

ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر افزودنی نیمه گرم زئولیت طبیعی بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با رویکرد زیست محیطی

مقاله علمی - پژوهشی

آذین چیت سazan*، گروه ارزیابی و آمایش سرزمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Chitsazan.az@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۱۲-۱

چکیده

در چند دهه گذشته، مخلوط آسفالت نیمه گرم^۱ به عنوان یک فناوری پیشرفته جایگزین برای آسفالت مخلوط گرم^۲ به دلیل دماهای نسبتاً پایین مورد نیاز برای گرم کردن آسفالت در فرآیند تولید و اجرا، کاهش آسیب محیطی را در حالی که مزایای آسفالت مخلوط گرم را حفظ می‌کند، به چشم می‌خورد. با این حال، دماهای پایین تولید و اجرا ممکن است منجر به خرابی آسفالت در برابر رطوبت شود. هدف این مطالعه ارزیابی ویژگی‌های آسفالت حاوی زئولیت طبیعی و مقایسه آن با زئولیت مصنوعی و افزودنی‌های آلی و شیمیایی مخلوط آسفالت نیمه گرم در مقابل خرابی در برابر رطوبت بود. خواص مقاومتی نمونه‌ها در برابر حساسیت رطوبتی با استفاده از آزمایش‌های عریان شدگی نیکلسون و آزمایش لاتمن اصلاح شده ارزیابی شدند.

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح شده، زئولیت طبیعی، خواص عملکردی، زئولیت مصنوعی، حساسیت رطوبتی، افزودنی شیمیایی نیمه گرم

۱- مقدمه

اشاره می‌شود (Fromm, 1974; Kandal, Lubold, & Roberts, 1989; Taylor & Khosla, 1983). مقاومت کاهش می‌یابد، زیرا مخلوط دیگر به عنوان یک واحد ساختاری یکپارچه عمل نمی‌کند. از بین رفتن اتصال مقاومت چسبندگی قیر را از بین می‌برد. آب ممکن است از طریق نفوذ در لایه‌های قیر و ورود مستقیم به مصالح سنگی بین پیوند قیر و مصالح سنگی قرار گیرد (Stuart, 1990). آب می‌تواند با پنج مکانیزم مختلف از جمله جداشدگی، جابجایی، امولسیفیکاسیون خودبخودی، فشار منفذ و شستشوی هیدرولیک را سبب عریان شدگی گردد. تعدادی متغیر بر میزان خسارت رطوبتی که در آسفالت مخلوط رخ می‌دهد، تأثیر می‌گذارند. برخی از این متغیرها مربوط به مواد تشکیل‌دهنده آسفالت هستند، مانند خصوصیات فیزیکی و ترکیب مواد معدنی و خصوصیات شیمیایی، نوع و سختی قیر، منبع خام

عوامل محیطی مانند دما، هوا و آب می‌توانند تأثیر بسزایی بر روی مقاومت مخلوط آسفالت داشته باشند. در شرایط آب و هوایی معتدل که مواد معدنی و قیر با کیفیت خوب در دسترس هستند، بارگذاری ترافیکی بزرگترین عامل خرابی می‌باشد و این خرابی با ایجاد ترک خستگی، شیارشدگی (تغییر شکل دائمی) و شن زدگی (Terrel & Al-Swailmi, 1994) مشاهده می‌شود. با این حال، وقتی شرایط آب و هوایی سختی وجود دارد، این تنش‌ها با استفاده از مواد ضعیف، کنترل ناکافی، ترافیک و آب افزایش می‌یابند که عوامل کلیدی در خرابی روسازی‌های مخلوط آسفالتی داشته باشند. آب سبب از بین رفتن اتصال بین قیر و مصالح سنگی می‌شود (Thomas, McKay, & Branthaver, 2006). این نقص پیش از موعد در چسبندگی معمولاً به عنوان عریان شدگی در روسازی‌های مخلوط آسفالت

بلوری شدن، سفتی قیر افزایش می‌یابد و مقاومت آسفالت در برابر تغییر شکل بهتر می‌شود. افزودنی‌های شیمیایی ترکیبی از عوامل امولسیفایر، پلیمرها و افزودنی‌ها هستند که برای بهبود قابلیت کار، تراکم و چسبندگی استفاده می‌شوند (Kvasnak et al, 2009). استفاده از آب برای آسفالت نیمه گرم به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود: در واقع تزریق مستقیم آب به قیر و استفاده از مواد معدنی هیدروترمالی بلوریده مانند ژئولیت. ژئولیت مصنوعی، سیلیکات آلومینیم سدیم هیدراته‌ای است که به صورت هیدروترمالی بلوریده می‌شود و حاوی ۱۸-۲۲٪ (به وزن) آب است. به طور نظری، ژئولیت آب را آزاد می‌کند و ایجاد کف آبی که ویسکوزیته را کاهش و قابلیت کارایی را افزایش می‌دهد. فرآیند جذب و آزادسازی آب توسط ژئولیت، فرآیندی پیچیده‌تر از نظر توزیع بار است و ممکن است بر حساسیت به رطوبت آسفالت تأثیر بگذارد (Xiao et al, 2010).

ژئولیت‌های طبیعی، مواد معدنی آلومینوسیلیکاتی میکروپوروس و هیدراته هستند که به عنوان جاذب تجاری معمولاً استفاده می‌شوند (Grace, ۲۰۱۰). کلینوپتیلولیت یکی از رایج‌ترین ژئولیت‌های طبیعی است که شامل یک ترکیب میکروپوروس از تتراهدرای آلومینا و سیلیکا است که حجم زیادی از فضای منفذی را، مقاومت بالایی در برابر دماهای بالا و ساختار پایه ای خنثی دارد (Clinoptilolite, ۱۹۹۷). هدف این مطالعه بررسی خصوصیات حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ژئولیت طبیعی، ژئولیت مصنوعی و افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه گرم بود. آزمایش‌ها برای ارزیابی حساسیت به رطوبت آسفالت‌ها با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO T 283 - 07, ۲۰۱۱) و آزمایش عریان شدگی نیکلسون (ASTM D1664 - 80, ۱۹۸۵) انجام شد.

و فرآیند تصفیه. دیگر متغیرها مربوط به شرایط ترافیک، نوع و خواص افزودنی‌ها، طراحی و ساخت آسفالت، از جمله دمای استفاده در فرآیندهای مخلوط کردن، قرارگیری و فشرده‌سازی هستند (Segnoz, 2008). اگرچه مخلوط آسفالت گرم به طور گسترده در سراسر جهان استفاده می‌شود، تکنولوژی مخلوط آسفالت نیمه گرم با کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای از طریق کاهش سوخت مصرفی در طول فرآیند تولید (کاهش دماهای مخلوط و فشرده‌سازی)، بهبود قابلیت کار و به دست آوردن استقامت و مقاومتی معادل یا بهتر از آسفالت مخلوط گرم، استفاده می‌شود. مخلوط آسفالت نیمه گرم نوعی آسفالت است که در دماهای پایین‌تر از آسفالت مخلوط گرم ساخته می‌شود. مخلوط‌های آسفالتی گرم بالای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد مخلوط و متراکم می‌شوند در حالی که مخلوط آسفالت نیمه گرم در دماهای ۱۰-۱۵ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از آسفالت مخلوط گرم مخلوط و متراکم می‌شود بدون کاستی از نظر کیفیت و عملکرد. حساسیت به رطوبت نیز به عنوان یک نگرانی عملکرد مهم برای مخلوط آسفالت نیمه گرم همچون مخلوط آسفالت نیمه گرم سنتی محسوب می‌شود. از آنجایی که مخلوط آسفالت نیمه گرم در دماهای بالا همانند آسفالت مخلوط گرم ساخته نمی‌شود، ممکن است سنگدانه قبل از مخلوط شدن کاملاً خشک نشده باشد، اگر سنگدانه قبل از مخلوط شدن خشک نشود، رطوبت ذاتی ممکن است از اتصال قیر با سطح سنگدانه جلوگیری کند که می‌تواند باعث جدا شدن قیر از سطح سنگدانه و پدیده عریان شدگی شود (Porter, 2011). تکنولوژی آسفالت نیمه گرم بر اساس استفاده از افزودنی‌های آلی و شیمیایی و همچنین استفاده از آب به عنوان عامل کف‌زا می‌شود. افزودنی‌های آلی برای کاهش دما با کاهش ویسکوزیته قیر استفاده می‌شوند. کاهش ویسکوزیته، آسفالت را در دماهای پایین تولید می‌کند. پس از

۲- مواد و آماده سازی نمونه

۲-۱- مصالح سنگی و قیر

قیر بکارگرفته شده در این پژوهش از نوع قیر خالص ۷۰-۶۰ بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ آمده است. افزودنی به کاررفته نیز نانورس و گیلسونایت و پلیمر SBS^۳ می‌باشد که مشخصات آنها در جداول

۳ آورده شده است. در این پژوهش از دو نوع مصالح سنگی بازالتی به عنوان مصالح درشت دانه و آهکی به عنوان مصالح ریزدانه و فیلر جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر

نوع آزمایش	استاندارد	نتیجه آزمایش
نقطه نرمی	ASTM D36	۴۷ درجه سانتی‌گراد
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه	ASTM D5	۶۷ دسی میلی‌متر
درجه اشتعال	ASTM D92	۳۰۴ درجه سانتی‌گراد
شکل پذیری در دمای ۲۵	ASTM D113	بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر
چگالی	ASTM D70	۱/۰۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب
افت حرارتی	ASTM D6	۰/۰۵ درصد
قابلیت حل	ASTM D4	۹۹/۵ درصد

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد آزمایش		نتایج		شرح
ASTM	AASHTO	بازالت	آهک	
		۲,۶۶۶	۲,۶۸۶	وزن مخصوص حقیقی مصالح درشت دانه
		۲,۷۰۶	۷۲۷.۲	وزن مخصوص ظاهری مصالح درشت دانه
		۲,۸۱۰	۲,۷۰۱	وزن مخصوص درشت دانه در حالت اشباع
-	T96	۱۴,۲	۲۴,۴	سایش به روش لوس‌آنجلس (درصد)
-	-	۵,۵	۷,۵	ضریب تورق با روش BS812 (درصد)
C88-05	-	۲,۶	۱,۴۷	سدیم سولفات
C1252	-	۵۸,۱	۴۷,۸۵	درصد شکستگی مصالح ریزدانه

مخلوط دو نوع مصالح سنگی جهت ساخت مخلوط آسفالتی بخش درشت دانه و از مصالح آهکی به عنوان بخش ریزدانه و مورد استفاده قرار گرفت به طوریکه از مصالح بازالتی به عنوان فیلر استفاده شد.

جدول ۳. دانه‌بندی مصالح بازالتی و آهکی

آزمایش	۰.۱۲-۱۹ میلی‌متر	۴.۷۵-۱۲.۵ میلی‌متر	۰.۰۷۵-۴ میلی‌متر	ترکیب دانه بندی
نسبت اختلاط	۱۵	۴۵	۴۰	
اندازه الک				
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲.۵	۳۵.۷	۱۰۰	۱۰۰	۹۰.۵
۹.۵	۲.۵	۸۹	۱۰۰	۸۰.۵
۴.۷۵	۰.۴	۱۶	۱۰۰	۴۷.۳
۲	۰.۳	۱.۲	۸۱	۳۳
۰.۴۲۵	۰.۲	۰.۷	۳۳	۱۳.۵
۰.۱۸	۰.۱۵	۰.۴	۲۲	۹
۰.۰۷۵	۰.۱	۰.۲	۱۳	۵.۳

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی زئولیت طبیعی

ساختار شیمیایی											
B (ppm)	Ag	Ti	Na2O	MgO	CaO	H2O	K2O	Fe2O3	Al2O3	SiO2	(%) درصد
۳۰	۰.۰۴	۰.۰۲	۰.۶	۰.۷	۱.۹۶	۵.۹	۳.۵	۱.۱۵	۱۳.۵۵	۷۱.۲۹	
خصوصیات فیزیکی											
ظرفیت تبادل یونی	مقاومت	اندازه	منافذ (%)								
۲.۱۶	بالا	۳.۹x۵.۴	۳۴								

آسفالت نیمه گرم یک ترکیب از سورفکتانت‌های کاتیونیک و مواد افزودنی مبتنی بر رئولوژی است. افزودنی به طور شیمیایی قیر را تغییر می‌دهد و نیروی چسبندگی فعالی را کسب می‌کند که به بهبود پوشش سنگدانه‌ها با قیر کمک می‌کند. پژوهشگران مشخص کرده‌اند که افزودنی شیمیایی آسفالت نیمه گرم باید با غلظتی برابر با ۲ درصد به وزن قیر استفاده شود تا عملکرد بهتری در آسفالت نیمه گرم حاصل شود.

۳- روش کار آزمایش

۳-۱- خصوصیات فیزیکی قیر

قیر پایه و قیر حاوی افزودنی‌های آسفالت نیمه گرم به آزمایش‌های معمول قیر زیر تحت‌کرده‌اند: نفوذپذیری (ASTM D5 - 06)، نقطه نرمی حلقه و توپ (ASTM D36 - 95)، آزمایش فیلم نازک روی آون (ASTM D1754M - 09) (TFOT)، نفوذپذیری و نقطه نرم شدن بعد از TFOT و آزمایش پایداری ذخیره‌سازی (EN 13399، ۲۰۱۰). علاوه بر این، تاثیر حساسیت دما بر نمونه‌های قیر با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های نفوذپذیری و نقطه نرمی، به صورت شاخص نفوذ محاسبه شده است. مقدار پایداری ذخیره‌سازی با تفاوت دمای نرمی نمونه‌های قیر گرفته شده از بالا و پایین قالب استوانه‌ای (قطر ۳۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۶۰ میلی‌متر) پس از ذخیره‌سازی عمودی در یک اون در دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت تعیین شده است.

در بازار، انواع مختلفی از افزودنی‌های حاوی آب وجود دارند. در این مطالعه، زئولیت مصنوعی پودری هیدروترمالی بلوریده شده استفاده شده است. این زئولیت حاوی حدود ۱۸-۲۱٪ آب بلوری است که با افزایش دمای بالای ۸۵ درجه سانتیگراد آزاد می‌شود. انبساط آب باعث تولید کف آبی در قیر می‌شود. برای استفاده بهینه از این افزودنی و به طور کلی اقتصادی بودن آن، توصیه می‌شود که درصد بهینه افزودنی زئولیت مصنوعی ۵ درصد نسبت به وزن قیر باشد. زئولیت طبیعی (کلینوپتیلولیت) که می‌توان آن را به عنوان جایگزینی برای افزودنی زئولیت مصنوعی در نظر گرفت، به صورت پودر از یک تهیه شده است. به صورت بلورهای تکنوسیلیکاتی منیکلیک تبلور می‌شود که از سفید تا قرمز رنگ است و سختی حدود ۳.۵-۴.۰ و چگالی مخصوص حدود ۲.۱-۲.۲ دارد. محتوای زئولیت طبیعی در این مطالعه به میزان ۵ درصد به وزن قیر انتخاب شده است تا ویژگی‌های اساسی آن را با زئولیت مصنوعی مقایسه شود. ویژگی‌های زئولیت طبیعی در جدول ۴ آورده شده است. افزودنی آلی آسفالت نیمه گرم که از یک شرکت ایرانی تهیه شده است، یک هیدروکربن پلیمتیلن آلفاتیک با زنجیره‌های بلند است که از فرآیند شیمیایی فشر-تروپش تولید می‌شود و دارای دمای ذوب ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد است. زنجیره‌های بلند به حفظ موم در محلول کمک می‌کنند که ویسکوزیته قیر در دماهای معمول تولید و تراکم آسفالت را کاهش می‌دهد. غلظت افزودنی آلی آسفالت نیمه گرم در قیر پایه به میزان ۳ درصد انتخاب شده است. استفاده از این محتواها بر اساس تحقیقات گذشته است، که نتیجه می‌گیرند برای کارایی حداکثری، افزودنی آلی آسفالت نیمه گرم باید به نسبت ۳ درصد به وزن قیر اضافه شود. افزودنی شیمیایی

۳-۲- تعیین دمای اختلاط و تراکم

تأثیر ویسکوزیته بر قابلیت کار قیر در انتخاب دماهای مناسب اختلاط و تراکم بسیار مهم است. برای اندازه‌گیری ویسکوزیته نمونه‌های قیر، ویسکومتر بروکفیلد با استاندارد ASTM D4402/D4402M - 12 (2012) استفاده شده است. آزمایش در دماهای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. دماهایی که متناظر با ویسکوزیته قیر به ترتیب 170 ± 20 میلی‌پاسکال ثانیه و 280 ± 30 میلی‌پاسکال ثانیه بودند، به عنوان دماهای اختلاط و تراکم انتخاب شدند.

۳-۳- آزمایش سطحی مصالح سنگی

ASTM D1664 - 80 (1985) برای ارزیابی میزان پوشش و جداسازی مخلوط قیر و سنگدانه استفاده شد. در این روش، سنگدانه‌های بازالیت و آهک با ابعاد خشک $6/3-9/5$ (میلی‌متر) با قیر حاوی افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم در دماهای مشخص پوشش داده شدند. سپس مخلوطی که در حالت پراکنده قرار داشت، به مدت ۲۴ ساعت در آب تقطیر غوطه‌ور شد و درجه جداسازی با زیر آب برای تخمین تصویری مساحت کل سطح سنگدانه‌ها که پوشش قیر روی آنها باقی مانده است، مشاهده شد.

با ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مخلوط آسفالت پس از چرخه یخ‌زدایی ارزیابی شد. نمونه‌های مارشال رطوبت ابتدا در یخچال در دمای منفی ۱۸ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت قرار گرفتند و سپس در آب به دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت

۳-۴- آزمایش تست کشش غیرمستقیم

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم یک آزمایش رایج برای مخلوط آسفالت است که نتایج آن با ویژگی‌های خرابی و ترک خوردگی در مخلوط آسفالت مرتبط می‌شود (اسلام، حسین و تارفدر، ۲۰۱۵). قبل از آزمایش، حداقل چهار نمونه آسفالت مارشال با ضخامت $63,5 \pm 1,3$ میلی‌متر و قطر $101,6$ میلی‌متر برای هر دسته آماده شد. در این آزمایش از دستگاه آزمایش تست یونیورسال استفاده شد و دمای آن در ۲۵ درجه سانتی‌گراد کنترل شد، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است. در طول آزمایش، نمونه‌های استوانه‌ای در دو نوار بارگذاری قرار گرفتند و بار فشاری یکنواخت به سرعت 50 میلی‌متر در دقیقه تا شکست اعمال شد. در این فرآیند، بار فشاری عمودی را به تنش کششی افقی یکنواخت تبدیل می‌کند. بارگذاری حداکثر اعمال شده برای محاسبه مقادیر ITS استفاده شد که در آن، ITS مقاومت کششی غیرمستقیم (مگاپاسکال)؛ P_{max} بارگذاری حداکثر اعمال شده (نیوتن)؛ t ضخامت نمونه (میلی‌متر) و d قطر نمونه (میلی‌متر) است.

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi dt}$$

خیساندن شدند. قبل از آزمایش، این نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در آب به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شدند. حساسیت رطوبتی مخلوط‌های مختلف با استفاده از مقادیر نسبت مقاومت کششی (TSR)^۴ می‌تواند مقایسه شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$TSR = \frac{TS_1}{TS_0}$$

که در آن TS_1 و TS_0 به ترتیب مقاومت کششی غیرمستقیم قبل و بعد از چرخه یخ‌زدایی هستند.

۴- تحلیل نتایج آزمایشات

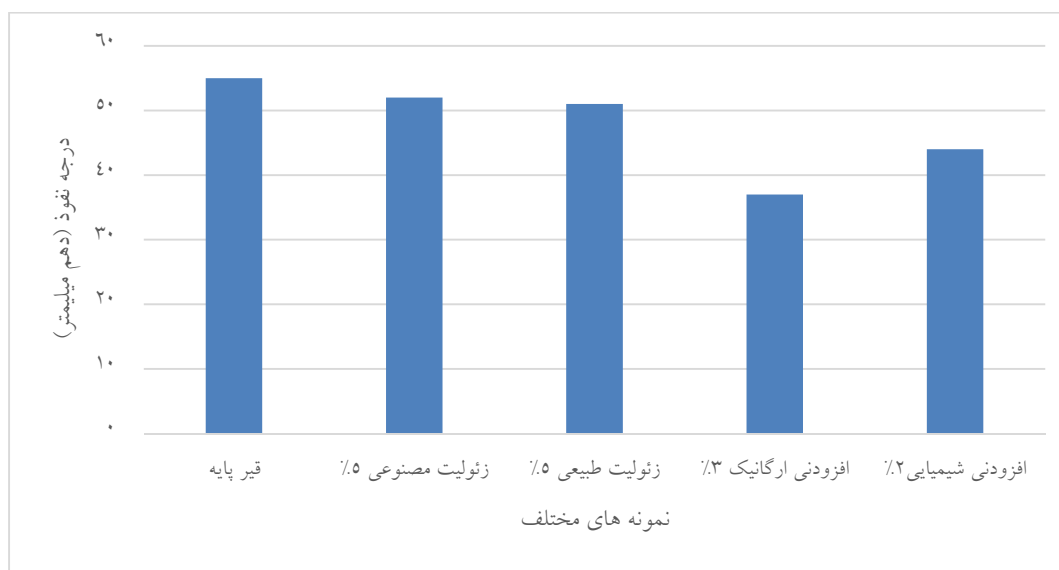
۴-۱- نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی

ویژگی‌های پایه قیر حاوی افزودنی‌های آبی (ژئولیت‌های طبیعی و سنتی) و افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم آلی و شیمیایی در جدول شکل‌های ۱-۴ به عنوان کاهش نفوذپذیری و افزایش نقطه نرمی ارائه شده است. افزایش نقطه نرمی مطلوب است زیرا

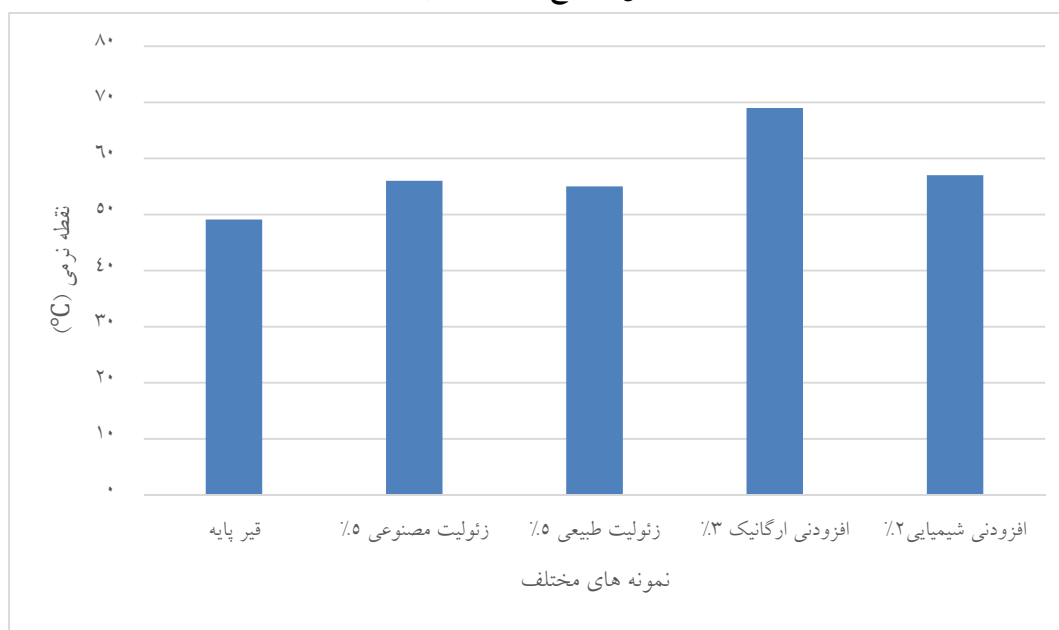
قیر با نقطه نرمی بالاتر ممکن است کمتر به تغییر شکل دائمی (شیارشده‌گی) حساس باشد. ژئولیت طبیعی، ژئولیت سنتی، افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم انتقال حساسیت دما (مطابق با PI) قیر را کاهش می‌دهند. مقادیر کمتری از PI°

آسفالت نیمه گرم گرفته شده از بالا و پایین لوله در آزمایش پایداری ذخیره سازی نشان می دهد که هر دو نمونه قیر حاوی ژئولیت طبیعی و سنتی ویژگی های مشابهی در خصوص پایداری ذخیره سازی دارند که در جدول ۵ آورده شده است. علاوه بر این، نمونه های قیر حاوی افزودنی های شیمیایی نسبت به سایر نمونه های آسفالت نیمه گرم پایداری ذخیره سازی بسیار بیشتری دارند.

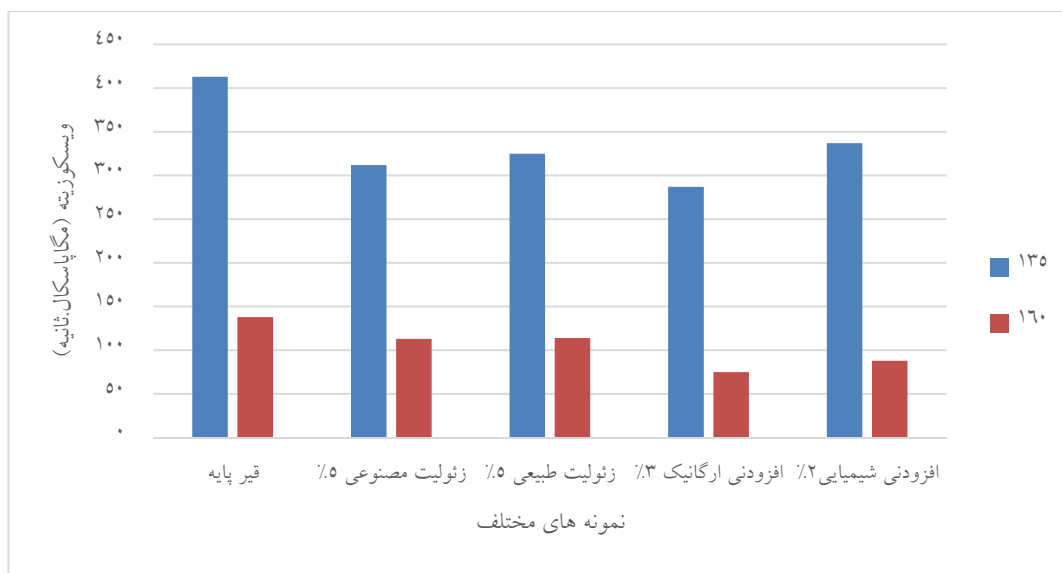
به معنی حساسیت دمای بالاتر است. قیر حاوی ژئولیت طبیعی عملکرد مناسبی در خصوص حساسیت دمایی با مقادیر PI دارد که در جدول ۵ آورده شده است. علاوه بر این، در میان تمام افزودنی ها، قیر حاوی افزودنی آلی حساسیت دمایی کمتری دارد. آسفالت هایی که قیر با PI بالاتری دارند، در برابر ترک های دمایی پایین و همچنین تغییر شکل دائمی مقاومت بیشتری دارند. نتایج آزمایش نقطه نرمی روی نمونه های قیر حاوی افزودنی های



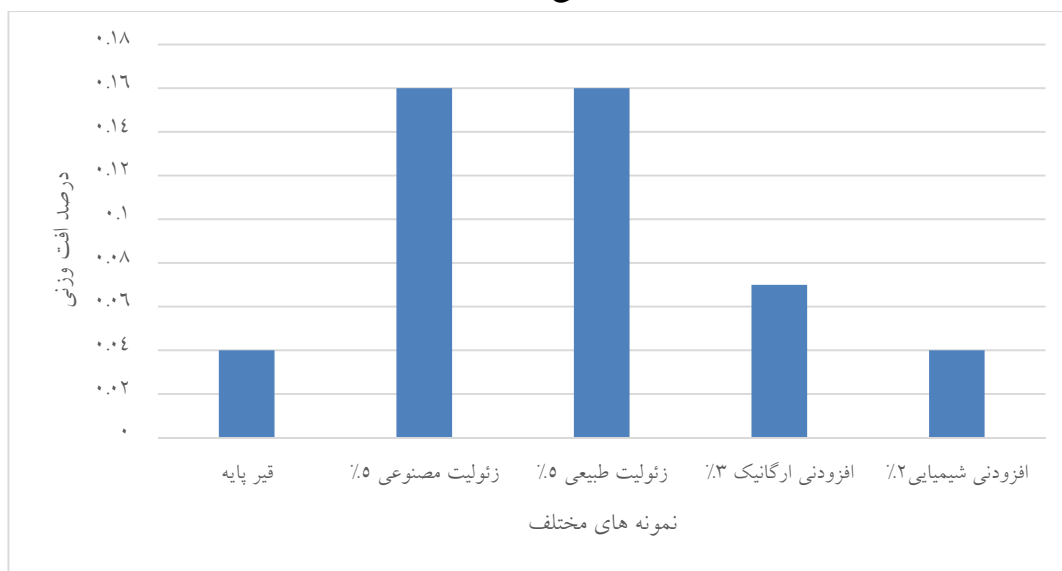
شکل ۱. نتایج درجه نفوذ قیر



شکل ۲. نتایج نقطه نرمی قیر



شکل ۳. نتایج ویسکوزیته قیر



شکل ۴. نتایج افت وزنی قیر

جدول ۵. خصوصیات پایه ای قیر

نمونه ها	درصد درجه نفوذ باقیمانده	اختلاف نقطه نرمی	کاهش جرم (%)	درصد درجه نفوذ باقیمانده	اختلاف نقطه نرمی	PI	پایداری ذخیره سازی
قیر پایه	۲۵	۵	-۰.۰۴	۲۶	۵.۳	-۱.۲	-
زئولیت مصنوعی ۵٪	۱۶	۴.۱	-۰.۱۸	۲۱	۴.۵	۰.۲۷	۱.۶
زئولیت طبیعی ۵٪	۱۵	۳.۷	-۰.۱۷	۱۷	۳.۷	۰.۰۲	۲
افزودنی ارگانیک ۳٪	۱۳	۴	-۰.۰۷	۱۵	۴.۳	۱.۹۵	۱.۶
افزودنی شیمیایی ۲٪	۱۶	۲.۵	-۰.۰۷	۱۷	۲.۵	۰.۰۴	۰.۵

جدول ۶. نتایج دمای اختلاط و تراکم مخلوطها

افزودنی‌ها	دمای اختلاط	دمای تراکم
قیر پایه	۵۵-۱۶۳	۱۴۲-۱۴۸
ژئولیت مصنوعی ۵٪	۱۴۷-۱۵۲	۱۳۵-۱۴۱
ژئولیت طبیعی ۵٪	۱۴۷-۱۵۲	۱۳۵-۱۴۰
افزودنی ارگانیک ۳٪	۱۴۴-۱۴۹	۱۳۴-۱۳۸
افزودنی شیمیایی ۲٪	۱۴۷-۱۵۲	۱۳۵-۱۴۰

۴-۲- تعیین دمای اختلاط و تراکم

نتایج دمای اختلاط و تراکم مخلوطها در جدول ۶ آورده شده است. مشخص است که افزودن ژئولیت سنتی، ژئولیت طبیعی، افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم دمای اختلاط را به ترتیب ۹ درجه سلسیوس، ۹ درجه سلسیوس، ۱۳ درجه سلسیوس و ۹ درجه سلسیوس کاهش داده است. علاوه بر این، افزودن افزودنی‌های مذکور دمای تراکم را به ترتیب ۷ درجه سلسیوس، ۶ درجه سلسیوس، ۱۰ درجه سلسیوس و ۶ درجه سلسیوس کاهش داده است. باید توجه داشت که کاهش دماهای فوق بر اساس منبع خام، فرآیند تصفیه و همچنین سختی قیر استفاده شده محاسبه شده است. یافته‌های مشابهی نیز در یک مطالعه انجام شده توسط کانتیپونگ و همکاران به دست آمده است. آنها نتیجه گرفتند که تأثیر افزودنی آسفالت نیمه‌گرم زمانی مشخص است که به قیر سخت مانند قیر اصلاح شده با پلیمر افزوده شود، با این حال تغییر کمی در ویسکوزیته نشان می‌دهد.

۴-۳- نتایج آزمایش میزان پوشش سطحی مصالح سنگی با قیر

بعد از پوشش دادن مصالح سنگی با قیر پایه به همراه ژئولیت سنتی، ژئولیت طبیعی، افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم حاوی قیر به ترتیب در دمای ۱۵۹ درجه سلسیوس، ۱۵۰ درجه سلسیوس، ۱۵۰ درجه سلسیوس، ۱۴۶ درجه سلسیوس و ۱۵۰ درجه سلسیوس، میزان جدایی به صورت بصری مشاهده شد. نتایج بصری نمونه‌های آماده شده در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۷ نشان داده شده است، در میان نمونه‌های آماده شده با قیر پایه، درجه پوشش مربوط به مصالح سنگی سنگ آهک و بازالت به ترتیب بین ۶۰-۵۵ و ۴۵-۴۰ قرار می‌گیرد. این نشان می‌دهد که سنگ بازالت در مقایسه با سنگ آهک، بیشترین توانایی جدایی را دارد. روند مشابهی نیز در نمونه‌های حاوی افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم به دست آمده است.

افزودنی‌ها	مصالح آهکی	مصالح بازالتی
قیر پایه	۵۵-۶۰	۴۰-۴۵
ژئولیت مصنوعی ۵٪	۴۵-۵۰	۲۵-۳۰
ژئولیت طبیعی ۵٪	۹۰-۹۵	۸۵-۹۰
افزودنی ارگانیک ۳٪	۹۰-۹۵	۸۰-۸۵
افزودنی شیمیایی ۲٪	۹۰-۹۵	۸۰-۸۵

۴-۴- نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده

نمونه‌های قیر با استفاده از ژئولیت سنتی، ژئولیت طبیعی، افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم در درصد بهینه افزودنی تهیه شدند که بر اساس مطالعات گذشته و توصیه‌های تولیدکنندگان تعیین شده است. بر اساس دماهای اختلاط و تراکم مربوط به نمونه‌های قیر که در جدول ۶ ارائه شده است، تجزیه و تحلیل مارشال روی نمونه‌هایی انجام شد که شامل درصد مختلف قیر بودند تا درصد بهینه قیر تعیین شود. درصد بهینه قیر مربوط به ۴٪ هوا در مخلوط‌های آماده شده با قیر پایه، ژئولیت سنتی، ژئولیت طبیعی، افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم به ترتیب به عنوان ۴٫۷۲٪، ۴٫۳۲٪، ۴٫۵۶٪، ۴٫۲۰٪ و ۴٫۴۶٪ تعیین شد. برای ارزیابی تأثیر ژئولیت‌های طبیعی و مصنوعی به همراه سایر افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم (افزودنی‌های آلی و شیمیایی) بر خصوصیات حساسیت به رطوبت نمونه‌های آماده شده با مخلوط سنگ بازالت-آهک، نوع افزودنی آسفالت نیمه‌گرم نسبت به مقادیر ITS برای هر دو نمونه کنترل (خشک) و نمونه‌های مرطوب رسم می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. نسبت TSR نیز بر اساس هر نوع افزودنی آسفالت نیمه‌گرم در همان شکل نشان داده می‌شود.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مقدار ITS در نمونه‌های آماده شده با افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم بیشتر از مقدار ITS در نمونه‌های آماده شده با قیر پایه است. این نشان می‌دهد که نمونه‌های آسفالت حاوی افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم مقادیر بالاتری از مقاومت کششی در حالت شکست تحت بارگذاری استاتیک دارند. مقاومت کششی بیشتر آسفالت‌های حاوی افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم نسبت به آسفالت‌های آماده شده با قیر پایه نیز نشانگر خصوصیات مقاومت همبستگی بیشتر است. علاوه بر این، تفاوت قابل توجهی در مقادیر ITS نمونه‌های حاوی قیر پایه و ژئولیت طبیعی وجود ندارد.

نتایج آزمایش ITS نیز برای ارزیابی خصوصیات ترک خوردگی پوشش آسفالتی استفاده می‌شود. تحقیقات بسیاری نشان داده‌اند که مقادیر مقاومت کششی بالاتر با مقاومت بالاتر در برابر ترک خوردگی همخوانی دارند. همانطور که در شکل ۲

نشان داده شده است، افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم حاوی نمونه‌های آسفالتی با مقادیر بالاتر ITS به نظر می‌رسند توانایی تحمل کردن کشش‌های الاستیک بزرگتری قبل از ترک خوردگی را نسبت به سایر نمونه‌های حاوی ژئولیت‌های مصنوعی و طبیعی داشته باشند.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، نمونه‌های آسفالتی حاوی ژئولیت طبیعی و افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم، مقدار TSR بالاتری نسبت به نمونه‌های آماده شده با بیتومن پایه دارند. این نشان می‌دهد که وارد کردن ژئولیت طبیعی و افزودنی‌های آلی و شیمیایی آسفالت نیمه‌گرم، حساسیت آسفالت به آسیب رطوبتی را کاهش می‌دهد.

از بین افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم مورد بررسی، نمونه آسفالتی حاوی ژئولیت مصنوعی، کمترین مقدار TSR را نسبت به تمامی افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم و همچنین قیر پایه دارد. این نشان می‌دهد که نمونه آسفالتی حاوی ژئولیت مصنوعی، پتانسیل بیشتری برای جداسازی را به همراه دارد و حساسیت بیشتری به رطوبت دارد. این ممکن است به دلیل پیچیدگی توزیع بار ژئولیت مصنوعی به قیر پایه در فرآیند جذب و تخلیه آب باشد. این مکانیزم می‌تواند باعث خشک نشدن کامل سنگدانه شود. آب باقی‌مانده در سنگدانه‌های پوشش داده شده ممکن است عاملی مضر باشد که حساسیت بیشتری به رطوبت ایجاد کند. یافته‌های مشابه نیز در مطالعه انجام شده توسط Xiao و همکاران (۲۰۱۰) به دست آمده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، نمونه‌ای از آسفالت حاوی ژئولیت طبیعی، مقدار TSR بالاتری نسبت به سایر افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم و همچنین قیر پایه دارد. این نشان می‌دهد که ژئولیت طبیعی خصوصیات حساسیت به آسیب آبی نمونه‌های آسفالت را کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که خصوصیات حساسیت به رطوبت یک نمونه آسفالت متراکم شده بستگی به پارامترهای مختلفی مانند منبع سنگدانه، مقدار فیلر، نسبت سنگدانه‌های درشت و ریز، نوع دانه بندی، نوع و میزان قیر و منبع خام آن، انرژی تراکمی غلطک، و میزان درصد هوا دارد. در این مطالعه، همه پارامترهای فوق‌الذکر ثابت می‌مانند تا تأثیر افزودنی آسفالت نیمه‌گرم

مکانیکی و عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی فومی دارند اگر به میزان مناسب خود استفاده شوند. بنابراین، استفاده از ژئولیت در طرح آزمایشگاهی به میزان ۵٪ وزنی قیر با توجه به اثربخشی استفاده از چنین افزودنی و در نظر گرفتن اثر فیلر معدنی ممکن در بالای ۵٪ است.

در برابر خرابی آبی را بهبود می‌بخشند. این ممکن است به دلیل افزودنی ژئولیت مصنوعی باشد که باعث پیچیدگی بیشتری در توزیع بار می‌شود. با توجه به آزمایش نیکسون، می‌توان نتیجه گرفت که آزمایش قادر به تفکیک واضح پتانسیل عریان شدگی افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم آلی و شیمیایی نیست. -با توجه به یافته‌های آزمایش لاتمن اصلاح شده، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه آسفالتی حاوی ژئولیت طبیعی در مقایسه با نمونه آسفالتی حاوی قیر پایه و به خصوص نمونه آسفالتی حاوی ژئولیت مصنوعی، در مقاومت به اثر خرابی رطوبتی آسفالت مقاومت بیشتری را نشان داده است. نمونه آسفالتی حاوی ژئولیت مصنوعی، حساسیت به رطوبت بیشتری نسبت به سایر افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم دارد. بر اساس مطالعات، می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت به رطوبت یک نگرانی مهم در استفاده از آسفالت نیمه‌گرم است. از عوامل ضد عریان شدگی می‌توان برای بهبود مقاومت در برابر حساسیت به رطوبت به مقادیر مناسب، به خصوص برای آسفالت‌های آماده شده با ژئولیت مصنوعی، استفاده کرد.

در حوزه آسیب آبی را درک کنیم. درصد قیر نیز در نمونه‌های آسفالت در آزمایش لاتمن تغییر می‌کند به دلیل اینکه افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم درصد هوا را کاهش می‌دهند، اما این ممکن است نشان دهنده کاهش درصد بهینه قیر باشد که براساس میزان ۴٪ درصد هوا محاسبه می‌شود. علاوه بر این، معروف است که ژئولیت‌ها به عنوان پرکننده‌های فعال تأثیر مهمی در خواص

۵- نتیجه گیری

حساسیت به رطوبت یک مسئله مهم برای تمام روسازی‌های آسفالتی است، اما به ویژه برای فناوری مخلوط آسفالت نیمه‌گرم که در مقایسه با مخلوط آسفالت معمولی دماهای پایین‌تری برای اختلاط، پخش و تراکم فراهم می‌کند. به دلیل نگرانی درباره آسفالت نیمه‌گرم، پاسخ آسفالت نیمه‌گرم به عریان شدگی در حال پایش است. برای ارزیابی خصوصیات حساسیت به رطوبت آسفالت نیمه‌گرم، از افزودنی‌های آلی، شیمیایی و ژئولیت مصنوعی استفاده شده است و بر اساس آزمایش نیکسون و آزمایش لاتمن اصلاح شده (۰۷ - ۲۸۳ AASHTO T، ۲۰۱۱) با ژئولیت طبیعی مقایسه شده است.

-تفاوت واضحی بین نمونه‌های آماده شده با سنگدانه‌های بازالت و آهک در آزمایش نیکسون نشان می‌دهد که نمونه‌های آماده شده با سنگدانه بازالت حساسیت بیشتری نسبت به نمونه‌های آسفالت آماده شده با سنگدانه آهک دارند. این تفاوت ممکن است به تشکیل اتصال ضعیف بین سنگدانه بازالت و قیر که هر دو به صورت اسیدی هستند، نسبت داده شود. علاوه بر این، تمام افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم به جز ژئولیت مصنوعی، مقاومت

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Warm Mix Asphalt
- 2- Hot Mix Asphalt
- 3- Styrene-Butadiene-Styrene
- 4- Tensile Strength Ratio
- 5- Penetration Index

- in coarse aggregate. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D5 – 06. (2006). Standard test method for penetration of bituminous materials. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- Clinoptilolite. (1997). *The mineral and locality database*. Retrieved from <http://www.mindat.org/min-1082.html>
- Fromm, H. J. (1974). Mechanism of asphalt stripping from aggregate surfaces. *AAPT*, 43, 191–223. General Directorate of Highways. (2006). *Highway technical specifications, earth work, infrastructure, tunnel, bridges* (Publication of the General Directorate of Highways, 267). Ankara, Turkey (in Turkish).
- Grace, W. R. (2010). *Zeolite structure, Web Site of Grace Co*. Retrieved from http://www.grace.com/Engineer_red_Materials/MaterialSciences/Zelolites/ZeloliteStructure.aspx
- Kandal, P. S., Lubold, C. W., & Roberts, F. L. (1989). Water damage to asphalt overlays: Case histories. *AAPT*, 58, 40–76.
- Kvasnak, A., West, R., Moore, J., Nelson, J., Turner, P., & Tran, N. (2009). *Case study of warm mix asphalt moisture susceptibility in Birmingham*. Transportation Research Board 88th Annual Meeting Compendium of Papers, Washington, DC.
- Porter, A. (2011). *Sensitivity of warm mix asphalt to temperature, binder content, and laboratory stripping performance*. Master's Thesis in University of Arkansas. UMI Dissertation Publishing, Ann Arbor, Michigan, UMI Number:1501581.
- Sengoz, B., & Isikyakar, G. (2008). Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods. *Journal of Hazardous Materials*, 150(2), 424–432.
- Stuart, K. D. (1990). *Moisture damage in asphalt mixtures: A state of art report*. Research Development and Technology, Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Taylor, M. A., & Khosla, N. P. (1983). Stripping of asphalt pavements: State of the art. *Transportation Research Record*, 911, 150–8.
- Terrel, R. L., & Al-Swailmi, S. (1994). *Water sensitivity of asphalt-aggregate mixes: Test selection* (SHRP Report No. A-403). Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Thomas, K. P., McKay, J. F., & Branthaver, J. F. (2006). Surfactants in aged asphalt and impact on moisture susceptibility of laboratory-prepared mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 7, 477–490.
- Xiao, F., Zhao, W., Gandhi, T., & Amirhanian, S. N. (2010). Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22, 1047–1055.
- AASHTO T 283 – 07. (2011). *Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage*. Capital St., Washington, DC: American Association of State and Highway Transportation Officials.
- ASTM C1252 – 06. (2006). Standard test methods for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture, and grading). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C127 – 07. (2007). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C128 – 12. (2012). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C131 – 06. (2006). Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C136– 06. (2006). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C88 – 05. (2005). Soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D113 – 07. (2008). Standard Test method for ductility of bituminous materials. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D1664 – 80.F. (1985). Standard test method for Coating and stripping of bitumen-aggregate mixtures. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D1754M – 09. (2009). Standard test method for effects of heat and air on asphaltic materials (thin-film oven test). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D36 – 95. (2000). Test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4402/D4402M – 12. (2012). Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4791 – 10. (2010). Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles

Laboratory Evaluation of the Effect of Natural Zeolite as Warm Mix Asphalt Additive on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixture with an Environmental Approach

Azin Chitsazan, Department of Land Use Planning and Assessment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Email: Chitsazan.az@gmail.com

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT

In the past few decades, warm mix asphalt (WMA) has been used as advanced technology alternative to hot mix asphalt (HMA) due to the relatively low temperatures required heating the asphalt in the production and application process, reducing environmental damage while providing benefits. Asphalt maintains the hot mix, it is noticeable. However, low manufacturing and processing temperatures may result in asphalt deterioration from moisture. The aim of this study was to evaluate the characteristics of asphalt containing natural zeolite and compare it with synthetic zeolite and WMA organic and chemical additives against deterioration against moisture. Resistance properties of samples against moisture sensitivity using tests.

Keywords: Modified Bitumen, Natural Zeolite, Functional Properties, Synthetic Zeolite, Moisture Sensitivity, Chemical Warm Mix Additive