بنابراین، درصد بهینه خرده آسفالت برای این نوع مخلوط‌ها ماکزیمم ۱۵ درصد تخمین زده می‌شود (با در نظر گرفتن شرایط موجود در این پژوهش).

۵-۲- نتایج آزمایش آب جوشان

نتایج میزان پوشش قیر پس از آزمایش آب جوشان برای مخلوط آسفالت گرم با مصالح سیلیسی و آهکی بر حسب درصدهای مختلف خرده آسفالت در شکلهای ۱۳ و ۱٤ نمایش داده شده است. با توجه به نتایج این آزمایش مشاهده شد که میزان پوشش قیر سنگدانه‌ها در تست آب جوشان در اثر افزودن خرده آسفالت بازیافتی کاهش می‌یابد. میزان کاهش پوشش به طور تقریبی ۲۰ درصد بوده است. کاهش پوشش قیر نیز با افزودن RAP به مقدار ۳۰ درصد به بالا ثابت و تغییری در پوشش قیر با افزایش درصد RAP به ٤۵ درصد مشاهده نشده است. با مقایسه نتایج این آزمایش با آزمایش کشش غیر مستقیم می‌توان به سازگاری نتایج برای مخلوط آسفالت گرم با مصالح سیلیسی پی برد.



شکل ۱٤. تاثیر RAP بر روی درصد پوشش قیر در تست آب جوشان برای مخلوط آهکی

با توجه به نتایج آزمایش، میزان پوشش قیر در مخلوط آسفالتی بعد از تست آب جوشان کاهش یافته است و این کاهش با افزایش درصد خرده آسفالت بیشتر شده است به طوری که با افزودن مقدار ٤۵ درصد RAP به مخلوط آسفالتی گرم با مصالح آهکی، مقدار پوشش قیر در حدود ۲۵ درصد کاهش یافته است.

میزان کاهش پوشش قیر با افزایش خرده اسفالت تقریبا خطی بوده و در نتیجه هر چه مقدار RAP بیشتر باشد پوشش قیر در تست آب جوشان با نرخ بالاتری کاهش می‌یابد. نتایج این بخش نیز با نتایج تست کشش غیر مستقیم تطابق نسبی دارد که صحت آزمایشات و تحلیل نتایج را نشان می‌دهد.

٦- نتیجه‌گیری

بعد از انجام آزمایش‌ها بر روی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی RAP و تهیه شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر نتایج زیر حاصل گردید:

-با توجه به نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (AASHTO T283) و آب جوشان (ASTM D3625)، افزودن خرده آسفالت (RAP) به آسفالت گرم (WMA) ساخته شده با مصالح سیلیسی و نیز آهکی، موجب کاهش مقاومت رطوبتی و به تعبیر دیگر موجب افزایش حساسیت رطوبتی می‌شود.

-همه‌ی نمونه‌های آسفالت گرم ساخته شده با مصالح سیلیسی حاوی افزودنی زایکوترم مقدار TSR کمتر از حد مجاز آیین‌نامه (حداقل ۷۵٪) دارند (حتی نمونه شاهد یعنی بدون RAP). بنابراین، به طور کلی حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها نامطلوب ارزیابی شد.

-به طور کلی مقادیر TSR مخلوط با مصالح آهکی بیشتر از این مقادیر در مخلوط با مصالح سیلیسی مشاهده شد و مخلوط‌های سیلیسی کمترین مقدار TSR را به خود اختصاص دادند. در نتیجه مخلوط آسفالتی گرم (WMA) با مصالح آهکی کمتر از مخلوط گرم با مصالح سیلیسی به رطوبت حساس می‌باشد.

-در حالت کلی می‌توان گفت، درصد استفاده از RAP، نوع افزودنی WMA، دمای اختلاط و تراکم و نوع سنگدانه مورد استفاده ازجمله مواردی هستند که بر مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی ساخته شده با RAP تأثیر بسزایی داشته و موجب عملکرد متفاوت RAP بر روی حساسیت مخلوط آسفالتی WMA می‌شوند. در این تحقیق برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم استفاده شده است.

با این حال بارگذاری‌های دینامیکی به جهت مطابقت بیشتر با شرایطی که نمونه‌ها در عمل تجربه می‌کنند، نتایج منطقی‌تری را ارایه می‌دهند. در این مطالعه به دلیل محدودیت‌ها در دسترسی به تجهیزات آزمایشگاهی مذکور امکان انجام آزمایشهای بارگذاری دینامیکی مقدور نگردید و این موضوع می‌تواند در تحقیقات آتی مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

۷-مراجع

-بهبهانی، ح.، ایازی، م.، (۱۳۹۳)، "بررسی آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم حاوی خرده آسفالت"، ششمین همایش ملی قیر وآسفالت ایران، تهران، وزارت راه و شهرسازی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و معاونت فنی و عمرانی شهرداری تهران.

-سازمان برنامه و بودجه، (۱۳۸۵)، "مشخصات فنی و اجرایی بازیافت گرم آسفالت" نشریه شماره ۳٤۱، چاپ اول.

-گلچین، ب. و میرزایی، ا. ع.، (۱۳۹۵)، "بررسی اثر مشخصات فنی مصالح سنگی در کاهش مقدار قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی"، هشتمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی – شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک.

-ملکی طولابی، ح.، حسینی، ع.، (۱۳۹٦)، "بررسی تأثیر درصدهای مختلف RAP بر عملکرد حساسیت رطوبتی و شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی WMA حاوی الیاف شیشه"، اولین کنفرانس بین‌المللی پیشرفت‌های نوین در مهندسی عمران، آمل، دانشگاه شمال، معاونت فرهنگی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.

-Ayazi, Mohamad Javad, Ali Moniri, and Peyman Barghabany, (2017), "Moisture Susceptibility of Warm Mixed-Reclaimed Asphalt Pavement Containing Sasobit and Zycotherm Additives", Petroleum Science and Technology 35 (9), pp. 890–95. https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1290655.

- Dinis-Almeida, Marisa, João Castro-Gomes, Cesare Sangiorgi, Salah E. Zoorob, and Márcia Lopes Afonso, (2016), "Performance of Warm Mix Recycled Asphalt Containing up to 100% RAP", Construction and Building Materials 112 (June), pp.1–6. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.108.

- Doyle, Jesse D., and Isaac L. Howard, (2013), "Rutting and Moisture Damage Resistance of High Reclaimed Asphalt Pavement Warm Mixed Asphalt: Loaded Wheel Tracking vs. Conventional Methods", Road Materials and Pavement Design 14 (sup2), pp. 148–72. https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812841.

- Fakhri, Mansour, and Amin Ahmadi, (2017), "Recycling of RAP and Steel Slag Aggregates into the Warm Mix Asphalt: A Performance Evaluation", Construction and Building

Journal of Civil Engineering 43 (4), pp. 343–50. https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0454.
-Mallick, Rajib B., Prithvi S. Kandhal, and Richard L. Bradbury, (2008), "Using Warm-Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement Material in Asphalt Mixtures", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2051 (1), pp.71–79.
https://doi.org/10.3141/2051-09.
-Mogawer, Walaa, Alexander Austerman, Louay Mohammad, and M. Emin Kutay, (2013), "Evaluation of High RAP-WMA Asphalt Rubber Mixtures", Road Materials and Pavement Design 14 (sup2), pp. 129–47.
https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812846.
-Moghadas Nejad, Fereidoon, Alireza Azarhoosh, Gholam Hossein Hamedi, and Hossein Roshani, (2014), "Rutting Performance Prediction of Warm Mix Asphalt Containing Reclaimed Asphalt Pavements", Road Materials and Pavement Design 15 (1): pp.207–19. https://doi.org/10.1080/14680629.2013.868820.
-Shu, Xiang, Baoshan Huang, Emily D. Shrum, and Xiaoyang Jia., (2012), "Laboratory Evaluation of Moisture Susceptibility of Foamed Warm Mix Asphalt Containing High Percentages of RAP." Construction and Building Materials 35 (October): pp.125–30.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.095.
-Zhao, Sheng, Baoshan Huang, Xiang Shu, and Mark Woods, (2013), "Comparative Evaluation of Warm Mix Asphalt Containing High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement", Construction and Building Materials 44 (July), pp. 92–100.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010.
-Zydex., (2022), "Odor Free Antistrip and Warm Mix Technology." https://zydexindustries.com.
Materials 147 (August), pp.630–38. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.117.
-Guo, Naisheng, Zhanping You, Yinghua Zhao, Yiqiu Tan, and Aboelkasim Diab, (2014), "Laboratory Performance of Warm Mix Asphalt Containing Recycled Asphalt Mixtures." Construction and Building Materials 64 (August), pp.141–49.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.002.
-Hesami, Saeid, Hossein Roshani, Gholam Hossein Hamedi, and Alireza Azarhoosh. (2013), "Evaluate the Mechanism of the Effect of Hydrated Lime on Moisture Damage of Warm Mix Asphalt", Construction and Building Materials 47 (October), pp.935–41. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.079.
-Hill, Brian, Behzad Behnia, William G. Buttlar, and Henrique Reis, (2013), "Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement through Mechanical Performance Tests and an Acoustic Emission Approach", Journal of Materials in Civil Engineering 25 (12), pp.1887–97. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000757.
-Kristjansdottir, Olof., (2006), "Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving", Master Thesis, University of Washington, Seattle. https://trid.trb.org/view/859234.
-Liu, Wei, (2012), "RAP Percentage and Warm Mix Additive Influence on Regenerated Asphalt Mixture Performance", Applied Mechanics and Materials 251 (December): pp.436–41. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.251.436.
-Lu, Xuan Dai, and Mofreh Saleh, (2016), "Evaluation of Warm Mix Asphalt Performance Incorporating High RAP Content", Canadian

Moisture Susceptibility of WMA Containing Zycotherm and RAP

Mehdi Gorzi, M.Sc., Grad., Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.
Mohsen Fallah Zavareh, Assistant Professor, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

E-mail: m.fallah@khu.ac.ir

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT
In recent years, the use of warm asphalt technology and reclaimed asphalt pavement (RAP) has been extensively used to reduce the costs of pavement construction, as well as to protect the environment. Nonetheless, concern about moisture susceptibility is an important issue related to warm asphalt mixtures. In this study, we examined the effect of different percentages of RAP on the moisture susceptibility of warm asphalt mixtures containing Zycotherm as a nano-chemical additive. Two types of aggregates including siliceous and calcareous minerals (which have been shown to be having different performance characteristics against moisture damages) were used in the production of warm asphalt mixtures. A total of 48 samples of asphalt mixture containing different percentages (15, 30 and 45 percent) of RAP were evaluated. Indirect tensile strength test (ITS) and Texas boiling test were carried out to investigate the moisture susceptibility of samples. Results demonstrated that addition of RAP to both types of aggregates increased the moisture susceptibility of the mixture. Experiments showed that adding 45 percent of RAP resulted in 19 and 23 percent reduction in TSR for the mixtures containing siliceous and calcareous aggregates, respectively, which was corresponding to 30 and 25 percent stripping of aggregate-asphalt mixtures in siliceous and calcareous aggregates, respectively.

Keywords: Warm Mix Asphalt, Reclaimed Asphalt Pavement, Moisture Susceptibility