

ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ایوانیک و زایکوترم

محمود عامری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
مصطفی وامق (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
ایمان امیری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
سید فرهاد چاوشیان نائینی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

E-mail: mostafa_vamegh@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۰۶ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱

چکیده

سلامت روسازی جاده‌ها از جمله عواملی است که در ایمنی و راحتی رانندگان بسیار مؤثر است. از این رو ارزیابی عملکرد آسفالت برای کنترل خرابی‌های رایج آن مانند حساسیت رطوبتی، امری ضروری است. در بین اجزای مخلوط آسفالتی اگر چه مقدار قیر موجود در آسفالت ناچیز است، اما نقش بسیار تأثیرگذاری در عملکرد مخلوط آسفالتی ایفا می‌کند. یکی از روش‌های ارتقاء عملکرد مخلوط‌های آسفالتی استفاده از افزودنی‌ها، جهت اصلاح خواص قیر و نهایتاً مخلوط آسفالتی است. هدف از انجام این پژوهش ارزیابی و مقایسه اثر نانو ماده زایکوترم به عنوان افزودنی رایج و ایوانیک به عنوان افزودنی نوین، در بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده در برابر پدیده خرابی رطوبتی است تا انتخاب افزودنی ضد عریان شدگی به شایستگی و راحتی تر انجام پذیرد. برای این منظور از مصالح سنگی آهکی با دانه‌بندی شماره ۸، پودر سنگ به عنوان فیلر، قیر خالص ۶۰-۷۰ و افزودنی‌های زایکوترم و ایوانیک هر کدام به مقدار ۰/۱ و ۰/۳ درصد نسبت به وزن قیر به عنوان نانو مواد ضد عریان شدگی استفاده شده است. برای ارزیابی اثر این مواد در میزان مقاومت در برابر رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی از آزمایش‌های مقاومت کششی غیر مستقیم (لاتمن اصلاح شده) و جوشان تگزاس و همچنین برای ارزیابی سایر خصوصیات عملکردی از آزمایش‌های مارشال، مدول برجهندگی و خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده و اصلاح نشده، انجام گرفت است. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که زایکوترم و ایوانیک به ترتیب در درصدهای ۰/۱ و ۰/۳ در صد، باعث افزایش ۱۵ و ۹ درصدی مقاومت رطوبتی و افزایش ۳۷ و ۷ درصدی مقاومت شیار شدگی نسبت به نمونه اصلاح نشده گشته‌اند که این نشان از عملکرد بهتر نانو ماده زایکوترم نسبت به ایوانیک در بهبود خواص حساسیت رطوبتی مخلوط است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، حساسیت رطوبتی، نانوماده زایکوترم، ایوانیک، تغییر شکل دائم.

۱. مقدمه

طول عمر روسازی جاده‌ها یکی از مهم‌ترین پارامترهایی تأثیرگذار بر اقتصاد یک کشور است. از این رو یکی از اهداف اولیه طرح و اجرای روسازی آسفالتی در سطح جاده‌ها، حصول بهترین عملکرد از نظر دوام و پایداری در شرایطی بهینه است. عوامل محیطی مانند دما، هوا و آب تأثیر بسزایی بر دوام مخلوط آسفالتی دارد. حضور آب در بین قیر و سنگ‌دانه، باعث کاهش چسبندگی قیر و سنگ‌دانه شده و مقاومت مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد [Mansourian and Gholamzadeh, 2016]. در سالیان اخیر عریان شدگی یکی از مشکلات عمده در ایالات متحده بوده که این خرابی باعث شده تا میلیون‌ها دلار صرف تعمیر خسارت‌های ناشی از آن شود [NCHRP Report 444, 2000]. در این خرابی مواد شیمیایی توسط آب جذب می‌شود و به اصطلاح قیر از مصالح شسته شده و با ادامه این روند در کنار وجود بار ترافیکی، شکست در آسفالت رخ خواهد داد [Kringos and Scarpas, 2008]. آساروی و همکاران نشان دادند که این شکست به صورت شیار شدگی، بالآمدگی آسفالت، شن زدگی، ترک خوردگی و ... ظاهر می‌شود [Esarwi et al. 2008]. اگرچه مکانیزم حساسیت رطوبتی به‌طور کامل شناخته‌شده نیست، ولی عواملی مثل خواص قیر، خواص مصالح سنگی، خواص مخلوط‌های آسفالتی، کنترل کیفیت در هنگام تراکم، اثر دینامیکی بار ترافیکی در ایجاد حساسیت رطوبتی و تشدید خرابی‌ها نقش مؤثری دارند [Ameri et al. 2015]. با وجود اینکه از قیر به مقدار کمی در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود، اما اثر مهمی بر روی عملکرد بهینه، دوام و پایداری مخلوط می‌گذارد. لذا می‌توان با تغییر در خصوصیات قیر، آسفالت‌های بادوام‌تری تولید نمود [Ameri et al. 2011]. استفاده از مواد ضد عریان شدگی جامد و مایع، یکی از راه‌های اصلاح مخلوط‌های آسفالتی برای بهبود چسبندگی قیر و سنگ‌دانه است که در میان آن‌ها افزودنی‌های مایع و افزودنی‌های آهکی رایج‌ترند [Ameri et al. 2015; Ford et al. 1974]. سابقه استفاده از نوع مایع آن به‌پیش از دهه ۱۹۳۰ بازمی‌گردد. در آن زمان این افزودنی‌ها در برابر حرارت پایداری زیادی نداشتند. در دهه ۱۹۷۰ از آمین‌ها استفاده شد که حاصل فن‌آوری نایلون و در

برابر حرارت بسیار پایدار بوده، لیکن بوی نامناسبی از آن‌ها متصاعد می‌شد. از انواع دیگر این مواد می‌توان به آمین‌ها، آمیدوآمین‌ها و ایمیدازولین‌ها اشاره کرد [Xiao and Amirkhanian, 2010]. فناوری نانو هم که جرقه آن از سال ۱۹۵۹ زده شده است، ترکیبات مورفولوژیک در مقیاس نانو به وجود آورده است. نانو مواد خواص ویژه‌ای دارند که از ابعاد نانومقیاس آن‌ها نشأت می‌گیرد. ویژگی بی‌نظیر مکانیکی، حرارتی، نوری، الکتریکی و مغناطیسی آن‌ها توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده و در سال‌های اخیر، زمینه ورود فناوری نانو در اصلاح خواص آسفالت فراهم شده است [Fang et al. 2013]. در سال ۲۰۱۳ حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم با و بدون افزودنی ضدعریان‌شدگی زایکوسویل به‌عنوان یک نانو ارگانوسیلان و آهک هیدراته شده به شکل دوغاب، در دانشگاه علم و صنعت ایران بررسی شد. از آنجاکه مصالح سیلیسی در مقابل رطوبت ضعیف‌تر از مصالح آهکی عمل می‌کنند، مخلوط‌ها با دو نوع مصالح سیلیسی و آهکی تهیه شدند. نتایج نشان داد که در مخلوط مصالح سیلیسی، زایکوسویل بهتر از پودر آهک عمل می‌کند ولی در مخلوط مصالح آهکی تأثیر پودر آهک بر مقاومت رطوبتی کمی بهتر زایکوسویل است [Ameri et al. 2013].

در سال ۲۰۱۴ به‌بهانی و همکاران، ۵ نوع مخلوط آسفالت شیشه‌ای با درصد‌های مختلف از زایکوسویل (۰٪، ۰/۵٪، ۲/۵٪ و ۴/۵٪) نسبت به وزن قیر و ذرات شیشه (۱۰ درصد نسبت به وزن سنگ‌دانه) تهیه کردند و حساسیت رطوبتی و برخی از خواص مکانیکی آسفالت شیشه‌ای اصلاح شده از قبیل مدول سختی، نرمی خزشی و مقاومت کشش غیرمستقیم ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که نانوتکنولوژی زایکوسویل به میزان ۴/۵ درصد نسبت به وزن قیر، به‌عنوان یک عامل ضدعریان‌شدگی می‌تواند خواص مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت شیشه‌ای را به بهترین نحو بهبود بخشد [Behbehani et al. 2015]. فخری و همکاران از فیبر آهکی و آنتی‌استریپینگ مایع به‌عنوان ماده ضدعریان شدگی استفاده نمودند. باینکه تأثیر ماده ضدعریان شدگی از فیبر آهکی بیشتر بود، ولی با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و همچنین پارامترهای فنی الزامی برای عدم اتفاق افتادن پدیده جداشدگی در بتن آسفالتی، بهترین مخلوط را ترکیبی از دو ماده

در مرتبه دوم و سوم قرار گرفتند [Aman et al. 2014]. حسامی و همکاران از چهار روش برای بررسی حساسیت رطوبتی استفاده کردند که شامل نسبت مقاومت مارشال، نسبت مدول برجهنگی، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت انرژی شکست، بود. نتیجه آن شد که استفاده از مصالح سرباره فولادی به جای بخش درشت‌دانه مصالح سنگدان‌های مخلوط‌های گرم حساسیت رطوبتی را بهبود نداد، بلکه زمانی که از این مصالح در مخلوط‌های نیمه گرم استفاده شود سبب بهبود مقاومت مخلوط در برابر رطوبت می‌گردد [Hesami et al. 2015].

در این پژوهش برای یافتن قیر بهینه پس از افزودن ایوانیک و زایکوترم هرکدام به میزان ۰/۱ و ۰/۳ درصد وزنی قیر به مخلوط، نمونه‌های مارشال حاوی افزودنی و فاقد آن تهیه شد. این دو ماده با تأثیر بر سطح آب‌دوست سنگ‌دانه‌ها، آن‌ها را قیر دوست نموده و باعث می‌شوند که پیوند قیر و سنگ‌دانه محکم‌تر صورت گیرد. در ادامه برای کنترل خرابی رطوبتی آزمایش کشش غیرمستقیم (لاتمن اصلاح‌شده) و جوشان تگزاس و برای کنترل سایر عملکردهای آسفالت اصلاح‌شده، آزمون خزش دینامیکی، مدول برجهنگی و استقامت مارشال نیز بر روی نمونه‌های حاوی قیر بهینه انجام شد.

۲. مصالح مصرفی

۲-۱ قیر

قیر مصرفی که قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ (PG 64-16) است. در تمامی نمونه‌ها از این قیر استفاده شده است. مشخصات فیزیکی قیر مورداستفاده مطابق جدول ۱ است.

معرفی کردند [Fakhri and Bolhasani, 2011]. میرزابابایی از زایکوترم به میزان ۰,۱ درصد نسبت به وزن قیر برای ارزیابی حساسیت رطوبتی آسفالت نیم‌گرم و داغ با دانه‌بندی متفاوت مصالح سنگی از نوع سیلیس و آهکی استفاده کرد. وی پس از انجام آزمایش‌های کشش غیرمستقیم، مدول برجهنگی و جوشان تگزاس، با مقایسه نتایج بین مخلوط نیم‌گرم و داغ دریافت زایکوترم می‌تواند باعث افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های نیم‌گرم نسبت به مخلوط داغ رایج گردد [Mirzababaei, 2016]. عامری و همکاران دو نوع نانو رس مونت‌موریلونیت CA و CB را در درصدهای ۲، ۴ و ۶ نسبت به وزن قیر با قیر بهینه هرکدام، مخلوط نموده و پس از انجام آزمایش کشش غیرمستقیم و جوشان تگزاس، دریافتند که نانو رس CA دارای عملکرد بهتری در مقابل CB دارد. همچنین برای هر دو مخلوط میزان ۶ درصد این مواد بهترین نتایج را به همراه داشت [Ameri et al. 2015]. ایمانی نسب و جودکی افزودنی‌های Tackamin-200 و Wetfix را در درصدهای ۰,۳، ۰,۴، ۰,۵ و ۰,۶ نسبت به وزن قیر بهینه به مخلوط‌های آسفالتی افزود. در پایان دریافت که ۰,۵ درصد از هرکدام این مخلوط‌ها بهترین نتیجه را در آزمایش حساسیت رطوبتی می‌دهد [Imaninasab and Joodaki, 2016]. امینی و بلوکات کامپوزیت لاستیک استایرن بوتادین رابر و نانو رس را به مخلوط‌های آسفالتی افزودند. نانو کامپوزیت با نسبت‌های ۴:۶ و ۳:۷ به اندازه‌های ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی قیر، نشان داد که مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک، تا ۶,۶ درصد، در حالت تر تا ۳۰,۲۵ درصد و نسبت حالت تر به خشک تا ۲۵,۹۶ درصد بهبود می‌یابد. این مقادیر نشان‌دهنده بهبود چشم‌گیر ویژگی‌های آسفالت در برابر رطوبت است [Amini and Blokat, 2014]. حضور آب در مخلوط آسفالتی متخلخل به‌طور زیان‌آوری روی سطح مشترک قیر و سنگ‌دانه و اضمحلال مقاومت چسبندگی مخلوط قیری تأثیر می‌گذارد، بنابراین وجود آب و فضای خالی زیاد، این مخلوط‌ها را مستعد عریان شدگی می‌سازد. یوسری امان و همکارانش از پودر سنگ، سیمان پرتلند و یک پودر خاکستری‌رنگ ساخته شده از کلسیم اکسید (PMD) به‌عنوان فیلر در مخلوط متخلخل استفاده کردند و با تحلیل نتایج دریافتند که این پودر در کنار داشتن کمترین ضریب نفوذپذیری، بالاترین مقاومت رطوبتی را داشت و پس‌از آن سیمان و آهک

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی قیر خالص مورد استفاده

حدود مجاز	طریق نشریه	قیر ۶۰/۷۰	روش آزمایش
۲۳۴			
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	---	۱/۰۳	ASTM D-70
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۶۰-۷۰	۶۴	ASTM D-5
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۴۹-۵۶	۵۴	ASTM D-36
انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	حداقل ۱۰۰	۱۰۲	ASTM D-113
نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)	حداقل ۲۳۲	۳۰۵	ASTM D-92
نقطه احتراق (درجه سانتی‌گراد)	---	۳۱۷	ASTM D-70

شبکه آبریز در سطح ایجاد می‌گردد (شکل ۱). این پیوند با مقاومت در برابر نفوذ آب، بین قیر و سنگدانه، از جریان شدگی مصالح سنگی در آسفالت جلوگیری می‌کند [Mirzababaei, 2016].

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی ایوانیک مصرفی

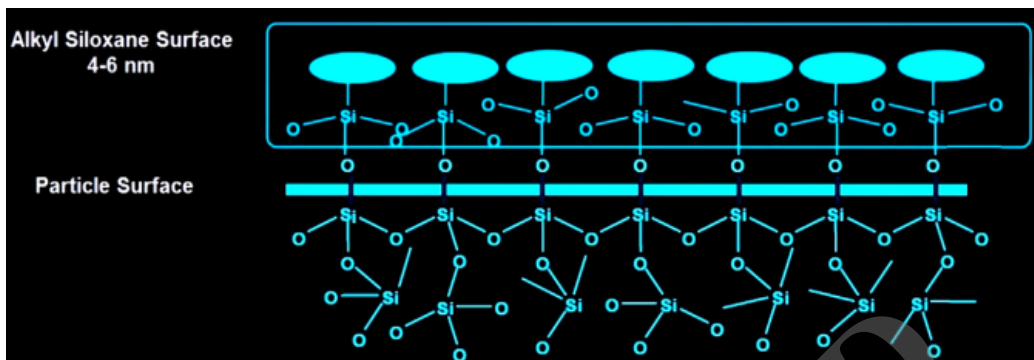
شکل ظاهری	مایع شفاف
فعال	٪ ۱۰۰
ویسکوزیته	چسبناکی متوسط
ارزش اسید	۳۵
ارزش آمین	۱۵۰
میزان آب	٪ ۲

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی زایکوترم مصرفی

وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰,۹۷
شکل ظاهری	مایع زرد کم‌رنگ
بو	عاری از بو
نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)	۸۰
نقطه انجماد (درجه سانتی‌گراد)	۵

۲-۲ مواد ضد جریان شدگی

در این تحقیق از نانو ماده زایکوترم^۱ که نسل پیشرفته‌ای از افزودنی‌های سیلان با مزایای متعدد و تولیدی شرکت زایدکس هندوستان است با ایوانیک^۲ دگوسا (TEGO Addibit L) ساخت شرکت ایوانیک آلمان که یک افزودنی مایع با پایه پلی‌آمین‌های فتی اسیدی است، به عنوان افزودنی‌های قیر استفاده شده است. مطابق با توصیه‌های شرکت سازنده نانو مواد، اختلاط قیر با این نانو مواد در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به وسیله یک همزن^۳ با قدرت ایجاد گردابی به عمق ۲ تا ۳ سانتی‌متر صورت گرفت. برای اطمینان از توزیع یکنواخت، نانو مواد با یک سرنگ به صورت قطره‌قطره در مدت ۱۰ دقیقه به آمیخته اضافه شد. مشخصات این دو ماده افزودنی در جداول ۲ و ۳ آمده است. عملکرد اصلی مواد ضد جریان شدگی بر روی سطح سنگدانه‌ها^۶ می‌باشد. هسته عملکردی آنها در دو فاز آلی و معدنی است که از طریق پیوند کوالانسی با قیر و سنگدانه ارتباط برقرار می‌کنند. در واقع زمانی که این مواد در دمای بالا با قیر مخلوط می‌شوند، بخش آلی در قیر حل می‌شود. در اثر حرارت پیوند هیدروژنی موجود در سطح سنگدانه شکسته شده و مولکول H₂O تولید می‌نماید که بخش معدنی مواد ضد جریان شدگی به کمک این مولکول در سطح سنگ‌دانه‌ها پیوند کوالانسی Si-O-Si تولید می‌کنند و در نهایت یک



شکل ۱. ساختار پیوند کوالانسی بین مواد سیلان و مصالح سنگی

[Ameri et al. 2015]. با این حال مقاومت این مصالح در برابر رطوبت آن چنان هم کافی نیست که بتواند از ایجاد خرابی‌های ناشی از رطوبت جلوگیری کند. منحنی دانه‌بندی (مطابق دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای آستر و رویه) مصرفی برای ساخت نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

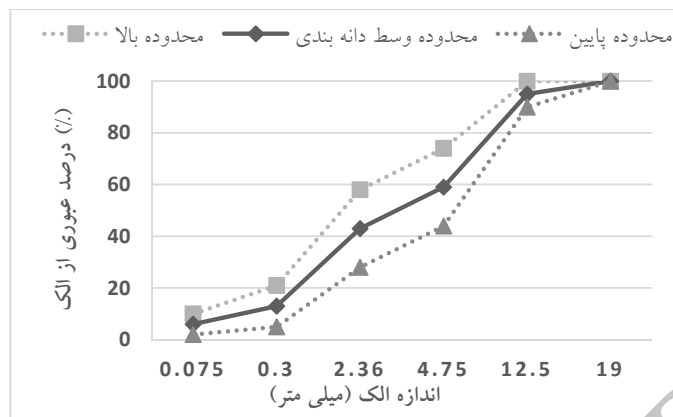
۲-۳ مصالح سنگی

مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق از نوع مصالح شکسته آهکی که از کارخانه آسفالت تلو واقع در شرق شهرستان تهران تهیه شده است. از پودر سنگ آهک به عنوان فیلر (عبوری از الک ۲۰۰) استفاده شده است. مشخصات مصالح سنگی به شرح جدول ۴ است. اگرچه مصالح سنگی آهکی نسبت به مصالح سنگی سیلیسی حساسیت کمتری نسبت به رطوبت دارند

جدول ۴. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

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

ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی.....



شکل ۲. نمودار حدود بالا، پایین و وسط دانه‌بندی شماره ۴ (نشریه ۲۳۴)

تراکم آزمایشگاهی و میدانی، نمونه‌هایی استوانه‌ای در در صدهای قیر بهینه، با استفاده از دستگاه ژیراتوری رو سازی ممتاز ساخته شدند [ASTM D3387, 2003]. مقاومت در برابر رطوبت برای نمونه‌های متراکم نشده با آزمایش جوشان تگزاس و برای نمونه‌های متراکم شده با آزمایش‌های کشش غیرمستقیم (لانمن اصلاح شده) انجام می‌گیرد. در پایان برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی و مقاومتی، آزمون خزش دینامیکی، مدول برجهنگی و استقامت مارشال انجام خواهد شد.

۳-۲ آزمایش جوشان تگزاس ۴

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D3625 با عنوان اثر آب بر مصالح پو شانده 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 مدت ۱۰ دقیقه در آب در حال جوشیدن قرار می‌گیرد و پس از آن قیر جدا شده از سنگ‌دانه را از سطح آن برداشته و مخلوط در دمای محیط سرد می‌شود. مخلوط را از آب خارج کرده و برای خشک شدن روی کاغذ سفیدی پخش می‌شود. معیار ارزیابی آسیب رطوبتی، میزان کاهش درصد مناطق پوشش داده شده توسط قیر بر روی سنگ‌دانه به دلیل قرار گرفتن در شرایط آب جوشان است. هرچند این آزمایش بر اساس مشاهدات بصری و به صورت کیفی است و ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی را

۳. روش آزمایش

۳-۱ طرح اختلاط

طرح اختلاط نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D1599 است. جهت تعیین قیر بهینه زایکوترم و ایوانیک هر کدام به اندازه ۰،۱ و ۰،۳ درصد وزن قیر، با قیر مخلوط می‌شوند. در مجموع با در نظر گرفتن قیر خالص، پنج نوع قیر خواهیم داشت. سنگ‌دانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۶۰-۱۷۰ درجه سانتی‌گراد در گرم‌خانه حرارت می‌بینند تا کاملاً خشک شوند. قیر نیز تا دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد گرم شده و سپس سنگ‌دانه‌ها با هر نوع از قیر در در صدهای ۴، ۴،۵، ۵، ۵،۵ و ۶ درصد نسبت به وزن مخلوط، ترکیب و مخلوط در داخل استوانه استاندارد مارشال با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶،۲۵ سانتی‌متر ریخته شده و توسط چکش مارشال کوبیده می‌شود. تعداد ضربات برای شبیه‌سازی ترافیک سنگین ۷۵ ضربه در هر دو طرف نمونه است و از هر درصد قیر، سه نمونه ساخته می‌شود. مقدار قیر بهینه بر اساس پارامترهای حداکثر وزن مخصوص، حداکثر مقاومت فشاری، درصد فضای خالی آسفالت متراکم شده، روانی و درصد فضای خالی مصالح سنگی در آسفالت متراکم شده به دست آمده است [ASTM D1599, 2000]. مقادیر قیر بهینه یافت شده از این آزمایش برای نمونه‌های شاهد، حاوی زایکوترم و حاوی ایوانیک به ترتیب برابر ۴،۹، ۴،۸ و ۴،۹ درصد است. برای شبیه‌سازی بهتر

بررسی نمی‌کند، اما یک روش سریع برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های متراکم نشده است [ASTM D3625, 2001].

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

این استاندارد، حساسیت رطوبتی نمونه‌های قیری متراکم شده را ارزیابی می‌کند. حداقل ۶ نمونه از هر نوع مخلوط با فضای خالی ۶ تا ۸ درصد نیاز است. بنابراین، قبل از تراکم نمونه با دستگاه ژیراتوری، در قسمت داده‌های کامپیوتری، معیار اتمام تراکم را رسیدن به ۷ درصد فضای خالی معرفی می‌کنیم. نیمی از نمونه‌ها برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد، توسط پمپ خلاء تحت فشار ۳۵ کیلو پاسکال قرار می‌گیرند. پس‌از آن، نمونه‌ها را در پلاستیک حاوی ۱۰ میلی لیتر آب، گذاشته و به مدت ۱۶ ساعت در فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد منجمد می‌شوند. سپس آن‌ها را به حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد منتقل کرده و به مدت ۲۴ ساعت در حمام نگهداری می‌شوند. در مرحله آخر دمای حمام را به ۲۵ درجه کاهش داده و به مدت ۲ ساعت در این دما باقی می‌مانند و نهایتاً نمونه‌ها آماده بارگذاری در شرایط اشباع هستند. برای انجام آزمایش در شرایط خشک نیز، نیمی دیگر از نمونه‌ها را در درجه حرارت ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. بارگذاری آزمایش کشش غیرمستقیم، با سرعت ثابت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌شود و تا مشاهده ترک عمودی بر روی نمونه ادامه می‌یابد. در نهایت مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه اندازه‌گیری می‌شود. بعد از به دست آوردن مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌ها، مقاومت کششی غیرمستقیم از رابطه شماره ۱ محاسبه می‌شود [NCHRP Report AASHTO T283, 2000].

444, 2000; در شکل ۳ نحوه قرار گرفتن نمونه و بارگذاری آن زیر دستگاه کشش غیرمستقیم، به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

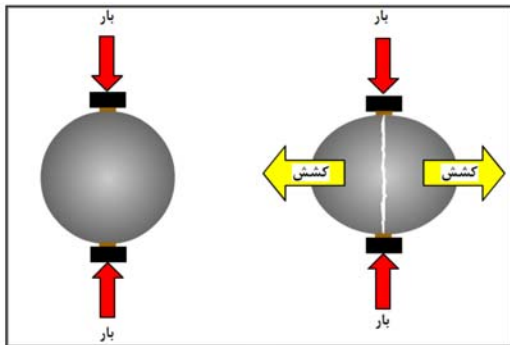
$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (1)$$

ITS⁵: مقاومت کششی برحسب کیلو پاسکال

P: بیشینه بار برحسب نیوتن

D: قطر نمونه برحسب میلی‌متر

t: ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر



شکل ۳. نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه کشش غیرمستقیم و بارگذاری آن

مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت را با نسبت مقاومت کششی نشان می‌دهند که بر اساس رابطه ۲ به دست می‌آید. مقدار ITS در این رابطه، مقدار میانگین آن برای نمونه‌های تحت شرایط اشباع و خشک است. حداقل مقدار TSR^۶ باید ۸۰ درصد باشد و هرچه این پارامتر بیشتر باشد، نشان‌دهنده مقاومت رطوبتی بهتر است [AASHTO T283, 2000].

$$TSR = \frac{ITS_{sat}}{ITS_{dry}} \quad (2)$$

۳-۴ آزمایش مدول برجهنگی

مطابق با استاندارد ASTM D4123-۸۲، در ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس با اعمال بار نیمه سینوسی ۴۰۰ کیلو نیوتن و دوره بارگذاری ۰,۱ ثانیه (۰,۹ ثانیه استراحت)، مدول برجهنگی نمونه‌های آسفالتی اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش با دستگاه UTM 5^۷ انجام گردید که مدول برجهنگی به صورت کشش غیرمستقیم، با استفاده از رابطه ۳ و توسط نرم‌افزار محاسبه شد. نتیجه برای هر نوع مخلوط به صورت میانگینی از سه نمونه تحت آزمایش گزارش می‌شود. از آنجاکه بارهای اعمالی در این آزمایش مقادیر کمی دارند، آزمون مدول برجهنگی مخرب نبوده و می‌توان از نمونه‌های آن برای انجام

سایر آزمایش‌ها استفاده نمود [ASTM D4123-82, 1996].

$$M_R = \frac{P(v + 0.2734)}{\delta t} \quad (3)$$

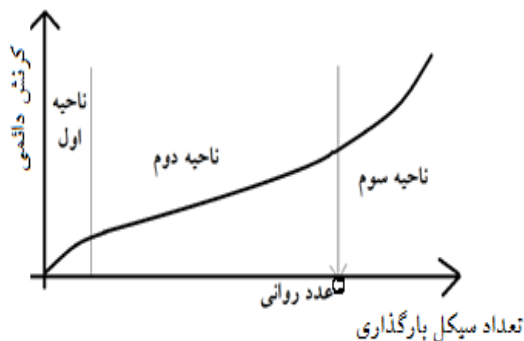
M_R : مدول برجهندگی برحسب مگا پاسکال

P: بار اعمال شده برحسب نیوتن

v: نسبت پواسون

δ : تغییر شکل قابل برگشت برحسب میلی‌متر

t: ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر



شکل ۴. منحنی کرنش تجمعی کل در برابر سیکل بارگذاری در آزمایش خزش

۴. نتایج و تفسیر داده‌ها

۴-۱- مقاومت مارشال

نتایج حاصل از مقاومت مارشال در شکل زیر ارائه شده است. افزودن ماده ضد عریان شدگی با بهبود چسبندگی بین سنگ‌دانه و قیر باعث افزایش قدرت پیوند بین آن دو شده و همان‌طور که در تمامی نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده دیده می‌شود، مقاومت مارشال نسبت به نمونه فاقد افزودنی بیشتر است. این افزایش مقاومت در نمونه حاوی ۰٫۱ درصد زایکوترم بیشتر خود را نشان می‌دهد. مخلوط ایوانیک نیز در ۰٫۳ درصد مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهد.

۳-۵ خزش دینامیکی

در این پژوهش آزمایش خزش دینامیکی با دستگاه UTM-5 انجام شد. نمونه‌ها قبل از بارگذاری خزشی به مدت ۴ ساعت در محفظه دستگاه، در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده و سپس بارگذاری نیمه سینوسی با اعمال تنش ۴۵۰ کیلو پاسکال به صورت ۰٫۵ ثانیه بارگذاری و ۱٫۵ ثانیه استراحت انجام می‌شود [Australian Standard, 2015]. نتایج این آزمایش که بر روی سه نمونه از هر طرح اختلاط بهینه انجام شد، به صورت منحنی کرنش تجمعی در برابر سیکل‌های بارگذاری مطابق شکل ۴ ارائه می‌شود. منحنی کرنش تجمعی به ناحیه تقسیم می‌شود که در ناحیه اول تغییر مکان‌های دائم به‌طور ناگهانی روی هم انباشته می‌شوند، در ناحیه دوم شیب نمودار به مقدار ثابتی می‌رسد و در ناحیه سوم دوباره شیب تغییر مکان دائم افزایش می‌یابد و مقدار تغییر مکان دائم به شدت روی هم انباشته می‌شود. تعداد سیکل در شروع ناحیه سوم به عدد روانی شناخته می‌شود که معیاری برای مقایسه مقاومت شیار شدگی نمونه‌های آسفالتی است [NCHRP Report 465, 2002].



شکل ۵. استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی

۴-۲ آزمایش جوشان تگزاس

از این آزمایش برای ارزیابی بصری و سریع میزان حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. اشکال ۶، ۷ و ۸ نمونه‌های آسفالتی قبل و بعد از آزمایش جوشان را نشان می‌دهند. نواحی مشخص شده در تصاویر سمت چپ، نشان دهنده سطوح کاملاً عریان شده سنگدانه از قیر است. قبل از انجام آزمایش نمونه‌های حاوی افزودنی دارای سطحی براق‌تر از نمونه‌های فاقد افزودنی بوده که این بیانگر پوشش بهتر سنگدانه توسط قیر است. سطح نمونه‌های حاوی زایکوترم

قبل از انجام آزمایش به دلیل عملکرد مناسب ماده زایکوترم در پوشش دهی قیر بر روی سنگدانه‌ها، کمی براق‌تر از سایر نمونه‌ها است. با ارزیابی بصری به نظر می‌رسد که نمونه‌های حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم و ۰/۳ درصد ایوانیک به ترتیب بهترین نتایج را در مقاومت رطوبتی از خود نشان دهند و این درحالی است که نمونه‌های فاقد افزودنی به شدت دچار عریان شدگی می‌شوند.



فاقد افزودنی-بعد از آزمایش

فاقد افزودنی-قبل از آزمایش

شکل ۶. نمونه‌های آسفالتی فاقد افزودنی قبل و بعد از آزمایش جوشان تگزاس



۰.۱ درصد زایکوترم-بعد از آزمایش

۰.۱ درصد زایکوترم-قبل از آزمایش



۰.۳ درصد زایکوترم-بعد از آزمایش

۰.۳ درصد زایکوترم-قبل از آزمایش

شکل ۷. نمونه‌های آسفالتی حاوی زایکوترم قبل و بعد از آزمایش جوشان تگزاس



۰.۱ درصد ایوانیک-بعد از آزمایش

۰.۱ درصد ایوانیک-قبل از آزمایش

۰.۳ درصد ایوانیک-بعد از آزمایش

۰.۳ درصد ایوانیک-قبل از آزمایش

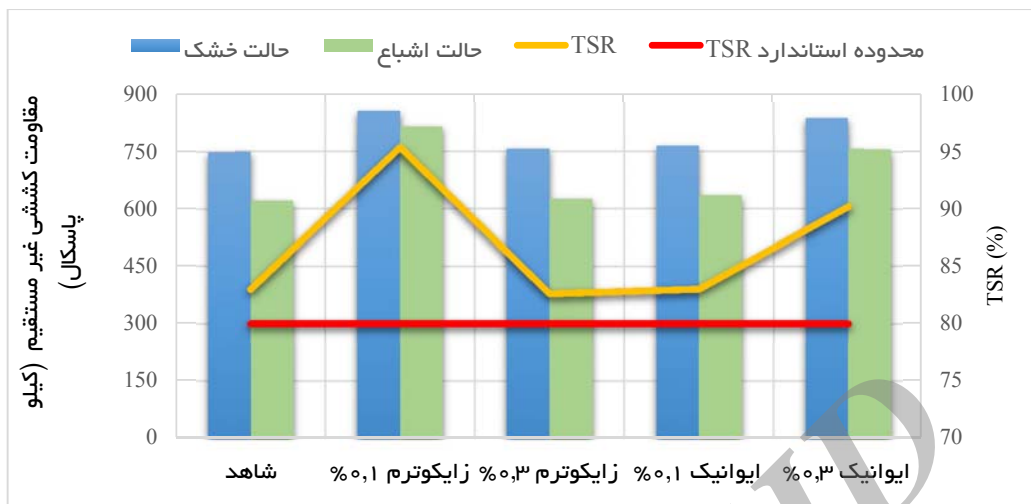
شکل ۸. نمونه‌های آسفالتی حاوی ایوانیک قبل و بعد از آزمایش جوشان تگراس

مدول برجهندگی پاسخ روسازی برحسب تنش‌های مکانیکی و کرنش‌های متناظر است و متغیر بسیار مهمی در رویکردهای طراحی مکانیکی برای سازه‌های روسازی است و با استفاده از آن ضخامت لایه‌های آسفالتی تعیین می‌شود. هرچه مدول برجهندگی مقدار بالاتری را داشته باشد، ضخامت لایه آسفالتی کاهش می‌یابد، اما باید توجه داشت که مقدار بیشتر از $3/1$ گیگا پاسکال، پتانسیل ترک خوردگی را افزایش می‌دهد. زیرا با افزایش مدول برجهندگی قابلیت برگشت پذیری تغییر شکل‌های ایجادشده کاهش می‌یابد. با تغییر در خواص قیر، مدول برجهندگی حساسیت بیشتری نسبت به مقاومت کششی از خود نشان می‌دهد [Imaninasab and Joodaki, 2016]. نتایج مدول برجهندگی در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش ایوانیک مدول برجهندگی افزایش می‌یابد ولی زایکوترم مدول را کاهش داده است. این نشان از افزایش پتانسیل ترک خوردگی در مخلوط‌های حاوی ایوانیک است. افزایش قدرت پیوند باعث افزایش سختی در نمونه‌ی حاوی $0/1$ درصد زایکوترم شده که مدول بیشتری را نتیجه می‌دهد.

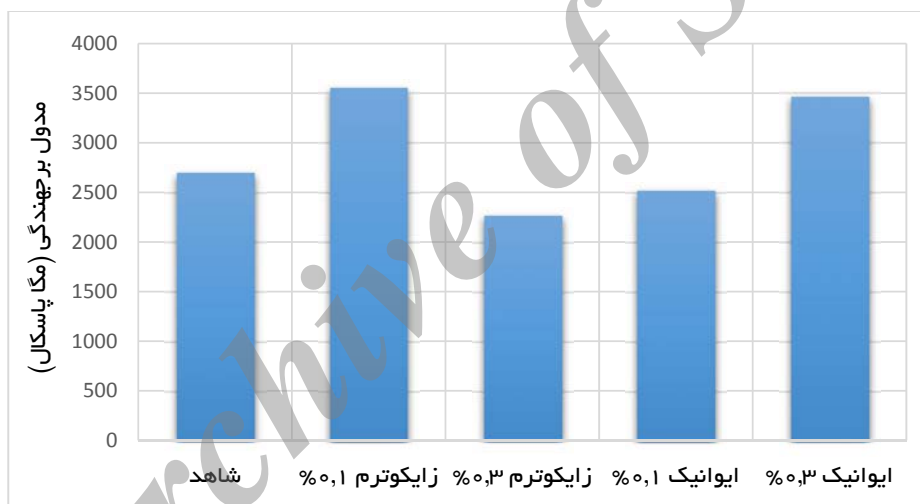
۳-۴ آزمایش حساسیت رطوبتی (آزمایش کشش غیرمستقیم AASHTO T283)

شکل ۹ نتایج آزمون کشش غیرمستقیم را نشان می‌دهد. با وجود آنکه نسبت کشش غیرمستقیم برای تمامی نمونه‌ها بالاتر از 80 درصد است، بهبود چسبندگی قیر و سنگ‌دانه باعث شده تا نمونه‌های اصلاح شده مقاومت کششی بیشتری را در هر دو حالت خشک و اشباع از خود نشان دهند. همانطور که از نتایج آزمایش جوشان تگراس انتظار می‌رفت، بیشترین نسبت مقاومت کششی برای نمونه‌های حاوی $0/1$ درصد زایکوترم و پس از آن $0/3$ درصد ایوانیک حاصل شد و در حالت کلی زایکوترم در آسیب رطوبتی عملکرد بهتری نسبت به ایوانیک دارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که زایکوترم می‌تواند با اصلاح پیوند بین قیر و سنگ‌دانه، مقاومت چسبندگی بین آن‌ها را به مقدار بیشتری نسبت به ایوانیک افزایش دهد.

۴-۴ مدول برجهندگی



شکل ۹. نسبت مقاومت کششی و مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع



شکل ۱۰. مدول برجهنگی

شکل ۱۱ نتایج آزمون خزش دینامیکی را نشان می‌دهد. افزودنی زایکوترم و ایوانیک به ترتیب در مقادیر ۰/۱ و ۰/۳ درصد نسبت به وزن قیر، بهترین عملکرد را در ارزیابی مقاومت شیارشدگی دارا هستند و در این مقادیر، با بهبود پیوند قیر و سنگدانه موجب شده اند تا مخلوط اصلاح شده مقاومت بیشتری تحت بار خزشی داشته باشد.

۵. تحلیل آماری یک طرفه ANOVA

۴-۵ خزش دینامیکی

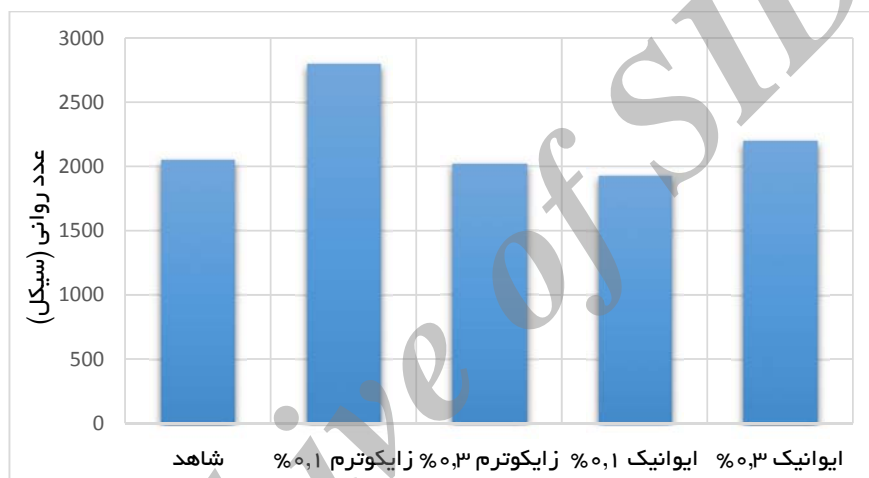
خروجی نرم‌افزار UTM نمودار کرنش تجمعی است و از آنجا که مخلوط‌های آسفالتی در این آزمایش، از شرایط مهار جانبی که در حالت واقعیت از آن برخوردار است بهره نمی‌برد، تغییر مکان بیشتری در مقابل اعمال بار از خود نشان می‌دهند [ASTM D3625, 2001] و نمی‌توان از تغییر مکان تجمعی نمونه‌ها، به‌عنوان عمق شیار استناد نمود. بنابراین، با یافتن عدد روانی (نقطه تغییر شیب سریع نمودار کرنش تجمعی در ناحیه سوم) می‌توان مقاومت شیار شدگی نمونه‌ها را مقایسه قرار داد.

ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی.....

می توان نتیجه گرفت که تفاوت میانگین ها ناشی از خطاست و برعکس.

جدول ۵ نشان دهنده نتایج حاصل از این تحلیل است. مطابق با نتایج این تحلیل دو افزودنی زایکوترم و ایوانیک با قابلیت اطمینان ۹۵ درصد اثر بیشتری بر روی نتایج آزمایش مدول برجهندگی و حساسیت رطوبتی داشته اند. به عبارت دیگر میزان وار یانس برون گروهی کمتر از وار یانس درون گروهی است و اثرگذاری افزودنی بر نتایج آزمایشها از لحاظ تحلیل آماری قابل استناد است.

در این تحقیق بمنظور اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی از آنالیز ANOVA یک طرفه برای دو متغیر زایکوترم و ایوانیک بر روی نتایج مدول برجهندگی و حساسیت رطوبتی صورت پذیرفت. چون پراکندگی یا تفاوت بین میانگین ها، ترکیبی از پراکندگی درون گروهی و پراکندگی مربوط به تاثیرات عمل آزمایشی است باید واریانسهای درون گروهی و برون گروهی را باهم مقایسه کنیم. یاد آوری می شود که واریانس درون گروهی شاخصی از واریانس خطای نمونه گیری و واریانس برون گروهی ناشی از تاثیر متغیر آزمایشی است حال اگر واریانس درون گروهی بزرگتر از واریانس برون گروهی باشد



شکل ۱۱. خزش دینامیکی

جدول ۵. نتایج تحلیل یک طرفه ANOVA بر روی نتایج مدول برجهندگی و حساسیت رطوبتی

		مدول برجهندگی				
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
زایکوترم	Between Groups	2545800.000	2	1272900.000	6.340	.033
	Within Groups	1204570.000	6	200761.667		
	Total	3750370.000	8			
ایوانیک	Between Groups	1493600.000	2	746800.000	4.488	.064
	Within Groups	998402.000	6	166400.333		
	Total	2492002.000	8			
		حساسیت رطوبتی (TSR)				
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
زایکوترم	Between Groups	.024	2	.012	3.890	.053
	Within Groups	.019	6	.003		
	Total	.043	8			
ایوانیک	Between Groups	.018	2	.003	.377	.42
	Within Groups	.014	6	.002		
	Total	.032	8			

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر افزودنی‌های ضد عریان شدگی ایوانیک و زایکوترم بر حساسیت رطوبتی و عملکرد دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق به شرح زیر است.

- افزودن مقدار مشخصی از مواد ضد عریان شدگی ایوانیک و زایکوترم باعث افزایش چسبندگی قیر و قیر و سنگ‌دانه می‌شود و علاوه بر ارتقاء مقاومت رطوبتی، عملکرد دینامیکی آسفالت اصلاح‌شده را نیز بهبود بخشیده است. در واقع این دو ماده از طریق تشکیل پیوند کووالانسی بین قیر و سنگ‌دانه ارتباط برقرار کرده و با ایجاد یک لایه آب‌گریز در سطح سنگ‌دانه، مانع از نفوذ آب در فصل مشترک قیر و مصالح سنگی می‌گردد و در نتیجه از پدیده عریان شدگی جلوگیری می‌نمایند.
- آزمون حساسیت رطوبتی جوشان تگراس، به صورت بصری یک پیش‌بینی سریع از عملکرد نمونه‌ها در مقابل رطوبت ارائه می‌دهد. همچنانکه پیش‌بینی عملکرد بهتر مقاومت رطوبتی زایکوترم نسبت به ایوانیک در نهایت به حقیقت پیوست.
- زایکوترم و ایوانیک به ترتیب در مقادیر ۰/۱ و ۰/۳ در صد وزن قیر، با بهبود چسبندگی قیر و سنگ‌دانه، مقاومت کششی غیرمستقیم را به میزان ۱۵ و ۹ درصد نسبت به نمونه فاقد افزودنی افزایش داده‌اند.
- مدول برجهندگی مخلوط‌های اصلاح‌شده با زایکوترم و ایوانیک به ترتیب به میزان ۰/۱ و ۰/۳ درصد وزن قیر، بیشترین مقادیر را داشتند که این نشان از افزایش میزان باربری این مخلوط‌ها ناشی از پیوند بهتر میان سنگ‌دانه‌ها توسط قیر است که در نهایت منجر به کاهش ضخامت روسازی در طراحی‌ها خواهد شد.
- در ارزیابی مقاومت شیار شدگی نمونه‌های حاوی ۰/۱ در صد زایکوترم و پس‌از آن ۰/۳ در صد ایوانیک نسبت به وزن قیر، بهترین عملکرد را داشتند و سایر نمونه‌های دارای افزودنی تقریباً همانند نمونه شاهد

عمل کردند. زایکوترم با اصلاح پیوند قیر و سنگ‌دانه، باعث شد تا پیوستگی بین سنگ‌دانه‌ها بیشتر شود و مقاومت شیار شدگی را افزایش دهد.

- ایوانیک هرچند به عنوان یک افزودنی جدید باعث بهبود مقاومت رطوبتی و تغییر شکل دائم می‌شود، اما با این حال به لحاظ ارزیابی‌های انجام شده نانو زایکوترم با وجود قدمت بیشتر، مقاومت بیشتری را نشان داده است. این مهم باعث می‌شود تا علاوه بر کاهش ضخامت روسازی‌های آسفالتی اصلاح شده با زایکوترم، نیاز به تعمیر و نگهداری آن‌ها نیز کاهش یابد.

۷. پی‌نوشت‌ها

- 1- Zycotherm
- 2- evonik
- 3- Vortex
- 4- Texas Boiling Test
- 5- Indirect Tensile Strength
- 6- Tensile Strength Ratio
- 7- Universal Testing Machine
- 8- Resilient Modulus

۸. مراجع

-امینی، بهنام و رجب بلوکات، محمد جواد (۱۳۹۲) "بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با افزودن کامپوزیت استایرن بوتادین لاستیک و نانورس"، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره سیزدهم، شماره ۲، ص. ۱۲۳-۱۳۲.

-عامری، محمود؛ وامق، مصطفی؛ روح الامینی، حامد و بمانا، کیوان (۱۳۹۴) "ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانو رس"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال ششم، شماره چهارم، ص. ۶۱۳-۶۲۶.

-فخری، منصور و بوالحسنی، محمد (۱۳۸۹) "بررسی تاثیر استفاده هم‌زمان فیلر آهکی و آنتی‌اساتریپینگ مایع بر روی

- Australian Standard (2015) "Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt Dynamic creep test", AS 2891-12-1, Standard Australian, Sydney, Australia.
- Behbahani, H., Ziari, H., Kamboozia, N., Khaki, A. M. and Mirabdolazimi, S. M. (2015) "Evaluation of performance and moisture sensitivity of glassphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an anti-stripping additive", Construction and Building Materials, Vol. 78, pp. 60-68.
- Esarwi, A. M., Hainin, M. R. and Chik, A. A. (2008) "Stripping resistance of Malaysian hot mix asphalt mixture using hydrated lime as filler", University Technology Malaysia.
- Fang, C., Yu, R., Liu, S. and Li, Y. (2013) "Nanomaterials applied in asphalt modification: a review", Journal of Materials Science and Technology, Vol. 29, No. 7, pp. 589-594.
- Ford Jr, M. C., Manke, P. G. and O'Bannon, C. E. (1974) "Quantitative evaluation of stripping by the Surface Reaction Test", In Transportation Research Record 515, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp 40-54
- Hesami, S., Ameri, M., Goli, H. and Akbari, A. (2015) "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 16, pp. 745-759.
- Imaninasab, R. and Joodaki, S. (2016) "Performance evaluation of polyamine anti-stripping additives", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, pp.1-9.
- Kringos, N. and Scarpas, A. (2008) "Physical and mechanical moisture susceptibility of asphaltic mixtures", International Journal of Solids and Structures, Vol. 45, No. 9, pp.2671-2685.
- Mansourian, A. and Gholamzadeh, S. (2016) "Moisture susceptibility of hot mix asphalt containing asphalt binder modified with خرابی عریان شدگی بتن آسفالتی گرم"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، ایران.
- Aman, M. Y., Shahadan, Z. and Noh, M. Z. M. (2014) "A comparative study of anti-stripping additives in porous asphalt mixtures", Journal Teknologi, Vol. 70, No. 7, pp.139-145.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2000) "Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage", Aashto T283-99, Washington, DC, USA.
- American Society for Testing and Materials, (1996) "Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures", ASTM D 4123-82, West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials, (2000) "Standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using - Marshall Apparatus", ASTM D1559, West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials, (2001) "Standard practice for effect of water on bituminous coated aggregate using boiling water", ASTM D 3625 - 96, West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials, (2003) " Standard test method for compaction and shear properties of bituminous mixtures by means of the U.S. Corps of Engineers Gyrotory Testing Machine (GTM)", ASTM D 3387, West Conshohocken, PA, USA.
- Ameri, M., Kouchaki, S. and Roshani, H. (2013) "Laboratory evaluation of the effect of nano-organosilane anti-stripping additive on the moisture susceptibility of HMA mixtures under freeze-thaw cycles", Construction and Building Materials, No. 48, pp. 1009-1016.
- Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, 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, Vol. 25, No. 3, pp. 1379-1387.

Transport Research Board, National Research Council: Washington DC.

-National Cooperative Highway Research Program (2002) "Simple performance test for superpave mix design", NCHRP Report 465, Transportation Research Board, National Academies Press Washington D.C.

-Xiao, F. and Amirkhanian, S. N. (2010) "Effects of liquid antistrip additives on rheology and moisture susceptibility of water bearing warm mixtures", Construction and Building Materials, Vol. 24, No. 9, pp.1649-1655.

nanocomposite", Road Materials and Pavement Design, pp.1-14.

-Mirzababaei, P. (2016) "Effect of zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations", Construction and Building Materials, Vol. 116, pp. 403-412.

-National Cooperative Highway Research Program (2000) "Compatibility of a test for moisture-induced damage with superpave volumetric mix design" NCHRP Report 444,

Archive of SID

ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی.....

محمود عامری، درجه کارشناسی را در سال ۱۹۸۱ از دانشگاه تکراس و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری در سال ۱۹۸۳ را از همان دانشگاه اخذ نمود. در سال ۱۹۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری از دانشگاه تکراس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی روسازی، مواد و مصالح روسازی و مدیریت روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران است.



مصطفی وامق، درجه کارشناسی را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری در سال ۱۳۹۲ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود و از سال ۱۳۹۳ مشغول به تحصیل در مقطع دکتری رشته مهندسی عمران - راه و ترابری در دانشگاه علم و صنعت ایران است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی روسازی، مواد و مصالح روسازی بوده و در حال حاضر مدرس مدعو در دانشگاه هرمزگان (بندرعباس) است.



ایمان امیری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۹۳ از دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری در سال ۹۵ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان روسازی آسفالتی، راه آهن و پل بوده و در حال حاضر در شرکت مهندسی مشاور در زمینه مهندسی راهسازی و روسازی در حال فعالیت است.



سید فرهاد چاوشیان نائینی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری در سال ۱۳۹۶ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان روسازی آسفالتی، مصالح قیر و در حال حاضر در شرکت مهندسی مشاور در زمینه مهندسی راهسازی و روسازی در حال فعالیت است.

