



تأثیر زایکوترم بر مقاومت آسفالت‌های گرم و نیمه‌گرم

کریم شکوهیان*

امین غفوری

مصطفی عبدالله‌زاده

کارشناس عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

کارشناسی ارشد عمران ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

کارشناسی ارشد اقتصاد و برنامه‌ریزی و کارشناسی ارشد ادبیات و زبان

انگلیسی، دانشگاه شیراز

چکیده

با رویکردی بهینه و نگاهی اقتصادمحور، آسفالت نیمه‌گرم فرآیندی مؤثر در کاهش هزینه‌های تولید آسفالت است؛ همچنین استفاده از این نوع آسفالت اثرات مخرب زیست‌محیطی و مصرف سوخت را کاهش می‌دهد. از بعدی دیگر آسیب‌های رطوبتی معضلی عمده در آسفالت‌های خیابانی به شمار می‌رود. رطوبت باعث کاهش چسبندگی بین مصالح دانه‌بندی شده و آسفالت لایه آستر می‌شود که در نهایت قدرت ساختاری آسفالت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. موضوع این مطالعه بررسی اثرات زایکوترم بر حساسیت رطوبتی و مصالح به کاررفته در آسفالت نیمه‌گرم است. این بررسی شامل مطالعات آزمایشگاهی در چهار قالب ذیل است؛ آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم (IDT)، آزمایش حساسیت رطوبتی، آزمایش لاتمن اصلاح شده و آزمایش آب جوشان تگزاس. زایکوترم به‌عنوان افزودنی نانوشیمیایی دارای نقش محوری ضد عریان‌شدگی است و یکی از افزودنی‌های تولید آسفالت نیمه‌گرم است. برای درک بهتر پدیده عریان‌شدگی در اثر ضعف چسبندگی، مکانیسم‌های متعددی برای توضیح چسبندگی بین اجزای مخلوط آسفالتی استفاده شده است. اثر ترکیب این افزودنی‌ها به آستر آسفالت نه تنها دمای اختلاط را کاهش می‌دهد، بلکه مقاومت آن را در مقابل آسیب‌های رطوبتی می‌افزاید. در نهایت بررسی نتایج آزمایش‌ها و پردازش تصویر عکس‌های آزمایش آب جوشان از طرفی نشان‌دهنده عملکرد زایکوترم به‌عنوان افزودنی‌ای در تولید آسفالت نیمه‌گرم در هر دو نوع مصالح آهکی و سیلیسی است و از طرف دیگر حاکی از افزایش چشمگیر مقاومت در برابر رطوبت در سنگ‌دانه‌های سیلیسی است. **واژه‌های کلیدی:** مصالح سیلیسی زایکوترم، آزمون IDT مدول بر جهندگی، آزمایش لاتمن، آزمایش آب جوشان تگزاس، آزمایش مارشال.

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی و مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی و تولید آلودگی‌های مربوطه، آسفالت گرم همواره به‌عنوان صنعتی پرهزینه و همچنین تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای در معرض انتقاد کارشناسان و منتقدین قرار گرفته است. برای حل این معضل، راه‌های گوناگونی پیشنهاد شده است که در میان آن‌ها تکنولوژی آسفالت نیمه‌گرم در بین خبرگان این حوزه جایگاه ویژه‌ای دارد. این تکنولوژی 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 یا خرابی در ساختار قیر عنوان شده است (شیائو و همکاران، ۲۰۱۰). حساسیت در برابر رطوبت به‌تنهایی به‌عنوان مکانیسم خرابی مطرح نمی‌شود؛ ولی وقتی آب به درون لایهٔ روسازی نفوذ می‌کند و پیوند بین ذرات قیر و مصالح از بین می‌رود، طی بارگذاری‌های متمادی، ذرات آسفالت دچار گسستگی می‌شود. این موضوع تحت خرابی‌هایی نظیر چاله، شیارشدگی، ترک خوردگی و شن‌زدگی بروز پیدا می‌کند (خدایی و همکاران، ۲۰۱۲). در بررسی علل این پدیده می‌توان گفت 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 به‌درستی سطح مصالح را اندود نکند. درنهایت، این دو عامل سبب بروز خرابی‌های ناشی از حساسیت رطوبتی می‌شوند. تکنولوژی‌های مختلفی برای تولید آسفالت نیمه‌گرم به کار گرفته می‌شود که در میان آن‌ها می‌توان به تکنولوژی کف قیر، استفاده از افزودنی‌های ارگانیک و 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 پروول، ۲۰۰۵). در این مطالعه آزمایشگاهی، از نوعی افزودنی شیمیایی نانو به نام زایکوترم برای اصلاح قیر و تولید آسفالت نیمه‌گرم و همچنین به‌عنوان مادهٔ ضد عریان‌شدگی استفاده شده است. نانوتکنولوژی صنعت تولید لوازم و مصالح در مقیاس نانو است. این اندرکنش مواد در سطح اتمی و مولکولی، تأثیر بسیار زیادی بر خواص ماکروسکوپیک اشیا دارد. هدف اصلی این مطالعهٔ آزمایشگاهی، بررسی تأثیر زایکوترم به‌عنوان مادهٔ افزودنی اصلاح‌کنندهٔ قیر و ضد عریان‌کننده، روی خواص عملکردی آسفالت نیمه‌گرم تولیدشده با مصالح سیلیسی و آهکی، در قالب آزمایش‌های مربوط به حساسیت رطوبتی است. برای انجام آن از آزمایش‌های مربوط به حساسیت رطوبتی، متناسب با استانداردهای روز و آیین‌نامه‌های معتبر داخلی و بین‌المللی، اعم از آزمایش لاتمن اصلاح‌شده و آزمایش آب جوشان، استفاده شده است؛ همچنین فرض شده که تغییر در جنس مصالح می‌تواند روی خرابی ناشی

از رطوبت تأثیر بسزایی داشته باشد و خرابی مخلوط آسفالتی به دلیل وجود رطوبت وابسته به تنش‌های پیوند بین قیر و مصالح سنگی است.

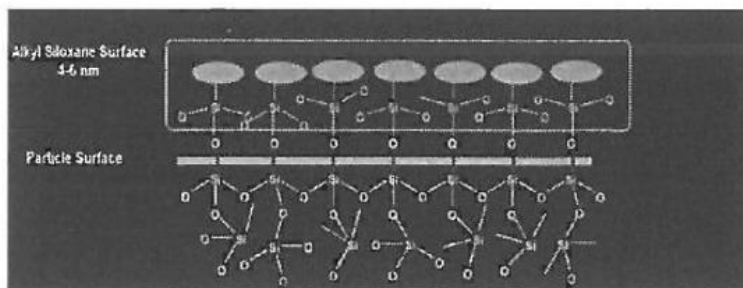
۲- مواد و فرآیندها

۲-۱- تهیه مخلوط‌های آسفالتی

خواص عملکردی مخلوط‌های نیمه‌گرم آزمایش و بررسی شده و با نمونه‌های شاهد که به روش گرم تولید شدند مقایسه شده‌اند.

۲-۲- قیر و افزودنی برای تهیه مخلوط‌های گرم و نیمه‌گرم

از قیری با درجه نفوذ $60/70$ استفاده شده است. برای اصلاح قیر و تهیه مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، از زایکوترم استفاده شد. زایکوترم نوعی افزودنی شیمیایی نانو و بدون بو است که برای بهبود خواص عملکردی قیر و مخلوط‌های آسفالتی تولید شده است و سبب کاهش دمای تولید و تراکم و همچنین افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت می‌شود. برخلاف سایر افزودنی‌های شیمیایی که بر پایه آمین‌ها هستند، زایکوترم تکنولوژی‌ای بر پایه سیلان است که از لحاظ کارایی مؤثرتر به نظر 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 است که تنها ۵ تا ۱۵ درصد قیر در پیوند شرکت می‌کند. می‌توان پیوند برقرار شده را به پوست پرتقال تشبیه کرد که به آسانی قابلیت جداسازی دارد. در حالی که با اصلاح سطح مصالح به وسیله افزودنی‌های بر پایه سیلان، می‌توان سطح آن‌ها را از حالت آب‌دوست به حالت قیردوست تبدیل کرد. ضمناً با از بین بردن لایه 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 درصد ذرات قیر در این واکنش شرکت دارند که سبب کاهش پتانسیل عریان‌شدگی و تأثیر اکسیداسیون در محل تلاقی بین قیر و مصالح سنگی می‌شود. مشخصات قیر مصرفی و زایکوترم به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده است.



شکل ۱- پیوند سیلیکاتی (si-o-si) به وجود آمده روی سطح مصالح سنگی

جدول ۱: نتایج آزمایش‌های قیر

حدود مجاز	نتایج	استاندارد	دمای آزمایش (°C)	واحد	آزمایش‌های قیر
۶۰-۷۰	۶۳	ASTM D5-73	۲۵	(0/1)mm	درجه نفوذ
>۱۰۰	>۱۰۰	ASTMD113-79	۲۵	Cm	میزان کشش‌پذیری
-	۱/۰۳	ASTMD70-76	۲۵	g/cm ³	وزن مخصوص
-۰/۸	/۷۵	ASTMD1754-78	-	%	افت وزنی قیر در اثر حرارت
>۹۹	۹۹	ASTMD2042-76	-	%	حلالیت قیر
>۲۳۲	۳۱۰	ASTMD92-78	-	°C	درجه اشتعال (Cleveland)
۴۹-۵۶	۴۹	ASTMD36-76	-	°C	نقطه نرمی
-	۸۱۰	ASTMD2170-85	۱۲۰	Mm ² /s	ویکوزیته کینماتیک
-	-۰/۹۱۵	-	-	-	شاخص درجه نفوذ (PI)

جدول ۲: مشخصات زیاکوترم

مشخصات	عنوان
۰/۹۷ g/cm ³	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
مایع	نوع ماده
زرد کم‌رنگ	رنگ
بیش از ۸۰ °C	درجه اشتعال
بدون بو	سایر

۳-۲- مشخصات دانه‌بندی و مصالح مصرفی

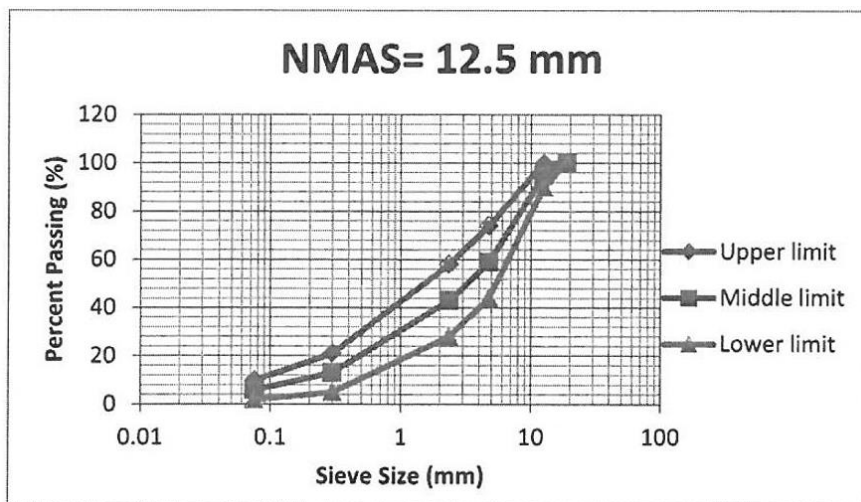
در آیین‌نامهٔ روسازی آسفالتی راه‌های ایران^۱، برای دانه‌بندی مصالح مصرفی در تهیهٔ مخلوط آسفالتی مجموعهٔ هفت رده معرفی شده است. هر رده دانه‌بندی با یک حد بالا و یک حد پایین مشخص شده است. برای تطبیق بیشتر مطالعات آزمایشگاهی با واقعیت در این مطالعه، از حد وسط دانه‌بندی چهار و همچنین مصالح آهکی و سیلیسی به دلیل کاربرد بسیار وسیع آن‌ها در تهیهٔ مخلوط‌های آسفالتی در لایه‌های بیندر و توپکا و همچنین علاقهٔ 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 می‌کنند (کندل و پارکر، ۱۹۹۸؛ دوکاتس، 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 یا قلیایی به صورت نسبت جزء اسیدی ($Fe_2O_3, MgO, Na_2O, K_2O, CaO, Al_2O_3$) بیان می‌شود؛ به‌عنوان مثال، سنگ‌دانه‌های سیلیسی دارای مقادیر زیاد کوارتز (SiO_4) هستند و در هنگام حضور آب، به علت پیوند هیدروژنی، چسبندگی ضعیفی دارند. سنگ‌دانه‌های آهکی مقادیر زیاد کلسیت ($CaCO_3$) و همچنین دولومیت ($CaMg(CO_3)_2$) دارند که این کانی‌ها معمولاً چسبندگی خوبی با قیر دارند و با آن پیوندهای قوی الکترواستاتیک برقرار می‌کنند. مشخصات دانه‌بندی، نمودار دانه‌بندی و همچنین مشخصات مصالح مصرفی به ترتیب در جدول ۳، شکل ۲ و جدول ۴ ارائه شده است.

۴-۲- آماده‌سازی قیر اصلاح‌شده

پیش از استفاده از افزودنی، بنا به توصیهٔ شرکت تولیدکننده (زایدکس)، برای بررسی سلامت افزودنی، یک میلی‌لیتر زایکوترم با ده میلی‌لیتر آب آشامیدنی آمیخته شد. محلول حاصل شفاف و بدون تیرگی باقی ماند که نمایانگر سلامت افزودنی است. بر اساس توصیهٔ تولیدکننده و همچنین مطالعات پیشین (فخری و همکاران، ۱۳۹۳)، مقدار ۰/۱ درصد وزن قیر از زایکوترم به‌منظور اصلاح قیر برای تولید آسفالت نیمه‌گرم به کار گرفته شد.

جدول ۳: دانه‌بندی مصالح مصرفی

NMAS ¹ =12.5	حد پایین (درصد عبوری)	درصد عبوری (حد بالا)	درصد عبوری (حد واسط)
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۹۹	۱۰۰	۹۵
۴/۷۵	۴۴	۷۴	۵۹
۲/۳۶	۲۸	۵۸	۴۳
۰/۳	۵	۲۱	۱۳
۰/۰۷۵	۲	۱۰	۶



شکل ۲: نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی

جدول ۴: مشخصات مصالح مصرفی

نتایج مصالح سیلیسی	نتایج مصالح آهکی	استاندارد	واحد	آزمایش‌های مصالح سنگی
۲/۶۱	۲/۵۲	ASTM C127	g/cm ³	وزن مخصوص مصالح درشت‌دانه
۲/۵۱	۲/۵۷	ASTM C128	g/cm ³	وزن مخصوص مصالح ریزدانه
۲۴	۲۷/۳	ASTM C131	%	درصد ساییش به روش لس‌آنجلس
۲/۴	۲/۷	ASTM C88	%	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم
۷۲	۶۵	ASTM T176	%	هم‌ارز ماسه
۲۱/۳	۱۶/۶۶	BS-812	%	درصد تورق

از آنجایی که وزن مخصوص زایکوترم $0/97$ گرم بر سانتی‌متر مکعب است، استفاده از یک میلی‌لیتر به جای یک گرم از آن پذیرفتنی به نظر می‌رسد. بر اساس پروتکل میکس شرکت سازنده، از همزن برقی برای اختلاط استفاده شد و سرعت آن به نحوی تنظیم شد که در قیر با دمای 120 درجه سلسیوس، گردابی به عمق 2 الی 3 سانتی‌متر ایجاد کند؛ سپس زایکوترم با سرنگ انسولین به آرامی با نرخ ده قطره بر دقیقه به قیر اضافه شد.

۵-۲- تعیین درصد قیر بهینه

در این مطالعه آزمایشگاهی، تعیین درصد قیر بهینه به کمک روش مارشال انجام شد. از آنجایی که جنس مصالح مصرفی متفاوت است، عملیات تعیین درصد قیر بهینه باید برای هر دو جنس مصالح انجام شود. طبق مطالعات پیشین که فخری و همکاران (۱۳۹۳) انجام داده‌اند، زایکوترم تأثیر ناچیزی روی درصد قیر بهینه دارد؛ بنابراین برای حصول نتایج قابل مقایسه در شرایط مشابه، فرض شده است مخلوط‌های تولیدشده به روش گرم و نیمه‌گرم درصدهای قیر بهینه یکسانی دارند. لذا برای هر جنس مصالح، سه گروه مخلوط آسفالتی استوانه‌ای با درصدهای قیر 4 تا $6/5$ با افزایش پله‌ای $0/5$ درصدی ساخته شد. پس از ساخت مجموعاً 36 نمونه و شکست آن‌ها زیر جک مارشال، درصد قیر بهینه به کمک منحنی‌های مارشال برای مصالح آهکی $4/9$ درصد و برای مصالح سیلیسی $5/4$ درصد تعیین شد.

۶-۲- ساخت نمونه‌های اصلی

برای انجام آزمایش‌های مرتبط با استاندارد سوپر پیو^۱، از متراکم‌کننده ژیراتوری^۲ SGC^۲ متناسب با همین استاندارد استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های آسفالتی گرم، 1200 گرم مصالح سنگی به‌ازای هر نمونه به مدت 24 ساعت در داخل گرمخانه با دمای 165 درجه سلسیوس قرار داده شد. قیر خالص اصلاح‌نشده نیز تا دمای 147 درجه سلسیوس حرارت داده شد؛ سپس قیر مدنظر با درصدهای بهینه مختلف به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مارشال برای مصالح آهکی و سیلیسی، با مصالح سنگی مربوطه ترکیب شد و عملیات اختلاط به مدت پنج دقیقه با دمای کنترل‌شده با دستگاه همزن به‌خوبی انجام گرفت. مخلوط‌های حاصل برای تراکم داخل قالب ژیراتوری ریخته شدند. تعداد دوران صد دور متناسب با ترافیک سنگین و همچنین زاویه دوران $1/25$ درجه متناسب با دستورالعمل سوپر پیو در نرم‌افزار دستگاه تنظیم شد و نمونه‌ها طبق تنظیمات وارد شده متراکم شدند. برای تهیه نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم، پس

1. superpave
2. Superpave Gyrotory compactor

از آماده‌سازی قیر اصلاح‌شده 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 اصلاح‌شده طبق پروتکل میکس آسفالت نیمه‌گرم به مصالح اضافه شد و پس از اختلاط، به‌منظور تراکم داخل قالب ژیراتوری ریخته شد. تمامی عملیات تراکم و ورودی‌های نرم‌افزار دقیقاً مشابه مخلوط‌های آسفالتی گرم شاهد انجام شد تا اثر پارامترهای اضافه بر تحلیل نتایج از بین برود.

۳- آزمایش‌های عملکردی

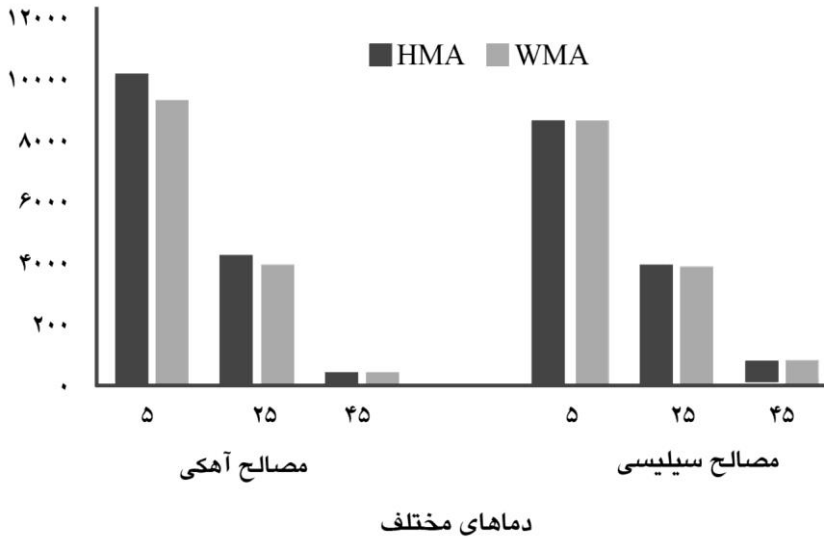
۱-۳- آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم^۱ (IDT)

برای بررسی تأثیر افزودنی مدنظر و همچنین جنس مصالح مصرفی روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی، این آزمایش به‌وسیله‌ی دستگاه UTM05 انجام شد. مدول برجهندگی یکی از اصلی‌ترین پارامترهای مخلوط‌های آسفالتی است و مستقیماً در طراحی‌ها به کار می‌رود. به‌خوبی شناخته شده که اکثر مخلوط‌های آسفالتی کاملاً الاستیک عمل نمی‌کنند، بلکه بعد از هر اعمال باری، متحمل مقداری تغییر شکل دائمی نیز می‌شوند. البته بر اساس TDOT (۱۹۹۵) اگر مقدار بار نسبت به مقاومت مصالح، کم باشد حتی اگر به تعداد بسیار زیاد اعمال شود، تغییر شکل زیر هر سیکل بارگذاری تقریباً برگشت‌پذیر بوده و متناسب با بار اعمالی است و می‌تواند الاستیک در نظر گرفته شود. مدول الاستیسیته^۲ مخلوط‌های قیری که بر اساس استاندارد ASTM D4123 محاسبه می‌شود یک اندازه‌گیری بر اساس تنش- کرنش است که به اندازه‌گیری خواص الاستیک این مخلوط‌ها می‌پردازد. در این آزمایش، مقدار تغییر مکان افقی به‌وسیله^۳ دو سنسور افقی که در مقابل هم در راستای افقی نمونه‌ها در وسط آن‌ها نصب می‌شوند، اندازه‌گیری می‌شود. در طول این آزمایش، تعداد هشت نمونه مخلوط آسفالتی گرم و نیمه‌گرم با بار دینامیک هزار نیوتنی، به‌نحوی که تغییر مکان 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 شد؛ سپس پنج بارگذاری اصلی به شکل نیم سینوسی^۲، به نمونه‌ها اعمال شد و مدول برجهندگی نمونه‌ها در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۵ درجه سلسیوس به دست آمد که در شکل ۳ نشان داده شده است. اگر بار دینامیک واردشده به نمونه را که سبب تغییر مکان افقی می‌شود P بنامیم، مقدار مدول برجهندگی نمونه‌ها (MR) از فرمول زیر به دست می‌آید:

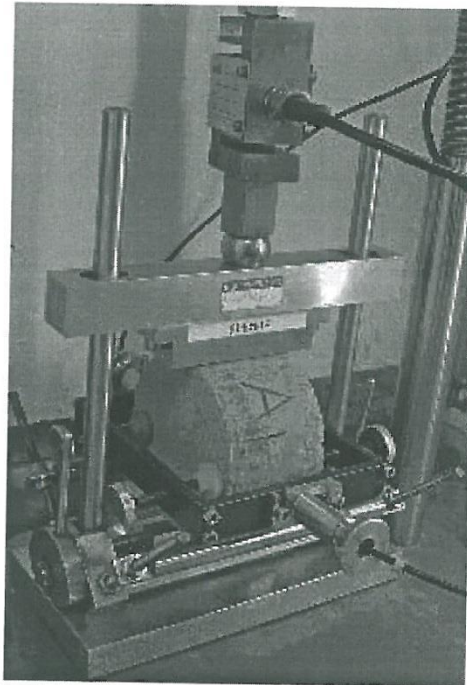
1. Indirect Tensile test
2. Haversine

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

که در آن p بیشینه بار اعمالی به نمونه‌ها (نیوتن)، m ضریب پواسن با فرض 0.35 ، t ضخامت نمونه‌ها (میلی‌متر) و δh تمامی تغییر مکان‌های افقی برگشت‌پذیر است.



شکل ۳: نتایج آزمایش مدول برجهنگی در دماهای مختلف



شکل ۴: دستگاه آزمایش مدول برجهندگی

۴- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم ابزار مناسبی برای ارزیابی مقاومت کششی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط‌های آسفالتی است؛ همچنین از این آزمایش برای ارزیابی حساسیت رطوبتی و عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی نیز استفاده می‌شود [۱]. در جدول ۲ مشخصات اصلی آزمایش برای کاربردهای مذکور ارائه شده است.

بین مخلوط‌های تولیدشده با کف قیر و مخلوط‌های گرم یا امولسیون قیری از نظر نحوه پخش و توزیع قیر و اندود شدن سنگ‌دانه‌ها اختلاف اساسی وجود دارد. در حالت استفاده از قیرهای خالص و امولسیون قیر، تمام سطح سنگ‌دانه‌ها با قیر پوشش داده می‌شود. درحالی‌که با کف قیر سنگ‌دانه‌های درشت به‌طور کامل اندود نمی‌شوند و قیر بیشتر سطح ریزدانه‌ها را می‌پوشاند؛ نهایتاً ملاتی تولید می‌شود که باعث چسبندگی مخلوط و سنگ‌دانه‌های درشت و ریز به یکدیگر خواهد شد. از آنجاکه سنگ‌دانه‌ها در مخلوط‌های آسفالت کف قیر به‌طور کامل قیراندود نمی‌شوند، حساسیت رطوبتی آن‌ها به‌عنوان یکی از

معیارهای اصلی طراحی آنان مطرح است.

در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، بارگذاری به کمک دو تیغه یا نوار فلزی مطابق استاندارد AASHTO-T283 انجام می‌شود (شکل ۵). هنگام آزمایش، نمونه در قالب بارگذاری مربوطه قرار داده می‌شود و بارگذاری با سرعت ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر (۲ اینچ در دقیقه) به صورت قطری اعمال می‌شود. بار نهایی در موقع شکستن نمونه (دو نیمه شدن) اندازه‌گیری شده و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه با استفاده از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi Dt}$$

که در آن

ITS: مقاومت کششی غیرمستقیم بر حسب کیلوپاسکال،

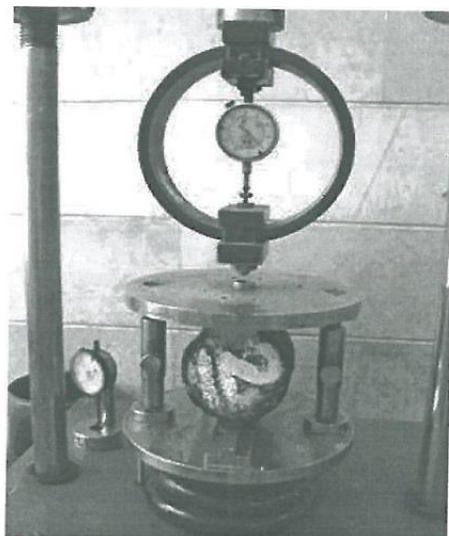
P: بار نهایی در هنگام گسیختگی بر حسب کیلونیوتون،

D: قطر نمونه بر حسب میلی‌متر و

T: ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر است.

جدول ۵: مشخصات آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم برای ارزیابی معیارهای مختلف

Application	Deformation Rate(mm/min)	Temperature(°C)
ITS	۵۰	۲۵
Water Sensitivity	۵۰	۲۵
Fatigue Cracing	۵۰	-۱۰، ۴، ۲۰



شکل ۵: دستگاه آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

۱-۴- آزمایش‌های حساسیت رطوبتی

در این مطالعه از آزمایش مارشال برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از روش‌های لاتمن اصلاح‌شده، آزمایش آب جوشان، آزمایش تگرزاس و تعیین قیر بهینه استفاده شده است. برای تراکم نمونه‌ها در مقدار قیر بهینه، از متراکم کننده ژیراتوری متناظر با استاندارد سوپر پیو استفاده شد و تعداد دوران به نحوی تنظیم شد که مقدار فضای خالی موجود در نمونه‌ها، طبق توصیه دستورالعمل سوپر پیو، در و مقدار ۷۶ درصد قرار گیرد.

۱-۱-۴- آزمایش مارشال (تعیین قیر بهینه)

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



فضای خالی آسفالت متراکم‌شده و درصد حجمی فضای خالی مصالح سنگی در آسفالت متراکم‌شده به دست آمده است. در جدول ۴ مقدار قیر بهینه و مقاومت مارشال برای هر یک از نمونه قیر نشان داده شده است.

۲-۱-۴- آزمایش حساسیت رطوبتی (آزمایش کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح‌شده، AASHTO T283)

روش استاندارد AASHTO T283 (مقاومت مخلوط قیری متراکم در برابر آسیب رطوبتی) یکی از معمول‌ترین فرآیندهای آزمایشی برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. این آزمون بر روی نمونه‌های متراکم‌شده با درصد هوای 7 ± 1 انجام می‌شود. حداقل تعداد نمونه‌ها برای هر نوع مخلوط شش عدد است. نیمی از نمونه‌ها باید تحت شرایط استاندارد عمل‌آوری شوند که ابتدا نمونه‌ها برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد زیر شرایط خلأ قرار می‌گیرند. نمونه‌های خلأ و اشباع‌شده، در فریزر در دمای -18 درجه سانتی‌گراد برای ۱۹ ساعت و سپس در حمام آب 60 درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت نگهداری می‌شوند. در نهایت نمونه‌های تحت شرایط قرار گرفته و دیگر نمونه‌ها به درجه حرارت ثابت 25 درجه سانتی‌گراد رسانده می‌شوند. هر دو گروه نمونه‌ها برای انجام مقاومت کششی غیرمستقیم تحت بارگذاری با نرخ ثابت (50 mm/min) قرار گرفته و مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه اندازه‌گیری می‌شود [NCHRP report444, AASHTO T283] بعد از به دست آوردن مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌های مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) از رابطه شماره ۱ محاسبه می‌شود. در شکل ۳ آزمایش کشش غیرمستقیم و شرایط انجام آن به صورت شماتیک ارائه شده است.

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

ITS: مقاومت کششی برحسب کیلوپاسکال،

P: بیشینه بار برحسب نیوتن،

D: قطر نمونه برحسب میلی‌متر و

t: ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر.

مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت را با TSR برحسب درصد نشان می‌دهند که بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود. مقدار ITS در رابطه ۲ مقدار میانگین برای نمونه‌های تحت شرایط اشباع و خشک است. حداقل مقدار TSR باید 80 درصد باشد و هر چه مقدار TSR بیشتر باشد نشان‌دهنده مقاومت بیشتر در برابر رطوبت است.

$$TSR = \frac{ITS_{\text{اشباع}}}{ITS_{\text{خشک}}}$$

جدول ۶: درصد قیر بهینه و نتایج آزمایش مارشال

نوع نمونه	درصد قیر بهینه	استقامت مارشال (کیلو نیوتن)	روانی (میلی متر)
نمونه شاهد	۴/۹	۸/۷۶	۳/۳۵
۲٪	۵/۴	۹/۶۱	۳/۷۰
۴٪	۵/۵	۱۰/۰۶	۳/۷۷
۶٪	۵/۶	۱۰/۳۷	۳/۶۴
۲٪	۵/۲	۹/۸۱	۳/۶۲
۴٪	۵/۳	۱۰/۲۵	۳/۶۴
۶٪	۵/۴	۱۰/۸۴	۳/۴۵

۳-۱-۴- آزمایش لاتمن اصلاح شده

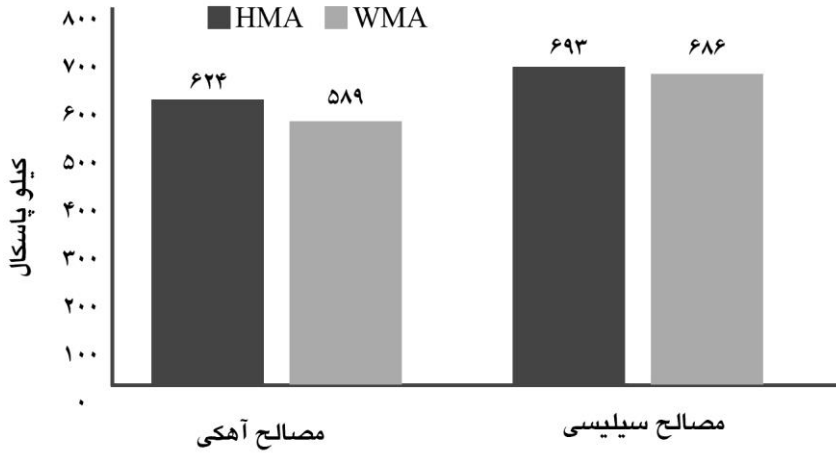
یکی از معروفترین و متداولترین روشها برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی، آزمایش لاتمن اصلاح شده (کشش غیرمستقیم) است. این آزمایش برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوطهای متراکم بعد از قرار دادن نمونهها در معرض شرایط اشباع انجام می شود. نمونهها به صورت استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی متر و ضخامت ۶۵ تا ۷۰ میلی متر به روش سوپر پیو متراکم شدند و تعداد دوران به نحوی تنظیم شد که درصد فضای خالی مخلوط در بازه ۷۶۱ قرار گیرد. برای هر جنس مصالح، تعداد سه نمونه به صورت عمل آوری شده و سه نمونه به صورت عمل آوری نشده مطابق استاندارد AASHTO T283 تحت آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) بین دو نوار فلزی صلب در راستای قطری نمونهها با نرخ بارگذاری پنجاه میلی متر بر دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا نمونهها گسیخته شوند. مقدار نیروی لازم برای گسیختگی نمونهها ثبت شد. مقدار کشش غیرمستقیم (ITS) از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times t}$$

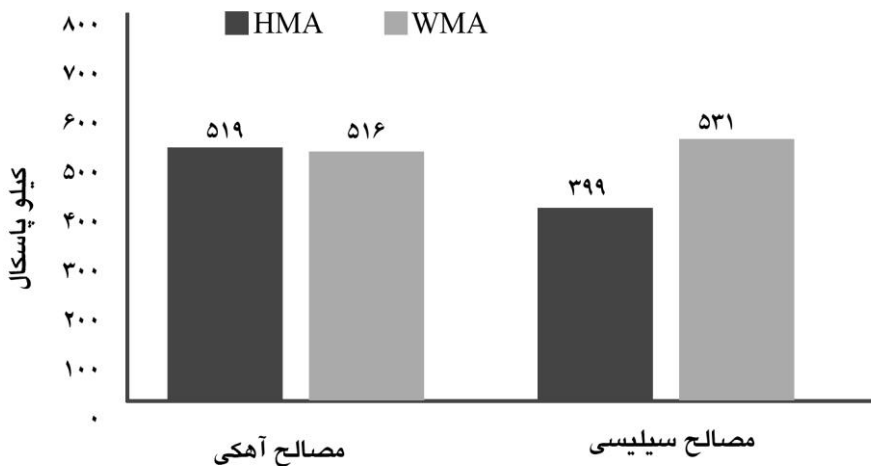
که در آن P بیشترین نیروی اعمالی برای شکست نمونهها (کیلو نیوتن)، t ضخامت نمونهها (میلی متر) و d قطر نمونهها (میلی متر) است. مقدار TSR معمولاً به درصد و به صورت میانگین مقدار ITS نمونههای اشباع شده به اشباع نشده به شکل زیر بیان می شود.

$$TSR = \frac{ITS_{conditioned}}{ITS_{unconditioned}} \times 100$$

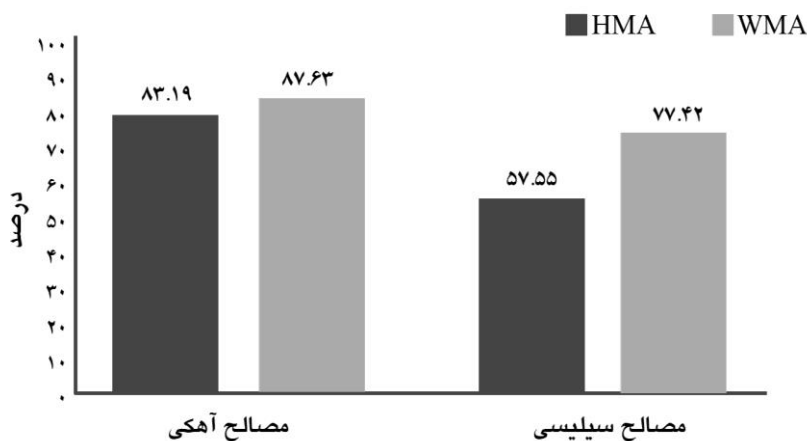
لاتمن (۱۹۷۸) اعلام کرد که مخلوط‌های آسفالتی با مقدار TSR بیشتر از ۷۰ درصد عموماً کمتر مستعد آسیب‌های رطوبتی هستند. مقادیر ITS و TSR متناظر به دست‌آمده برای مصالح سیلیسی و آهکی در شکل‌های ۴ الی ۶ ارائه شده است.



شکل ۶: مقادیر ITS نمونه‌های عمل‌آوری نشده



شکل ۷: مقادیر ITS نمونه‌های عمل‌آوری شده



شکل ۸: مقادیر TSR

۴-۱-۴- آزمایش آب جوشان تگزاس

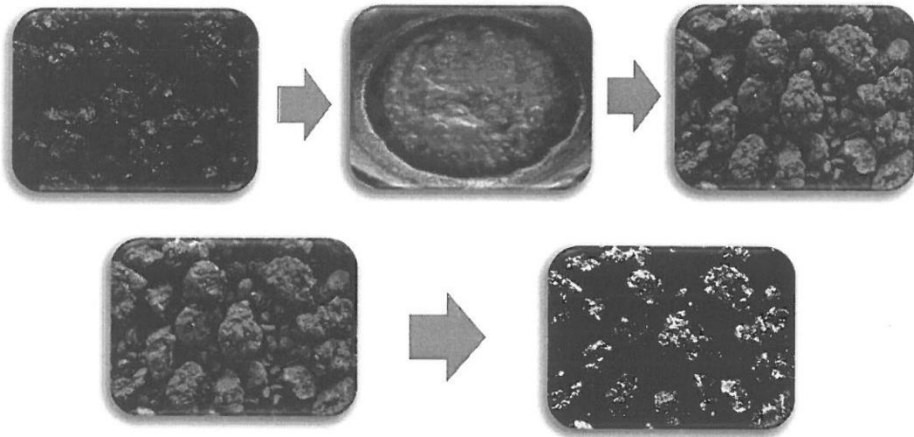
آزمایش آب جوشان، معروف به آزمایش تگزاس، مطابق با استاندارد ۳۶۲۵ ASTM D یکی از ساده‌ترین آزمایش‌هایی است که برای ارزیابی ویژگی‌های مربوط به چسبندگی سنگ‌دانه‌ها به قیر و همچنین پتانسیل عریان‌شدگی مصالح استفاده می‌شود. برای انجام این تست حدود ۲۵۰ گرم از مصالح داخل آب جوش به مدت ده دقیقه جوشانده می‌شود. مخلوط هر سه دقیقه یک‌بار هنگام جوشاندن به مدت ده ثانیه هم زده می‌شود. پس از خالی کردن آب، مخلوط برای بررسی چسبندگی عریان‌شدگی، روی کاغذ سفید پخش شده و درصد کاهش قیر اندود شده با مصالح به سبب جوشیدن در آب، بررسی می‌شود. این کاهش اندودشدگی نمایانگر بروز آسیب‌های رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی است. در این مطالعه، برای کمی‌سازی و افزایش دقت در بررسی عریان‌شدگی مصالح، از نمونه‌های مختلف قبل و بعد از انجام آزمایش، با دوربین دیجیتال عکس گرفته شد؛ سپس عکس‌ها با نرم‌افزار MATLAB به عکس‌های دیجیتال با پیکسل‌های سیاه تا سفید به صورت فازی تبدیل شد که روشن بودن هر قسمت از عکس نشان‌دهنده عریان‌شدگی بیشتر آن قسمت است. پیکسل‌های سیاه متناظر با عدد صفر و پیکسل‌های سفید متناظر با عدد ۲۵۵ در نرم‌افزار ثبت می‌شوند و سایر پیکسل‌ها با توجه به درجه روشنایی در این بازه قرار می‌گیرند. عدد ۱۲۸ به عنوان مرز بین مصالح عریان‌شده و عریان‌نشده فرض می‌شود. آنالیز عکس نمونه‌های مختلف با کمک پردازش تصاویر در این نرم‌افزار دقیقاً بررسی شد. روند انجام کار و نتایج پردازش تصویر تمامی نمونه‌ها در شکل ۷ و جدول ۵ نشان داده شده است. این جدول

نشان می‌دهد آزمایش آب جوشان قابلیت ارزیابی تأثیر جنس مصالح را روی بررسی عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم و نیمه‌گرم دارد. مکانیسم عریان‌شدگی به وقوع پیوسته به دلیل نبودن چسبندگی مناسب بین قیر و مصالح، با روند به‌دست‌آمده از آزمایش TSR همخوانی دارد.

۵- تحلیل نتایج

۵-۱- تحلیل نتایج آزمایش مدول برجهندگی

با آنالیز نتایج به‌دست‌آمده، در بررسی تأثیر زایکوترم بر مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی در دماهای مختلف، می‌توان اظهار داشت در تمامی دماها، مدول برجهندگی نمونه‌های شاهد تولیدشده به روش گرم (HMA)، مقادیر بیشتری نسبت به نمونه‌های تولیدشده 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.



شکل ۹: روند انجام آزمایش آب جوشان و پردازش تصاویر

جدول ۷: نتایج حاصل از پردازش تصاویر شکل ۷

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

آنچه جای بحث دارد علت وقوع این رخداد است که می‌تواند ناشی از عملکرد نامناسب زایکوترم به‌عنوان ماده تولیدکننده آسفالت نیمه‌گرم باشد. در تکمیل آنچه ذکر شد، می‌توان گفت با توجه به پروتکل میکس که شرکت سازنده (زایدکس) ارائه کرده است، دمای اصلاح قیر که ۱۲۰ درجه سلسیوس پیشنهاد شده، دمای مناسبی به نظر نمی‌رسد و باید دمای بیشتری جایگزین شود که می‌تواند ناقض مفهوم آسفالت نیمه‌گرم نیز باشد. البته بدیهی است اظهار نظر دقیق‌تر مستلزم انجام آزمایش‌ها بیشتری است و نویسندگان پیشنهاد می‌کنند برای نتیجه‌گیری نهایی، آزمایش‌ها در مقیاس وسیع‌تری انجام شود.

۲-۵- تحلیل نتایج آزمایش لاتمن اصلاح‌شده

اگر نمونه‌های عمل‌آوری‌نشده را بررسی کنیم، در هر دو مصالح آهکی و سیلیسی تفاوت فاحشی بین ITS نمونه‌های گرم و نیمه‌گرم دیده نمی‌شود؛ هرچند این اختلاف در مصالح آهکی بیشتر بوده و مقدار ITS نمونه‌های شاهد بزرگ‌تر از نمونه‌های نیمه‌گرم است؛ اما پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، شاهد تغییرات چشمگیر و کاهش درخور توجه مقاومت مصالح سیلیسی هستیم. مقدار ITS مخلوط شاهد سیلیسی از ۶۹۳ کیلوپاسکال با ۴۲ درصد کاهش، به تقریباً نصف، یعنی ۳۹۹ کیلوپاسکال، می‌رسد. درحالی‌که مخلوط حاوی افزودنی کاهش چشمگیری در مقاومت تجربه نکرده است و مقدار آن از ۶۸۶ کیلوپاسکال به ۵۳۱ کیلوپاسکال رسیده است. برخلاف روند نزولی مشاهده‌شده در آزمایش مدول برجهندگی و همچنین ITS نمونه‌های عمل‌آوری‌نشده، می‌توان اظهار داشت افزودنی زایکوترم تأثیر مثبتی روی مقاومت مصالح سیلیسی در چرخه 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 چرخه عمل‌آوری طبق استاندارد AASHTO T283، به‌صورت خلاصه در جدول ۶ نشان داده شده

است.

جدول ۸: درصد کاهش ITS پس از عمل‌آوری

مصلح 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

در بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، باید اذعان کرد هم مخلوط‌های آسفالتی گرم و هم نیمه‌گرم تولیدشده با مصالح آهکی، با داشتن TSR بیش از ۸۰ درصد، وضعیت بسیار مطلوبی دارند. مخلوط‌های آسفالتی گرم تولیدشده با مصالح سیلیسی، وضعیت بسیار نامساعدی در برابر رطوبت از خود نشان می‌دهند؛ ولی در حالت نیمه‌گرم، افزودنی استفاده‌شده تأثیر بسیار چشمگیری روی این مصالح دارد و آن را در بازه‌ی پذیرفتنی قرار می‌دهد. زایکوترم تأثیر بسیار بیشتری بر مصالح سیلیسی نسبت به مصالح آهکی، دارد و درصد این تأثیر در جدول ۷ بیان شده است.

جدول ۹: تأثیر زایکوترم بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی

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

در بررسی این پدیده می‌توان گفت سنگ‌های سیلیسی دارای کانی‌های کوارتز (SO₄) بوده و در هنگام حضور آب به علت پیوند هیدروژنی دارای چسبندگی ضعیفی هستند. سنگ‌های آهکی دارای کانی‌های کلسیت (CaCO₃) و همچنین دولومیت ۲ (CaMgCO₃) هستند و معمولاً چسبندگی خوبی دارند و با قیر پیوندهای قوی الکترواستاتیک برقرار می‌کنند؛ ولی شکننده‌اند. مفهوم درجه چسبندگی شیمیایی بر اساس اسیدیته بیان می‌شود. چسبندگی بین ماده‌ای اسیدی و ماده‌ای 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 با هم خواهند داشت. حتی اگر قیر خنثی باشد یا گروه‌های بازی یا اسیدی داشته باشد، در بیشتر مطالعات به صورت ماده‌ای اسیدی در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا در قیر غلظت یون هیدرونیوم^۱ زیاد بوده و دارای درجه اسیدیته کمتر از هفت است؛ بنابراین فرض می‌شود سنگ‌دانه‌های قلیایی باید چسبندگی بهتری با قیر نسبت به چسبندگی‌ای که قیر با سنگ‌دانه‌های اسیدی برقرار می‌کند، داشته باشند. با فرض اینکه اسیدیته آب برابر هفت باشد و قیر اسیدیته کمتر از هفت داشته باشد، سنگ‌دانه‌های اسیدی آب‌دوست در نظر گرفته می‌شوند و آب می‌تواند قیر را از روی سطح آن‌ها پاک کند. بدین معنی که قیر تمایل به جابجایی از روی سنگ‌دانه‌ها و جایگزین شدن به روی سنگ‌دانه‌ها را دارد. بیشتر سنگ‌دانه‌ها، هم مشخصات قلیایی و هم بازی دارند؛ پس اسیدی یا قلیایی بودن به صورت نسبت جزء اسیدی (SiO_2 و CO_2) به جزء قلیایی عمدتاً $(\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{MgO}, \text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}, \text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3)$ بیان می‌شود. سنگ‌دانه‌های سیلیسی درصد زیادی سیلیکا (SiO_2) دارند. حال آنکه سنگ‌دانه‌های آهکی درصد زیادی کلسیم کربنات (CaCO_3) دارند؛ بنابراین سطوح این سنگ‌دانه‌ها دارای ترکیبات شیمیایی متفاوت است و پیوندهای متفاوتی با اجزای قیر برقرار می‌کنند که در برابر رطوبت مقاومت متفاوتی دارند. زایکوترم افزودنی‌ای بر پایه سیلان است. سیلان گروهی از سیلیکون‌های هیدروژن دار (هیدرید سیلیکون) است که دارای زنجیره‌های آلی با تمایل به قیر و انتهای قطبی با تمایل به سطح غیر آلی (معدنی) است (دیویتو و موریس، ۱۹۸۲). سیلان‌هایی که عملکرد آلی دارند در خلال فرایند هیدرولیز و در حضور آب، سیلانول تولید می‌کنند که این ماده سریعاً متراکم شده و به فرم سیلوکسان حاوی اجزای آب‌گریز درمی‌آید و به صورت محلول در قیر باقی می‌ماند. درحالی که قسمت غیر آلی با هیدروکسیل سطح سیلیسی سنگ‌دانه‌ها پیوند هیدروژنی برقرار می‌کند. در اثر گرم شدن، این پیوندهای هیدروژنی درهم‌فشرده شده یا می‌شکنند و تولید لایه‌ای از پیوند Si-O-Si روی سطح سنگ‌دانه‌ها 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 $(\text{SiOH})_n$ ---- H_2O_n می‌دهد (کندال، ۱۹۹۲). برای درک بهتر پدیده‌ی عریان‌شدگی در اثر ضعف چسبندگی، مکانیسم‌های 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،

1. Hydronium ion

پس مکانیسم‌هایی که از بین رفتن چسبندگی در سیستم قیر و سنگ‌دانه را کنترل می‌کنند، همچنان پیچیده هستند.

۳-۵- تحلیل نتایج آزمایش آب جوشان

عکس‌های دیجیتال گرفته‌شده از نمونه‌ها نشان می‌دهند در حالت کلی افزودنی زایکوترم سبب کاهش قسمت‌های عمده‌ای از پیکسل‌های سفیدرنگ می‌شود. این بدین معناست که زایکوترم به‌عنوان افزودنی ضد عریان‌شدگی در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی موفق عمل کرده است. نتایج حاصل از پردازش تصاویر، در راستای سایر آزمایش‌های همین تحقیق و همچنین یافته‌های محققین پیشین (سنگ سفیدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ حسامی و همکاران، ۲۰۱۵) است و نتایج آنان را تأیید می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

تحلیل نتایج حاصل از آزمایش مدول برجهندگی نشان می‌دهد جنس مصالح و دمای آزمایش، تأثیر چشمگیری بر روند نتایج آزمایش مذکور ندارند. بررسی نتایج حاکی از عملکرد نه‌چندان مطلوب زایکوترم به‌عنوان افزودنی نیمه‌گرم روی مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌هاست؛ چراکه در تمامی دماها برای هر دو نوع مصالح آهکی و سیلیسی، مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌های نیمه‌گرم از مقادیر مشابه نمونه‌های شاهد کمتر است. نتیجه‌گیری قطعی در این مورد، به تحقیقات آتی واگذار می‌شود. نمونه‌های آسفالتی گرم تهیه‌شده با مصالح سیلیسی، هنگامی که در معرض شرایط اشباع قرار می‌گیرند، نسبت به نمونه‌های مشابه تولیدشده با مصالح آهکی با شرایط یکسان، آسیب‌پذیرتر به نظر می‌رسند و شاهد کاهش درخور توجه مقاومت کششی غیرمستقیم مصالح سیلیسی نسبت به مصالح آهکی هستیم. درحالی‌که تفاوت فاحشی بین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی تولیدشده با مصالح آهکی و سیلیسی در حالت غیراشباع وجود ندارد.

زایکوترم تأثیر مثبتی روی مقاومت مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم تهیه‌شده با مصالح سیلیسی در چرخه اشباع دارد و از کاهش چشمگیر مقاومت آن جلوگیری می‌کند. نمونه‌های آسفالتی شاهد و نیمه‌گرم تولیدشده با مصالح آهکی، با دارا بودن مقادیر TSR بیش از ۸۰ درصد، مقاومت بسیار مطلوبی در برابر خرابی‌های ناشی از رطوبت دارند و استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی برای آن‌ها توصیه نمی‌شود. نمونه‌های آسفالتی گرم تولیدشده با مصالح سیلیسی، به دلیل وجود پیوندهای ضعیف هیدروژنی با قیر و همچنین درجه اسیدیته نامناسب، وضعیت بسیار نامساعدی در برابر خرابی‌های ناشی از رطوبت از خود نشان می‌دهند. درحالی‌که نمونه‌های مشابه تولیدشده به روش نیمه‌گرم، با افزودنی زایکوترم، وضعیت

پذیرفتنی‌ای دارند که می‌تواند ناشی از اصلاح پیوندهای شیمیایی برقرارشده بین قیر و مصالح سیلیسی به دلیل حضور زایکوترم به‌عنوان ماده شیمیایی نانو بر پایه سیلان باشد. این موضوع با تحلیل نتایج حاصل از پردازش تصاویر نمونه‌های آزمایش آب جوشان نیز مطابقت دارد.

منابع

الف. فارسی

فخری، منصور، ونائی، وحید و راهی، محمد. (۱۳۹۳)، "ارزیابی رئولوژیکی تاثیر نانو مصالح مایع بر خواص و عملکرد قیر". هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و عملکرد قیر. هشتمین کنگره مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، سال اول، شماره سوم، پاییز. ۱۳۹۴

ب. انگلیسی

- Anderson, R. M., Baumgardner, G., May, R. and Reinke, G. (2008). "Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technology". National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Interim Report, pp. 9-47. Di Vito, J. A. and Morris, G. R. 1982. "Silane pretreatment of mineral aggregate to prevent stripping in flexible pavements". Arizona Transport. Res. Center, Arizona State Univ., Tempe, AZ. Dukatz, E. L. 1989. "Aggregate properties related to pavement performance". Proc. of the Assoc. Asphalt Paving Technol., Vol. 58.
- 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., Vol. 74.
- Hesami, S., Ameri, M., Goli, H. and Akbari, A. (2015). "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates". Int. J. Pavement Eng. 16(8): 745-759. 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 damage".



- Mater, J. Civil 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, Auburn Univ., Auburn, AL. Kandhal, P. S. 1992. "Moisture Susceptibility of HMA Mixes: Identification of Problem and Recommended Solutions". NCAT No. 92-1, Auburn Univ.
- Auburn, AL. Kandhal, P. S. and Parker, F. (1998). "Aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements". NCHRP Project 4-19, Transport. Res. 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, S. 2010. "Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures". J. Mater. Civil Eng. 22(10): 1047-1055.
- Zaniewski, J. and Viswanathan, A. G. (2006). "Investigation of moisture sensitivity of hot mix asphalt concrete". Report Submitted to West Virginia Division of Highways.