Archive of SID

تأثیر زایکوترم بر خواص عملکردی آسفالت نیمه‌گرم تهیه شده با مصالح آهکی و سیلیسی

حسن زیاری، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
پیمان میرزابابایی*، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
رضوان باباگلی، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
علی منیری، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: peyman_mirzababaei@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۶ - پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۰۱

چکیده

امروزه فناوری آسفالت نیمه‌گرم[1] به‌عنوان روشی کارآمد برای کاهش هزینه‌های تولید آسفالت، مصرف سوخت و آلودگی-های زیست‌محیطی شناخته شده است. در مقابل محاسن بی‌شمار، پدیده عریان‌شدگی به‌عنوان نقطه ضعفی برای این صنعت مطرح می‌گردد. یکی از روش‌هایی که در حال حاضر برای بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه و حفظ دوام رویه آسفالتی به‌کار می‌رود، استفاده از مواد افزودنی شیمیایی و اُرگانیک است. زایکوترم، تحت عنوان یک افزودنی نانوشیمیایی، نقشی دوجانبه تحت عنوان افزودنی ضدعریان‌شدگی[2] و افزودنی تولید آسفالت نیمه‌گرم ایفا می‌کند. برای درک بهتر پدیده‌ی عریان‌شدگی در اثر ضعف چسبندگی، مکانیزم‌های متعددی برای توضیح چسبندگی بین اجزای مخلوط آسفالتی استفاده شده است. از آنجایی که چسبندگی بین دو فاز متفاوت، به واکنش شیمیایی و مکانیکی، جاذبه‌های مولکولی و تئوری انرژی بین سطح آزاد آن دو فاز بستگی دارد، بنابراین، مکانیزم‌هایی که از بین رفتن چسبندگی در سیستم قیر و سنگدانه را کنترل می‌کنند، پیچیده هستند. هدف اصلی این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، بررسی تأثیر جنس مصالح بر خواص عملکردی آسفالت نیمه‌گرم اصلاح شده با افزودنی نانوشیمیایی زایکوترم به‌عنوان ماده‌ی اصلاح کننده‌ی قیر و ماده‌ی ضدعریان کننده، در قالب آزمایش‌های مربوط به حساسیت رطوبتی متناسب با استانداردهای روز و آیین‌نامه-های معتبر داخلی و بین‌المللی، اعم از آزمایش لاتمن اصلاح شده و آزمایش آب جوشان است. برای انجام این مهم، از آزمایش عملکردی تعیین مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم نیز استفاده شد. بررسی نتایج آزمایش‌ها و پردازش تصویر عکس‌های آزمایش آب جوشان، از طرفی حاکی از عملکرد نه چندان مناسب زایکوترم به‌عنوان افزودنی آسفالت نیمه‌گرم در هر دو مصالح آهکی و سیلیسی و از طرف دیگر، حاکی از افزایش چشمگیر مقاومت در برابر رطوبت در سنگدانه‌های سیلیسی است.

واژه‌های کلیدی: آسفالت نیمه‌گرم، مصالح سیلیسی، زایکوترم، حساسیت رطوبتی، پردازش تصویر

[1]- Warm Mix Asphalt (WMA)
[2]- Anti-stripping additive

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، مسائل زیست‌محیطی و همچنین کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، به یکی از مهمترین مسائل دنیای امروز تبدیل شده است. فرآیند تولید و تراکم آسفالت گرم به‌دلیل مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی و تولید آلودگی‌های مربوطه همواره به‌عنوان یک صنعت پُرهزینه و همچنین تولیدکننده‌ی گازهای گلخانه-ای در معرض انتقاد کارشناسان و منتقدان قرار گرفته است. جهت حل این معضل، راه‌های گوناگونی پیشنهاد شده است که در میان آن‌ها فناوری آسفالت نیمه‌گرم در بین خبرگان این حوزه، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه این فناوری محاسن بسیاری دارد ولی حساسیت و آسیب‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت یکی از مهمترین نگرانی‌هایی است که در این حوزه مطرح می‌شود. این پدیده تحت عنوان از بین رفتن پیوند بین قیر و مصالح سنگی ویا خرابی در ساختار قیر عنوان شده است (شیائو و همکاران، ۲۰۱۰). حساسیت در برابر رطوبت به تنهایی به‌عنوان یک مکانیزم خرابی مطرح نمی‌شود. ولی وقتی آب به درون لایه‌ی روسازی نفوذ می‌کند و پیوند بین ذرات قیر و مصالح از بین می‌رود، طی بارگذاری متمادی ذرات آسفالت دچار گسستگی شده و این موضوع تحت خرابی‌هایی نظیر چاله، شیارشدگی، ترک‌خوردگی و شن‌زدگی بروز پیدا می‌کند (خدایی و همکاران، ۲۰۱۲). در بررسی علل این پدیده می‌توان گفت که کاهش دمای اختلاط سبب می‌شود آب محبوس در مصالح به‌خوبی تبخیر نشود؛ ضمن اینکه کاهش دمای اختلاط قیر با مصالح سبب افزایش ویسکوزیته قیر شده و سبب می‌شود قیر به درستی سطح مصالح را اندود نکند. در نهایت، این دو عامل سبب بروز خرابی‌های ناشی از حساسیت رطوبتی می‌شوند.

جهت تولید آسفالت نیمه‌گرم، فناوری‌های مختلفی به‌کار گرفته می‌شود که در میان آن‌ها می‌توان به فناوری کف قیر، استفاده از افزودنی‌های اُرگانیک و یا استفاده از افزودنی‌های شیمیایی اشاره کرد (اندرسون و همکاران، ۲۰۰۸). هدف تمامی این روش‌ها، کاهش دمای اختلاط و تراکم از حدود ۱۵۵ درجه سلسیوس برای آسفالت گرم به بازه‌ای در حدود ۱۰۰ تا ۱۴۰ درجه سلسیوس برای آسفالت نیمه‌گرم است (هرلی و پرووِل، ۲۰۰۵). در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، از یک افزودنی شیمیایی نانو به‌نام زایکوترم جهت اصلاح قیر و تولید آسفالت نیمه‌گرم و همچنین به‌عنوان یک ماده‌ی ضدعریان‌شدگی استفاده شده است. نانوفناوری، صنعت تولید لوازم و مصالح در مقیاس نانو است و این اندرکنش مواد در سطح اتمی و مولکولی، تأثیر بسیار زیادی بر خواص ماکروسکوپیک اشیا دارد.

۲. اهداف تحقیق

هدف اصلی این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، بررسی تأثیر زایکوترم به‌عنوان ماده‌ی افزودنی اصلاح‌کننده‌ی قیر و ماده‌ی ضدعریان‌کننده بر خواص عملکردی آسفالت نیمه‌گرم تولید شده با مصالح سیلیسی و آهکی در قالب آزمایش‌های مربوط به حساسیت رطوبتی است. جهت انجام این مهم، از آزمایش‌های مربوط به حساسیت رطوبتی متناسب با استانداردهای روز و آیین‌نامه‌های معتبر داخلی و بین‌المللی، اعم از آزمایش لاتمن اصلاح شده و آزمایش آب جوشان، استفاده شده است. همچنین، فرض شد که تغییر در جنس مصالح می‌تواند روی خرابی ناشی از رطوبت تأثیر به‌سزایی داشته باشد و خرابی مخلوط آسفالتی به‌دلیل وجود رطوبت وابسته به تنش-های پیوند بین قیر و مصالح سنگی است.

۳. برنامه آزمایشگاهی

۳-۱. تهیه‌ی مخلوط‌های آسفالتی

خواص عملکردی مخلوط‌های نیمه‌گرم تحت آزمایش و بررسی قرار گرفته و با نمونه‌های شاهد که به روش گرم تولید شدند مقایسه گردیدند. مشخصات قیر، افزودنی، مصالح، دانه‌بندی آن‌ها و شیوه اختلاط و تراکم در ادامه آمده است.

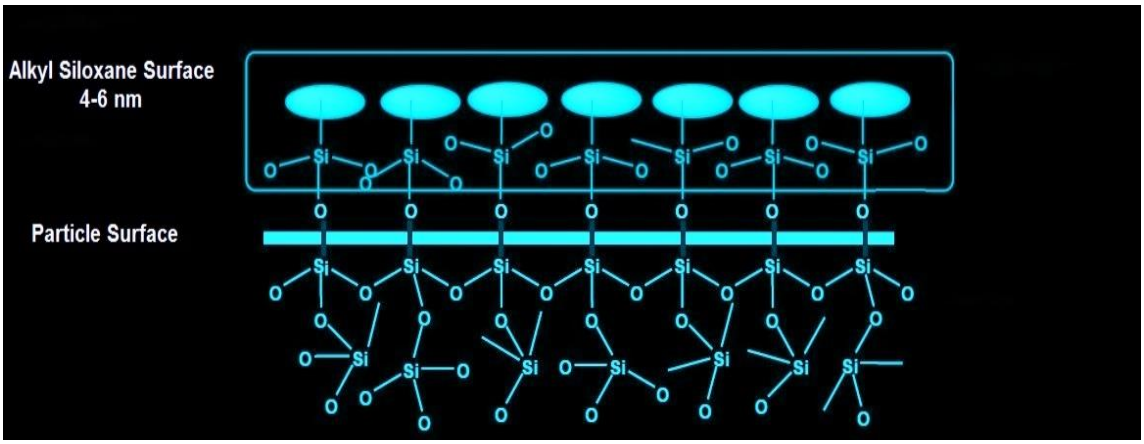
۳-۲. قیر و افزودنی

جهت تهیه مخلوط‌های گرم و نیمه‌گرم، از قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ و جهت اصلاح قیر و تهیه مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، از زایکوترم استفاده شد. زایکوترم یک افزودنی شیمیایی نانو و بدون بو است که جهت بهبود خواص عملکردی قیر و مخلوط‌های آسفالتی تولید شده است و

www.SID.ir

Archive of SID

سبب کاهش دمای تولید و تراکم و همچنین افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت می‌شود. برخلاف سایر افزودنی‌های شیمیایی که بر پایه آمین‌ها می‌باشند، زایکوترم یک فناوری بر پایه سیلان[1] است که از لحاظ کارایی مؤثرتر به‌نظر می‌رسد. پیوند سیلوکسانی (Si-O-Si) تشکیل شده روی سطح مصالح پس از واکنش گروه‌های سیلانول فعال با سطح مصالح سنگی در شکل ۱ نشان داده شده است. این پیوندها آب‌گریزند و به آسانی شسته نمی‌شوند. در حالت عادی، در مصالح آب‌دوست، پیوند برقرار شده بین قیر و مصالح، پیوند فیزیکی ضعیف و از نوع برهمکنش قطبی- قطبی می‌باشد که تنها ۵ تا ۱۵ درصد قیر در پیوند شرکت می‌کند و می‌توان پیوند برقرار شده را به پوست پرتقال تشبیه کرد که به آسانی قابلیت جداشدگی دارد. در حالی که با اصلاح سطح مصالح توسط افزودنی‌های بر پایه‌ی سیلان، می‌توان سطح آن‌ها را از حالت آب‌دوست به حالت قیردوست تبدیل کرد و ضمناً با از بین بردن لایه‌ی هوای موجود در سطح مصالح سنگی، پیوند مستحکم شیمیایی (همانند پوست سیب) و برهمکنش غیرقطبی-غیرقطبی بین قیر و مصالح ایجاد کرد که بیش از ۸۰٪ ذرات قیر در این واکنش شرکت دارند. این امر سبب کاهش پتانسیل عریان‌شدگی و تأثیر اکسیداسیون در محل تلاقی بین قیر و مصالح سنگی می‌گردد. مشخصات قیر مصرفی و زایکوترم به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده است.



شکل ۱. پیوند سیلوکسانی (Si-O-Si) به‌وجود آمده روی سطح مصالح سنگی

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های قیر

آزمایش‌های قیر	واحد	دمای آزمایش (°C)	استاندارد	نتایج	حدود مجاز
درجه نفوذ	۰/۱mm	۲۵	ASTM D5-73	۶۳	۶۰-۷۰
میزان کشش‌پذیری	cm	۲۵	ASTM D113-79	> ۱۰۰	>۱۰۰
وزن مخصوص	gr/cm^3	۲۵	ASTM D70-76	۱/۰۳	-
افت وزنی قیر در اثر حرارت	%	-	ASTM D1754-78	۰/۷۵	۰-۰/۸
حلالیت قیر	٪	-	ASTM D2042-76	۹۹	>۹۹
درجه اشتعال (Cleveland)	°C	-	ASTM D92-78	۳۱۰	>۲۳۲
نقطه نرمی	°C	-	ASTM D36-76	۴۹	۴۹-۵۶
ویسکوزیته کینماتیک	mm^2/s	۱۲۰	ASTM D2170-85	۸۱۰	-
شاخص درجه نفوذ (PI)	-	-	-	-۱/۱۲	-

[1] Silane-based

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. مشخصات زایکوترم

عنوان	مشخصات
وزن مخصوص در دمای ۲۵ °C	۰/۹۷ (gr/cm^3)
نوع ماده	مایع
رنگ	زرد کم رنگ
درجه اشتعال	بیش از ۸۰ °C
سایر	بدون بو

۳-۳. مشخصات دانه‌بندی و مصالح مصرفی

در آیین‌نامه ایران، برای دانه‌بندی مصالح مصرفی در تهیه مخلوط آسفالتی، مجموعاً ۷ رده معرفی شده و هر رده دانه‌بندی توسط یک حد بالا و یک حد پایین مشخص شده است. در این مطالعه، جهت تطبیق بیشتر مطالعات آزمایشگاهی با واقعیت، از حد وسط دانه‌بندی ۴ و همچنین مصالح آهکی و سیلیسی، به‌دلیل کاربرد بسیار وسیع آن‌ها در تهیه‌ی مخلوط‌های آسفالتی در لایه‌های بیندر و توپکا، و همچنین علاقه‌ی زیاد پیمانکاران به این دانه‌بندی و مصالح، استفاده شده است. مطالعات بسیاری، اتکای خرابی‌های آسفالت، از جمله عریان‌شدگی، را بر علم شیمی سنگدانه، کانی‌شناسی و مورفولوژی تصدیق می‌نمایند (کاندال و پارکر، ۱۹۹۸؛ دوکاتز، ۱۹۸۹). نوع سنگدانه بر انرژی سطح و واکنش‌های شیمیایی و در نتیجه مواضع و مقدار مکان‌های اتصال یون‌های فلزی یا اجزای باردار اثر می‌گذارد. سنگدانه‌ها از کانی‌های متعددی تشکیل شده‌اند و هر کدام دارای ترکیب شیمیایی مشخصی هستند. بیشتر سنگدانه‌ها هم مشخصات قلیایی و هم بازی دارند. پس درجه اسیدیته و یا قلیایی به‌صورت نسبت جزء اسیدی (SiO_2 , CO_2) به جزء قلیایی (عمدتاً CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, Na_2O, K_2O) بیان می‌گردد. به‌عنوان مثال، سنگدانه‌های سیلیسی دارای مقادیر زیاد کوارتز (SiO_4) می‌باشند و در هنگام حضور آب، به علت پیوند هیدروژنی، دارای چسبندگی ضعیفی هستند. سنگدانه‌های آهکی دارای مقادیر زیاد کلسیت ($CaCO_3$) و همچنین دولومیت ($CaMg(CO_3)_2$) می‌باشند که این نوع کانی‌ها معمولاً چسبندگی خوبی با قیر دارند و با آن پیوندهای قوی الکترواستاتیک برقرار می‌کنند. جدول دانه‌بندی، نمودار دانه‌بندی و همچنین مشخصات مصالح مصرفی به ترتیب در جدول ۳، شکل ۲ و جدول ۴ آمده است.

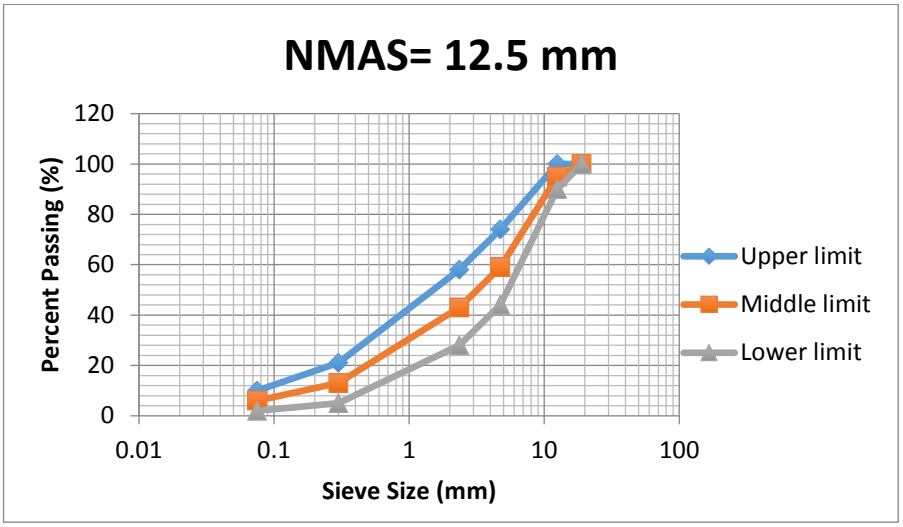
جدول ۳. دانه‌بندی مصالح مصرفی

درصد عبوری (حد وسط)	درصد عبوری (حد بالا)	درصد عبوری (حد پایین)	NMAS[1]= 12.5
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۹
۹۵	۱۰۰	۹۰	۱۲/۵
۵۹	۷۴	۴۴	۴/۷۵
۴۳	۵۸	۲۸	۲/۳۶
۱۳	۲۱	۵	۰/۳
۶	۱۰	۲	۰/۰۷۵

[1]- Nominal Maximum Aggregate Size

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی

جدول ۴. مشخصات مصالح مصرفی

آزمایش‌های مصالح سنگی	واحد	استاندارد	نتایج مصالح آهکی	نتایج مصالح سیلیسی
وزن مخصوص مصالح درشت دانه	gr/cm^3	ASTM C127	۲/۵۷	۲/۶۱
وزن مخصوص مصالح ریز دانه	gr/cm^3	ASTM C128	۲/۵۴	۲/۵۱
درصد سایش به روش لوس آنجلس	%	ASTM C131	۲۷/۲	۲۴
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم	%	ASTM C88	۲/۷	۲/۴
هم ارز ماسه	%	ASTM T176	۶۵	۷۲
درصد تورق	%	BS-812	۱۶/۶۳	۲۱/۳

۳-۴. آماده سازی قیر اصلاح شده

پیش از استفاده از افزودنی، بنا به توصیه شرکت تولیدکننده (زایدکس) جهت بررسی سلامت افزودنی، یک میلی‌لیتر زایکوترم با ۱۰ میلی‌لیتر آب آشامیدنی آمیخته شد و محلول حاصل شفاف و بدون تیرگی باقی ماند که نمایانگر سلامت افزودنی است. براساس توصیه تولیدکننده، و همچنین مطالعات پیشین (فخری و همکاران، ۱۳۹۳) مقدار ۰/۱ درصد وزن قیر از زایکوترم جهت اصلاح قیر برای تولید آسفالت نیمه‌گرم به‌کار گرفته شد. از آنجایی که وزن مخصوص زایکوترم ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب است، استفاده از یک میلی‌لیتر به‌جای یک گرم از آن قابل قبول به‌نظر می‌رسد. بر اساس پروتکل میکس شرکت سازنده، از یک هم‌زن برقی جهت اختلاط استفاده شد و سرعت آن به نحوی تنظیم گردید که در قیر با دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس، گردابی به عمق ۲ الی ۳ سانتی‌متر ایجاد کند. سپس، زایکوترم با یک سرنگ انسولین به آرامی با نرخ ۱۰ قطره بر دقیقه به قیر اضافه شد.

۳-۵. تعیین درصد قیر بهینه

در این مطالعه آزمایشگاهی، تعیین درصد قیر بهینه (OBC[1]) به کمک روش مارشال صورت گرفت. از آنجایی که جنس مصالح مصرفی متفاوت است، عملیات تعیین درصد قیر بهینه می‌بایست برای هر دو جنس مصالح صورت گیرد. طبق مطالعات پیشین انجام گرفته، زایکوترم

[1]- Optimum Bitumen Content

www.SID.ir

Archive of SID

تأثیر ناچیزی بر درصد قیر بهینه دارد. بنابراین، فرض شده که مخلوط‌های تولید شده به روش گرم و نیمه‌گرم، درصدهای قیر بهینه‌ی یکسانی دارند.

بنابراین، برای هر جنس مصالح، سه گروه مخلوط آسفالتی استوانه‌ای با درصدهای قیر ۴ تا ۶/۵ با افزایش پله‌ای ۰/۵ درصدی ساخته شد و پس از ساخت مجموعاً ۳۶ نمونه و شکست آن‌ها زیر جک مارشال، درصد قیر بهینه به کمک منحنی‌های مارشال برای مصالح آهکی ۴/۹ درصد و برای مصالح سیلیسی ۵/۴ درصد تعیین گردید.

۳-۶. ساخت نمونه‌های اصلی

جهت انجام آزمایش‌های مرتبط با استاندارد سوپر پیو[1]، از متراکم کننده‌ی ژیراتوری (SGC[2]) متناسب با همین استاندارد استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های آسفالتی گرم، ۱۲۰۰ گرم مصالح سنگی به ازای هر نمونه، به مدت ۲۴ ساعت در داخل گرمخانه با دمای ۱۶۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. قیر خالص اصلاح نشده نیز تا دمای ۱۴۷۶۲/۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. سپس، قیر مورد نظر با درصدهای بهینه‌ی مختلف به‌دست آمده از آزمایش‌های مارشال برای مصالح آهکی و سیلیسی، با مصالح سنگی مربوطه ترکیب شد و عملیات اختلاط به مدت ۵ دقیقه با دمای کنترل شده توسط دستگاه همزن، به‌خوبی انجام گرفت. مخلوط‌های حاصل جهت تراکم، داخل قالب ژیراتوری ریخته شدند. تعداد دوران ۱۰۰ دور متناسب با ترافیک سنگین و همچنین زاویه دوران ۱/۲۵ درجه متناسب با دستورالعمل سوپر پیو در نرم‌افزار دستگاه تنظیم شد و نمونه‌ها طبق تنظیمات وارد شده متراکم شدند. جهت تهیه‌ی نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم، پس از آماده‌سازی قیر اصلاح شده با زایکوترم در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و قرار دادن ۱۲۰۰ گرم مصالح سنگی به ازای هر نمونه در داخل آون (دقیقاً مشابه مخلوط‌های شاهد)، قیر اصلاح شده طبق پروتکل میکس آسفالت نیمه‌گرم به مصالح اضافه شد و پس از اختلاط، جهت تراکم داخل قالب ژیراتوری ریخته شد. کلیه عملیات تراکم و ورودی‌های نرم‌افزار دقیقاً مشابه مخلوط‌های آسفالتی گرم شاهد صورت پذیرفت تا اثر پارامترهای اضافه بر تحلیل نتایج از بین برود.

۴. آزمایش‌های عملکردی

۴-۱. آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم (IDT[3])

جهت بررسی تأثیر افزودنی مورد نظر و همچنین تأثیر جنس مصالح مصرفی بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی، این آزمایش به‌وسیله‌ی دستگاه UTM05 دانشگاه علم و صنعت ایران صورت گرفت. مدول برجهندگی یکی از اصلی‌ترین پارامترهای مخلوط‌های آسفالتی است و مستقیماً در طراحی‌ها به‌کار می‌رود. این مسأله به‌خوبی شناخته شده است که اکثر مخلوط‌های آسفالتی به‌صورت کاملاً الاستیک عمل نمی‌کنند؛ بلکه بعد از هر اعمال باری متحمل مقداری تغییرشکل دائمی نیز می‌شوند. براساس TDOT (۱۹۹۵) هرچند که اگر مقدار بار نسبت به مقاومت مصالح، کم باشد و ضمناً به تعداد بسیار زیاد اعمال شود، تغییرشکل زیر هر سیکل بارگذاری تقریباً تماماً برگشت‌پذیر بوده و متناسب با بار اعمالی می‌باشد و می‌تواند الاستیک در نظر گرفته شود. مدول الاستیسیته‌ی مخلوط‌های قیری که براساس استاندارد ASTM D4123 محاسبه می‌شود یک اندازه-گیری براساس تنش- کرنش است که به اندازه‌گیری خواص الاستیک این مخلوط‌ها می‌پردازد. در این آزمایش، مقدار تغییرمکان افقی به‌وسیله دو سنسور افقی که در مقابل هم در راستای افقی نمونه‌ها، در وسط آن‌ها نصب می‌شوند، اندازه‌گیری می‌شود. در طول این آزمایش، تعداد ۸ نمونه مخلوط آسفالتی گرم و نیمه‌گرم توسط یک بار دینامیک ۱۰۰۰ نیوتنی (به نحوی که تغییرمکان افقی در بازه ۱۵۰ الی ۳۵۰ میکرو استرین محدود باشد) به مدت بارگذاری ۰/۱ ثانیه و مدت استراحت ۰/۹ ثانیه با فرض ضریب پواسن ۰/۳۵ و تعداد ۲۵ سیکل پیش‌بارگذاری و سپس ۵ بارگذاری اصلی به شکل نیم‌سینوسی[4] به نمونه‌ها اعمال شده و مدول برجهندگی نمونه‌ها در دماهای ۵، ۲۵

[1]- Super pave
[2]- Super pave Gyratory Compactor
[3]- InDirect Tensile test
[4]- Haversine

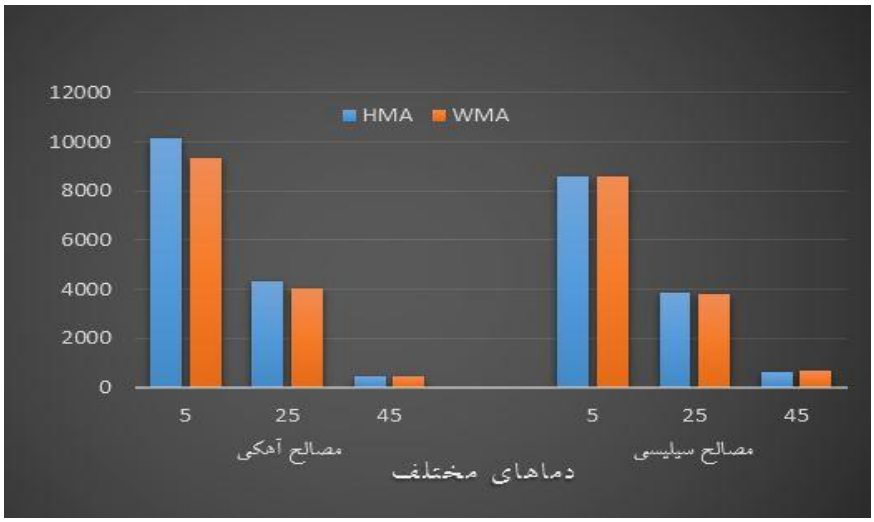
www.SID.ir

Archive of SID

و ۴۵ درجه سلسیوس به‌دست آمد که در شکل ۳ نشان داده شده است. اگر بار دینامیک وارد شده به نمونه را که سبب تغییرمکان افقی می‌شود P بنامیم، مقدار مدول برجهندگی نمونه‌ها که M_R نامیده می‌شود، از فرمول زیر به‌دست می‌آید:

$$M_R = \frac{P(\mu+0.27)}{t \times \delta h} \quad (۱)$$

که در آن، P بیشینه بار اعمالی به نمونه‌ها (نیوتن)، μ ضریب پواسن (با فرض ۰/۳۵)، t ضخامت نمونه‌ها (میلی-متر) و δ_h کلیه تغییرمکان‌های افقی برگشت‌پذیر است.



شکل ۳. نتایج آزمایش مدول برجهندگی در دماهای مختلف

۲-۴. آزمایش‌های مربوط به حساسیت رطوبتی

در این مطالعات آزمایشگاهی، جهت بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش‌های لاتمن اصلاح شده[1] و آب جوشان استفاده شده است. جهت تراکم نمونه‌ها در مقدار قیر بهینه، از متراکم‌کننده‌ی ژیراتوری متناظر با استاندارد سوپر پیو استفاده شد و تعداد دوران به نحوی تنظیم گشت که مقدار فضای خالی موجود در نمونه‌ها، طبق توصیه دستورالعمل سوپر پیو، در مقدار ۷۶۱ درصد قرار گیرد.

۱-۲-۴. آزمایش لاتمن اصلاح شده

یکی از معروف‌ترین و متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش لاتمن اصلاح شده (کشش غیرمستقیم) است. این آزمایش جهت تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های متراکم بعد از قرار دادن نمونه‌ها در معرض شرایط اشباع انجام می‌گیرد. نمونه‌ها به‌صورت استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۷۰۶۵ میلی‌متر به روش سوپر پیو متراکم شدند و تعداد دوران به نحوی تنظیم گردید که درصد فضای خالی مخلوط در بازه ۷۶۰/۵ قرار گیرد. برای هر جنس مصالح تعداد سه نمونه به‌صورت عمل‌آوری شده و سه نمونه به‌صورت عمل‌آوری نشده مطابق استاندارد آشتو تی۲۸۳ (AASHTO T283) تحت آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) بین دو نوار فلزی صلب در راستای قطری نمونه‌ها با نرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا نمونه‌ها گسیخته شوند و مقدار نیروی لازم برای گسیختگی نمونه‌ها ثبت شد. مقدار کشش غیرمستقیم (ITS) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times t \times d} \quad (۲)$$

که در آن، P بیشترین نیروی اعمالی جهت شکست نمونه‌ها (کیلونیوتن)، t ضخامت نمونه‌ها (میلی‌متر) و d قطر نمونه‌ها (میلی‌متر) بوده و مقدار TSR معمولاً به‌صورت درصد و به صورت میانگین مقدار ITS نمونه‌های اشباع شده به اشباع نشده به شکل زیر بیان می‌شود:

$$TSR = \frac{ITS\ conditioned}{ITS\ uconditioned} \times 100 \quad (۳)$$

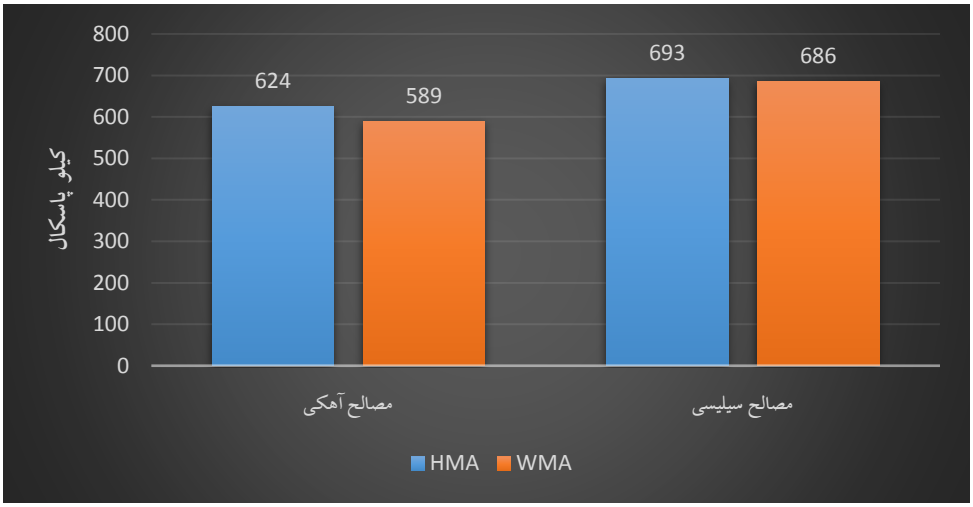
لاتمن (۱۹۷۸) اعلام کرد که مخلوط‌های آسفالتی با مقدار TSR بیشتر از ۷۰٪ عموماً کمتر مستعد آسیب‌های

[1]- Modified Lottman test

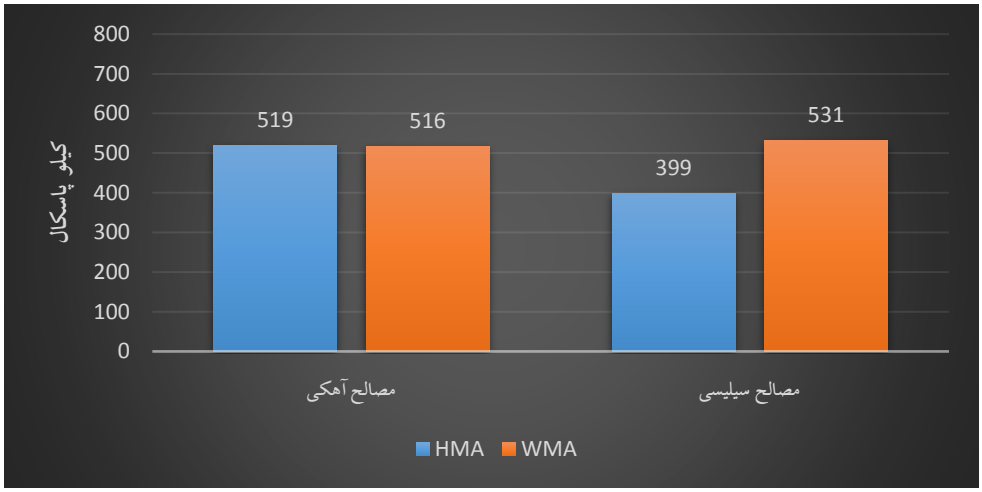
www.SID.ir

Archive of SID

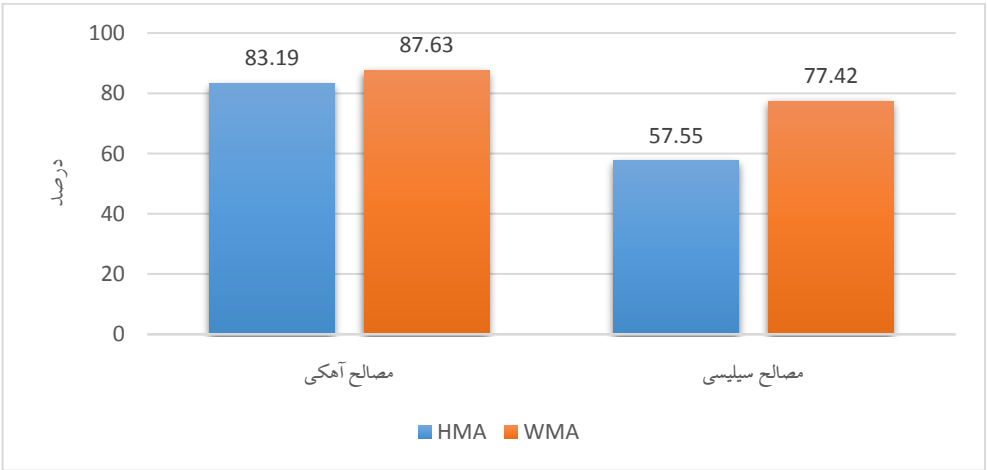
رطوبتی هستند. مقادیر ITS و TSR متناظر به‌دست آمده برای مصالح سیلیسی و آهکی در شکل‌های ۴ الی ۶ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۴. مقادیر ITS نمونه‌های عمل‌آوری نشده



شکل ۵. مقادیر ITS نمونه‌های عمل‌آوری شده



شکل ۶. مقادیر TSR

www.SID.ir

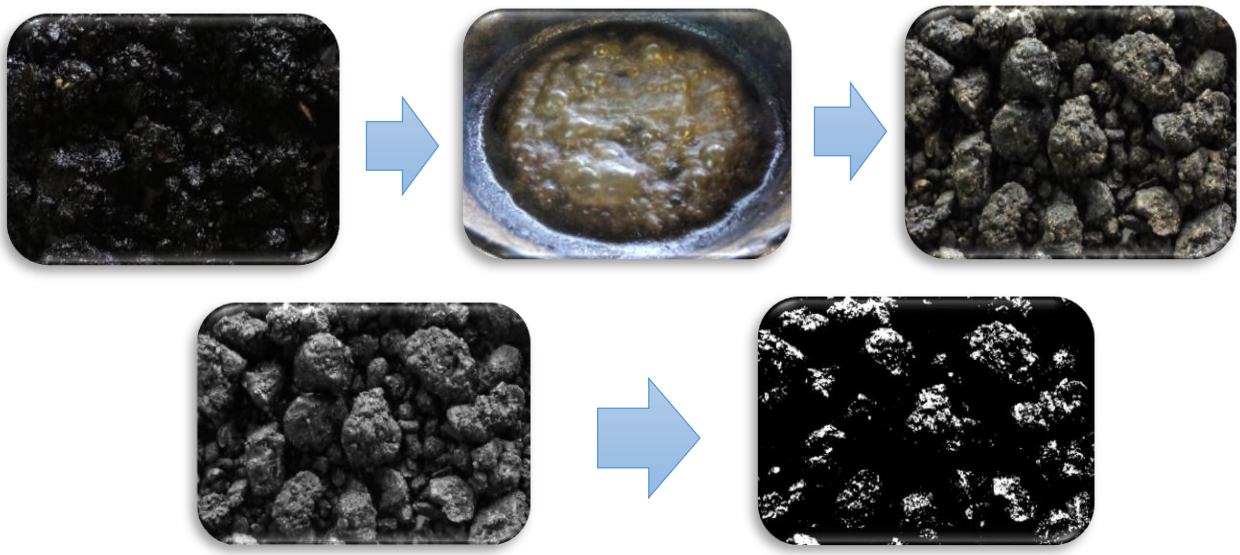
Archive of SID

۲-۲-۴. آزمایش آب جوشان

آزمایش آب جوشان، معروف به آزمایش تگزاس، مطابق با استاندارد ASTM D 3625 یکی از ساده‌ترین آزمایش‌هایی است که جهت ارزیابی ویژگی‌های مربوط به چسبندگی سنگدانه‌ها به قیر و همچنین پتانسیل عریان‌شدگی مصالح استفاده می‌شود. جهت انجام این تست، حدود ۲۵۰ گرم از مصالح داخل آب جوش به مدت ۱۰ دقیقه جوشانده می‌شود. مخلوط هر ۳ دقیقه یکبار هنگام جوشاندن به مدت ۱۰ ثانیه هم زده می‌شود. پس از خالی کردن آب، مخلوط جهت بررسی چشمی عریان‌شدگی، روی یک کاغذ سفید پخش شده و درصد کاهش قیر اندود شده توسط مصالح به سبب جوشیدن در آب، بررسی می‌شود. این کاهش اندودشدگی نمایانگر بروز آسیب‌های رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی است. جهت کمی‌سازی و افزایش دقت در بررسی عریان‌شدگی مصالح، از نمونه‌های مختلف قبل و بعد از انجام آزمایش، توسط یک دوربین دیجیتال عکس گرفته شد. سپس، عکس‌ها توسط نرم‌افزار متلب به عکس‌های دیجیتال با پیکسل-های سیاه تا سفید به‌صورت فازی تبدیل شد که روشن بودن هر قسمت از عکس نشان‌دهنده‌ی عریان‌شدگی بیشتر آن قسمت می‌باشد. پیکسل‌های سیاه متناظر با عدد صفر و پیکسل‌های سفید متناظر با عدد ۲۵۵ در نرم‌افزار ثبت می‌شوند و سایر پیکسل‌ها با توجه به درجه‌ی روشنایی در این بازه قرار می‌گیرند. عدد ۱۲۸ به‌عنوان مرز بین مصالح عریان شده و عریان نشده فرض شده و آنالیز عکس نمونه‌های مختلف توسط پردازش تصویر همین نرم‌افزار مورد بررسی دقیق قرار گرفت. روند انجام کار و همچنین نتایج حاصل از پردازش تصویر تمامی نمونه‌ها در شکل ۷ و جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. نتایج حاصل از پردازش تصویر

مصالح	درصد پیکسل‌ها قبل از جوشاندن		درصد پیکسل‌ها بعد از جوشاندن	
	سفید	سیاه	سفید	سیاه
آهکی (شاهد)	۱/۴۷	۹۸/۸۵	۹/۶۶	۹۰/۳۴
آهکی (نیمه‌گرم)	۱/۰۶	۹۸/۹۶	۱/۹۶	۹۸/۰۴
سیلیسی (شاهد)	۱/۳۳	۹۸/۶۷	۸/۴۹	۹۱/۵۱
سیلیسی (نیمه‌گرم)	۱/۱۱	۹۸/۸۲	۲/۱۲	۹۷/۸۸



شکل ۷. روند انجام آزمایش آب جوشان و پردازش تصویر

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵ نشان می‌دهد که آزمایش آب جوشان قابلیت ارزیابی تأثیر جنس مصالح را روی بررسی عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم و نیمه‌گرم دارا می‌باشد. مکانیزم عریان‌شدگی به‌وقوع پیوسته، به‌دلیل عدم چسبندگی مناسب بین قیر و مصالح، با روند به‌دست آمده از آزمایش TSR همخوانی دارد.

۵. تحلیل نتایج

۵-۱. تحلیل نتایج مربوط به آزمایش مدول برجهندگی

با آنالیز نتایج به‌دست آمده، در بررسی تأثیر زایکوترم بر مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی در دماهای مختلف، می‌توان اظهار داشت که در تمامی دماها، مدول برجهندگی نمونه‌های شاهد تولید شده به روش گرم (HMA)، مقادیر بیشتری نسبت به نمونه‌های تولید شده به روش نیمه‌گرم (WMA) دارند. این سیر نزولی، هم در مصالح آهکی و هم در مصالح سیلیسی به چشم می‌خورد. این بدان معناست که پارامترهای جنس مصالح مصرفی و همچنین دمای آزمایش، که هر دو متغیرهای این آزمایش بوده‌اند، تأثیری در روند مذکور ندارند.

آنچه جای بحث دارد علت وقوع این امر است که می‌تواند ناشی از عدم عملکرد مناسب زایکوترم به‌عنوان یک ماده‌ی تولید کننده‌ی آسفالت نیمه‌گرم[1] باشد. در تکمیل آنچه ذکر شد، می‌توان گفت که با توجه به پروتکل میکس ارائه شده توسط شرکت سازنده (زایدکس)، دمای اصلاح قیر، که ۱۲۰ درجه سلسیوس پیشنهاد گردیده، دمای مناسبی به‌نظر نمی‌رسد و دمای بالاتری می‌بایست جایگزین گردد که این امر می‌تواند ناقض مفهوم آسفالت نیمه‌گرم نیز باشد. البته بدیهی ست اظهار نظر دقیق‌تر مستلزم انجام آزمایش‌ها بیشتری بوده و نویسندگان پیشنهاد می‌کنند جهت نتیجه‌گیری نهایی، آزمایش‌های در مقیاس وسیع تری صورت پذیرد.

۵-۲. تحلیل نتایج مربوط به آزمایش لاتمن اصلاح شده

اگر نمونه‌های عمل‌آوری نشده مورد بررسی قرار داده شوند، در هر دو مصالح آهکی و سیلیسی، تفاوت فاحشی بین ITS نمونه‌های گرم و نیمه‌گرم دیده نمی‌شود؛ هرچند که این اختلاف در مصالح آهکی بیشتر است و مقدار ITS نمونه‌های شاهد بیشتر از نمونه‌های نیمه‌گرم است. اما پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، شاهد تغییرات چشمگیر و کاهش قابل توجه مقاومت مصالح سیلیسی هستیم. مقدار ITS مخلوط شاهد سیلیسی از ۶۹۳ کیلوپاسکال با ۴۲٪ کاهش، به تقریباً نصف، یعنی ۳۹۹ کیلوپاسکال، می‌رسد. در حالی که مخلوط حاوی افزودنی، کاهش چشمگیری در مقاومت تجربه نکرده و مقدار آن از ۶۸۶ کیلوپاسکال به ۵۳۱ کیلوپاسکال رسیده است. بر خلاف روند نزولی مشاهده شده در آزمایش مدول برجهندگی و همچنین ITS نمونه‌های عمل‌آوری نشده، می‌توان اظهار داشت که افزودنی زایکوترم تأثیر مثبتی بر مقاومت مصالح سیلیسی در چرخه‌ی اشباع دارد و از کاهش چشمگیر مقاومت مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم جلوگیری کرده است. اگرچه این تأثیر مثبت در مصالح آهکی هم دیده می‌شود، ولی این تغییرات شایان ذکر نیست. درصد کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم مصالح آهکی و سیلیسی، قبل و بعد از چرخه‌ی عمل‌آوری طبق استاندارد AASHTO T283، به‌صورت خلاصه در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. درصد کاهش ITS پس از عمل‌آوری

مصالح مصرفی	روش تولید نمونه	درصد کاهش مقاومت پس از عمل‌آوری
آهکی	گرم (شاهد)	۱۶/۸
	نیمه‌گرم	۱۲/۴
سیلیسی	گرم (شاهد)	**۴۲/۴**
	نیمه‌گرم	۲۲/۶

[1]- Warm-mix agent

www.SID.ir

Archive of SID

در بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، باید اذعان کرد که هم مخلوط‌های آسفالتی گرم و هم نیمه‌گرم تولید شده با مصالح آهکی، با داشتن TSR بیش از ۸۰٪، وضعیت بسیار مطلوبی دارند. مخلوط‌های آسفالتی گرم تولید شده با مصالح سیلیسی، وضعیت بسیار نامساعدی در برابر رطوبت از خود نشان می‌دهند. ولی در حالت نیمه‌گرم، افزودنی مورد استفاده تأثیر بسیار چشمگیری روی این مصالح دارد و آن را در بازه‌ی قابل قبول قرار می‌دهد. همانگونه که از نمودار پیداست، زایکوترم تأثیر بسیار بیشتری روی مصالح سیلیسی نسبت به مصالح آهکی دارد و درصد این تأثیر در جدول ۷ ارائه شده است. در بررسی این پدیده می‌توان گفت که سنگ-های سیلیسی دارای کانی‌های کوارتز SiO_4 بوده و در هنگام حضور آب، به علت پیوند هیدروژنی، دارای چسبندگی ضعیفی هستند. سنگ‌های آهکی دارای کانی-های کلسیت و همچنین دولومیت بوده و معمولاً دارای چسبندگی خوبی هستند و با قیر پیوندهای قوی الکترواستاتیک برقرار می‌کنند؛ ولی شکننده می‌باشند. مفاهیم درجه چسبندگی شیمیایی براساس درجه اسیدیته بیان می‌شود و اعلام می‌دارد که چسبندگی بین یک ماده اسیدی و قلیایی بیشتر از چسبندگی بین دو ماده قلیایی یا اسیدی است. بر این اساس، هرچه اختلاف اسیدیته دو ماده بیشتر باشد، آن دو ماده چسبندگی مقاوم‌تری باهم خواهند داشت. قیر حتی اگر خنثی باشد، یا گروه‌های بازی یا اسیدی داشته باشد، در بیشتر مطالعات به صورت یک ماده اسیدی در نظر گرفته می‌شود زیرا در قیر غلظت یون هیدرونیوم بالا بوده و دارای درجه اسیدیته کمتر از ۷ می‌باشد. بنابراین، فرض می‌شود که سنگدانه‌های قلیایی بایستی چسبندگی بهتری با قیر نسبت به چسبندگی‌ای که قیر با سنگدانه‌های اسیدی برقرار می‌کند، داشته باشند. با فرض اینکه درجه اسیدیته آب برابر ۷ باشد و قیر درجه اسیدیته کمتر از ۷ داشته باشد، سنگدانه‌های اسیدی، آبدوست در نظر گرفته می‌شوند و آب می‌تواند قیر را از روی سطح آن‌ها پاک کند. بیشتر سنگدانه‌ها هم مشخصات قلیایی و هم بازی دارند. پس درجه اسیدیته و یا قلیایی به‌صورت نسبت جزء اسیدی (SiO_2 , CO_2) به جزء قلیایی (عمدتاً CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, Na_2O, K_2O) بیان می‌گردد. سنگدانه‌های سیلیسی داری درصد زیاد سیلیکا (SiO_2) می‌باشند و حال آن که سنگدانه‌های آهکی دارای درصد زیاد کلسیم کربنات ($CaCO_3$) می‌باشند. بنابراین، سطوح این سنگدانه‌ها دارای ترکیبات شیمیایی متفاوت بوده و پیوندهای متفاوتی با اجزای قیر برقرار می‌کنند که در برابر رطوبت مقاومت متفاوتی دارند.

زایکوترم یک افزودنی بر پایه سیلان می‌باشد. سیلان، گروهی از سیلیکون‌های هیدروژن‌دار (هیدرید سیلیکون) است که دارای یک زنجیره آلی با تمایل به قیر و یک انتهای قطبی با تمایل به سطح غیر آلی (معدنی) است (دیویتو و موریس، ۱۹۸۲). سیلان‌هایی که عملکرد آلی دارند در خلال فرآیند هیدرولیز و در حضور آب، سیلانول تولید می‌کنند که این ماده سریعاً متراکم گشته و به فرم سیلوکسان حاوی اجزای آبگریز درمی‌آید و به‌صورت محلول در قیر باقی می‌ماند. در حالی که قسمت غیرآلی با هیدروکسیل سطح سیلیسی سنگدانه‌ها پیوند هیدروژنی برقرار می‌کند. در اثر گرم شدن، این پیوندهای هیدروژنی درهم فشرده شده و یا می‌شکنند و تولید لایه-ای از پیوند Si-O-Si روی سطح سنگدانه می‌کنند که پیشتر در شکل ۱ نشان داده شده است.

دیگر اجزای قلیایی سنگدانه‌ها مانند سدیم و پتاسیم، چنانچه با کربوکسیلیک اسیدهای قیر تشکیل نمک‌های محلول در قیر را بدهند، حساسیت رطوبتی مخلوط را افزایش می‌دهند (هفر و همکاران، ۲۰۰۵؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۰۵). آب ترجیحاً روی سنگدانه‌های حاوی هیدروکسیل‌های سطحی (SiOH) جذب می‌شود و از طریق پیوند هیدروژنی تشکیل زنجیره‌ی --$(SiOH)_n$-- $(H_2O)_n$-- می‌دهد (کندال، ۱۹۹۲).

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۷. تأثیر زایکوترم بر حساسیت رطوبتی

مصالح مصرفی	روش تولید نمونه	TSR (٪)	درصد افزایش TSR به‌دلیل زایکوترم
آهکی	گرم (شاهد)	۸۳/۱۹	۵/۰۷
	نیمه‌گرم	۸۷/۶۳	
سیلیسی	گرم (شاهد)	۵۷/۵۵	۲۵/۶۷
	نیمه‌گرم	۷۷/۴۲	

برای درک بهتر پدیده‌ی عریان‌شدگی در اثر ضعف چسبندگی، مکانیزم‌های متعددی برای توضیح چسبندگی بین اجزای مخلوط آسفالتی استفاده شده است. از آنجایی که چسبندگی بین دو فاز متفاوت، به واکنش شیمیایی و مکانیکی، جاذبه‌های مولکولی و تئوری انرژی بین سطح آزاد آن دو فاز بستگی دارد، بنابراین مکانیزم‌هایی که از بین رفتن چسبندگی در سیستم قیر و سنگدانه را کنترل می‌کنند همچنان پیچیده هستند (زانیفسکی و ویسواناتان، ۲۰۰۶).

۳-۵. تحلیل نتایج مربوط به آزمایش آب جوشان

عکس‌های دیجیتال گرفته شده از نمونه‌ها نشان می‌دهد که در حالت کلی، افزودنی زایکوترم سبب کاهش قسمت-های عمده‌ای از پیکسل‌های سفیدرنگ می‌شود. این بدین معناست که زایکوترم به‌عنوان یک افزودنی ضدعریان‌شدگی در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی موفق عمل کرده است و تحلیل نتایج حاصل از پردازش تصویر نیز گویای همین امر است. نتایج حاصل از پردازش تصویر، در راستای سایر آزمایش‌های همین تحقیق و همچنین یافته‌های محققین پیشین (سنگ‌سفیدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ حسامی و همکاران، ۲۰۱۲) بوده و نتایج آنان را تأیید می‌کند.

۶. نتیجه‌گیری

- تحلیل نتایج حاصل از آزمایش مدول برجهندگی نشان می‌دهد که جنس مصالح و دمای آزمایش تأثیر چشمگیری روی روند نتایج آزمایش مذکور ندارند. بررسی نتایج، حاکی از عملکرد نه چندان مطلوب زایکوترم به‌عنوان یک افزودنی نیمه‌گرم روی مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌هاست. چرا که در تمامی دماها، برای هر دو نوع مصالح آهکی و سیلیسی، مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌های نیمه‌گرم از مقادیر مشابه نمونه‌های شاهد کمتر است. نتیجه گیری قطعی در این مورد، به تحقیقات آتی واگذار می‌شود.

- نمونه‌های آسفالتی گرم تهیه شده با مصالح سیلیسی، هنگامی که در معرض شرایط اشباع قرار می‌گیرند، نسبت به نمونه‌های مشابه تولید شده با مصالح آهکی با شرایط یکسان، آسیب‌پذیرتر به‌نظر می‌رسند و مقاومت کششی غیرمستقیم مصالح سیلیسی نسبت به مصالح آهکی کاهش قابل توجه دارند. در حالی که تفاوت فاحشی بین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی تولید شده با مصالح آهکی و سیلیسی در حالت غیراشباع وجود ندارد.

- زایکوترم تأثیر مثبتی بر مقاومت مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم تهیه شده با مصالح سیلیسی در چرخه اشباع دارد و از کاهش چشمگیر مقاومت آن‌ها جلوگیری می‌کند.

- نمونه‌های آسفالتی شاهد و نیمه‌گرم تولید شده با مصالح آهکی، با دارا بودن مقادیر TSR بیش از ۸۰٪، مقاومت بسیار مطلوبی در برابر خرابی‌های ناشی از رطوبت دارند و استفاده از افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی برای آن-ها توصیه نمی‌شود.

- نمونه‌های آسفالتی گرم تولید شده با مصالح سیلیسی، به‌دلیل وجود پیوندهای ضعیف هیدروژنی با فیر و همچنین درجه اسیدیته نامناسب، وضعیت بسیار نامساعدی در برابر خرابی‌های ناشی از رطوبت از خود نشان می‌دهند. در حالی که نمونه‌های مشابه تولید شده به روش نیمه‌گرم با افزودنی زایکوترم، وضعیت قابل قبولی

www.SID.ir

Archive of SID

دارند که این امر می‌تواند ناشی از اصلاح پیوندهای شیمیایی برقرار شده بین قیر و مصالح سیلیسی به‌دلیل حضور زایکوترم به‌عنوان یک ماده شیمیایی نانو بر پایه سیلان باشد. این موضوع، با تحلیل نتایج حاصل از پردازش تصویر نمونه‌های آزمایش آب جوشان نیز مطابقت دارد.

۷. تشکر و قدردانی

بدین وسیله مراتب تشکر خود را از جناب آقای مهندس سید علی طباطبائیان و همچنین پرسنل محترم و زحمتکش مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران به دلیل همکاری و حمایت همه جانبه اعلام می‌داریم.

ناب آقای مهندس سید علی طباطبائیان و همچنین پرسنل محترم و زحمتکش مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران به دلیل همکاری و حمایت همه جانبه اعلام می‌داریم.

۸. مراجع

فخری، م.، ونائی، و. و راهی، م. ۱۳۹۳. "ارزیابی رئولوژیکی تأثیر نانومصالح مایع بر خواص و عملکرد قیر". هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه بابل، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت.

Anderson, R. M., Baumgardner, G., May, R. and Reinke, G. 2008. “Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technologies”. Interim Report, pp. 9-47.

DiVito, J. A. and Morris, G. R. 1982. “Silane pretreatment of mineral aggregate to prevent stripping in flexible pavements”. Transport. Res. Record, Transport. Res. Board, 843: 104-111.

Dukatz, E. L. (1989). “Aggregate properties related to pavement performance”. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 58: 492-502.

Hefer, A. W., Little, D. N. and Lytton, R. L. 2005. “A synthesis of theories and mechanisms of bitumen-aggregate adhesion including recent advances in quantifying the effects of water (with discussion)”. J. Assoc. Asphalt Paving Technol., 74: 139-196.

Hesami, S., Ameri, M., Goli, H. and Akbari, A. 2014. “Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates”. Int. J. Pavement Eng., 10: 745-749.

Huang ,S. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F. and Claine Petersen, J. 2005. “Impact of lime modification of asphalt and freeze–thaw cycling on the asphalt–aggregate interaction and moisture resistance to moisture damagev”. J. Mater. Civ. Eng., 17(6): 711-718.

Hurley, G. C. and Prowell, B. D. 2005. “Evaluation of sasobit for use in warm mix asphalt”. NCAT Report, 05-06.

Kandhal, P. S. 1992. “Moisture susceptibility of HMA mixes: Identification of problem and recommended solutions”. National Center for Asphalt Technology, Auburn, AL.

Kandhal, P. S. and Parker Jr, F. 1998. “Aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements”. NCHRP Report 405, Transportation Research Board.

Khodaii, A., Haghshenas, H. F. and Kazemi Tehrani, H. 2012. “Effect of grading and lime content on HMA stripping using statistical methodology”. Constr. Build. Mater., 34: 131-135.

Sangsefidi, E., Ziari, H. and Mansourkhaki, A. 2014. “The effect of aggregate gradation on creep and moisture susceptibility performance of warm mix asphalt”. Int. J. Pavement Eng., 15(2): 133-141 .

Xiao, F., Zhao, W., Gandhi, T. and Amirkhanian Serji, N. 2010. “Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures”. J. Mater. Civ. Eng., 22(10): 1047-1055 .

Zaniewski, J. and Viswanathan, A. G. 2006. “Investigation of moisture sensitivity of hot mix asphalt concrete”. Asphalt Technology Program.

www.SID.ir

www.SID.ir