

## تأثیر نوع مصالح بر خواص عملکردی آسفالت نیمه گرم اصلاح شده با زایکوترم

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

E-mail: peyman\_mirzababaei@yahoo.com

دریافت: ۹۴/۰۲/۱۰ - پذیرش: ۹۴/۰۷/۲۵

### چکیده

امروزه، تکنولوژی آسفالت نیمه گرم به عنوان روشی کارآمد برای کاهش هزینه‌های تولید آسفالت، مصرف سوخت و آلودگی‌های زیست محیطی شناخته شده است. در مقابل محاسن بی‌شمار، پدیده عریان‌شدگی به عنوان 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 به کار می‌رود، استفاده از مواد افزودنی شیمیایی و اُرگانیک است. زایکوترم، تحت عنوان یک افزودنی نانوشیمیایی، نقشی دو جانبه به عنوان افزودنی ضدعریان‌شدگی و افزودنی تولید آسفالت نیمه گرم 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 مطالعه - ی آزمایشگاهی، بررسی تأثیر جنس مصالح روی خواص عملکردی آسفالت نیمه گرم اصلاح شده با افزودنی نانوشیمیایی زایکوترم به عنوان ماده‌ی اصلاح کننده‌ی قیر و ماده‌ی ضدعریان کننده، در قالب 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، است. جهت 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 به عنوان افزودنی آسفالت نیمه گرم 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: مصالح سیلیسی، زایکوترم، حساسیت رطوبتی، آزمایش لاتمن، پردازش تصویر

### ۱. مقدمه

مصرف سوخت‌های فسیلی به یکی از مهمترین چالش‌های دنیای امروز تبدیل شده است. فرایند تولید و تراکم آسفالت گرم به دلیل مصرف زیاد سوخت‌های

در سال‌های اخیر، مسائل زیست محیطی و همچنین کاهش

زایکوترم جهت اصلاح قیر و تولید آسفالت نیمه گرم و همچنین به عنوان یک ماده‌ی ضدعریان‌شدگی<sup>۱</sup> استفاده شده است. نانو تکنولوژی، صنعت تولید لوازم و مصالح در مقیاس نانو است و این اندرکنش مواد در سطح اتمی و مولکولی، تأثیر بسیار زیادی بر خواص ماکروسکوپیکی اشیا دارد.

هدف اصلی این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، بررسی تأثیر زایکوترم به عنوان ماده‌ی افزودنی اصلاح کننده‌ی قیر و ماده‌ی ضدعریان کننده روی خواص عملکردی آسفالت نیمه گرم 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 شده که تغییر در جنس مصالح می‌تواند روی خرابی ناشی از رطوبت تأثیر به‌سزایی داشته باشد و خرابی مخلوط آسفالتی به دلیل وجود رطوبت وابسته به تنش‌های پیوند بین قیر و مصالح سنگی است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. تهیه‌ی مخلوط‌های آسفالتی

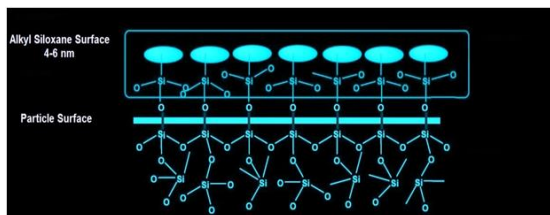
خواص عملکردی مخلوط‌های نیمه گرم تحت آزمایش و بررسی قرار گرفته و با نمونه‌های شاهد که به روش گرم تولید شدند مورد مقایسه قرار گرفتند.

### ۲-۲. قیر و افزودنی

جهت تهیه مخلوط‌های گرم و نیمه گرم، از قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ و جهت اصلاح قیر و تهیه مخلوط آسفالتی نیمه گرم، 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

فسیلی و تولید آلودگی‌های مربوطه همواره به عنوان یک صنعت پرهزینه و همچنین تولیدکننده‌ی گازهای گلخانه‌ای در معرض انتقاد کارشناسان و منتقدین قرار گرفته است. جهت حل این معضل، راه‌های گوناگونی پیشنهاد شده که در میان آنها تکنولوژی آسفالت نیمه گرم در بین خیرگان این حوزه از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه 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 و یا خرابی در ساختار قیر عنوان شده است (شیانو و همکاران، ۲۰۱۰). حساسیت در برابر رطوبت به تنهایی به عنوان 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 بارگذاری‌های متمادی، ذرات آسفالت دچار گسستگی شده و این موضوع تحت خرابی‌هایی نظیر چاله، شیارشدگی، ترک خوردگی و شن زدگی بروز پیدا می‌کند (خدایی و همکاران، ۲۰۱۲). در بررسی علل این پدیده می‌توان گفت که کاهش دمای اختلاط سبب می‌شود آب محبوس در مصالح به خوبی 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.

تکنولوژی‌های مختلفی جهت تولید آسفالت نیمه گرم به کار گرفته می‌شود که در میان آنها می‌توان به تکنولوژی 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 نیمه گرم است (هرلی و پروول، ۲۰۰۵). در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، از یک افزودنی شیمیایی نانو به نام



شکل ۱. پیوند سیلوکسانی (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	(۰/۱)mm	درجه نفوذ
>۱۰۰	> ۱۰۰	ASTM D113-79	۲۵	cm	میزان کشش‌پذیری
-	۱/۰۳	ASTM D70-76	۲۵	g/cm <sup>3</sup>	وزن مخصوص
۰-۰/۸	۰/۷۵	ASTM D1754-78	-	%	افت وزنی قیر در اثر حرارت
>۹۹	۹۹	ASTM D2042-76	-	%	حلالیت قیر
>۲۳۲	۳۱۰	ASTM D92-78	-	°C	درجه اشتعال (Cleveland)
۴۹-۵۶	۴۹	ASTM D36-76	-	°C	نقطه نرمی
-	۸۱۰	ASTM D2170-85	۱۲۰	mm <sup>2</sup> /s	ویسکوزیته کینماتیک
-	-0.915	-	-	-	شاخص درجه نفوذ (PI)

جدول ۲. مشخصات زایکوترم

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

درصد قیر در پیوند شرکت می‌کند. 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 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٪ 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.

سبب کاهش دمای تولید و تراکم و همچنین افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت می‌شود. بر خلاف سایر افزودنی‌های شیمیایی که بر پایه آمین‌ها می‌باشند، زایکوترم یک تکنولوژی 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 می‌باشد که تنها ۵ تا ۱۵

#### 1- Silane-based

### ۲-۳. مشخصات دانه بندی و مصالح مصرفی

در آیین نامه ایران، برای دانه بندی مصالح مصرفی در تهیه مخلوط آسفالتی مجموعاً ۷ رده معرفی شده و هر رده دانه بندی توسط یک حد بالا و یک حد پایین مشخص شده است. جهت تطبیق بیشتر مطالعات آزمایشگاهی با واقعیت در این مطالعه، از حد وسط دانه بندی ۴ و همچنین مصالح آهکی و سیلیسی به دلیل کاربرد بسیار وسیع آنها در تهیه مخلوطهای آسفالتی در لایه های بیندر و توپکا و همچنین علاقه ی زیاد پیمانکاران به این دانه بندی و مصالح، استفاده شده است. مطالعات بسیاری اتکای خرابی های آسفالت، از جمله عریان شدگی، را بر علم شیمی سنگدانه، کانی شناسی و مورفولوژی تصدیق می نمایند (کندال و پارکر، ۱۹۹۸؛ دوکاتس، ۱۹۸۹). نوع سنگدانه بر انرژی سطح و واکنش های شیمیایی و در نتیجه مواضع و مقدار مکان های اتصال یون های فلزی یا اجزای باردار اثر می گذارد. سنگدانه ها از کانی های متعددی تشکیل شده اند و هر کدام دارای ترکیب شیمیایی مشخصی هستند. بیشتر سنگدانه ها هم مشخصات قلیایی و هم بازی دارند. پس درجه اسیدیته و یا قلیایی به صورت نسبت جزء اسیدی ( $CO_2, SiO_2$ ) به جزء قلیایی (عمدتاً  $CaO, Al_2O_3, K_2O, Na_2O, MgO$  و  $Fe_2O_3$ ) بیان می گردد. به عنوان مثال، سنگدانه های سیلیسی دارای

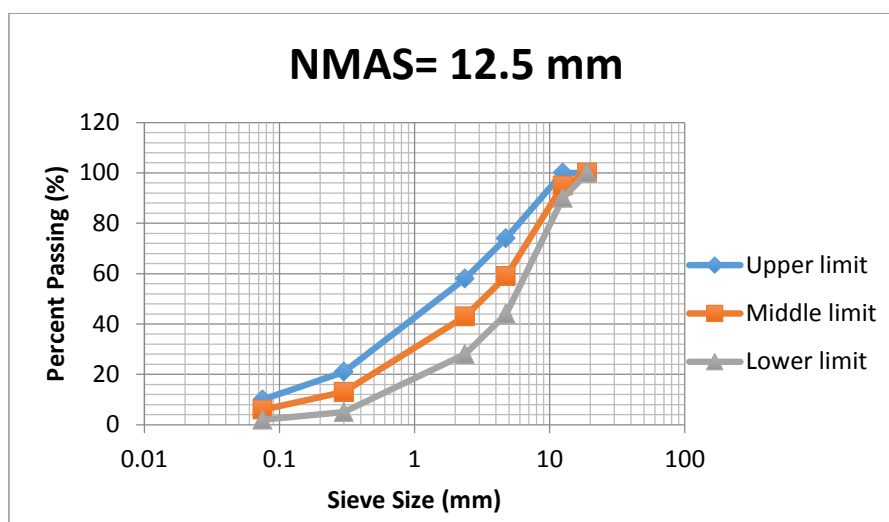
مقادیر زیاد کوارتز ( $SiO_4$ ) می باشند و در هنگام حضور آب، به علت پیوند هیدروژنی، دارای چسبندگی ضعیفی هستند. سنگدانه های آهکی دارای مقادیر زیاد کلسیت ( $CaCO_3$ ) و همچنین دولومیت ( $CaMg(CO_3)_2$ ) می باشند که این کانی ها معمولاً چسبندگی خوبی با قیر دارند و با آن پیوندهای قوی الکترواستاتیک برقرار می کنند. مشخصات دانه بندی، نمودار دانه بندی و همچنین مشخصات مصالح مصرفی به ترتیب در جدول ۳، شکل ۲ و جدول ۴ ارائه شده است.

### ۲-۴. آماده سازی قیر اصلاح شده

پیش از استفاده از افزودنی، بنا به توصیه شرکت تولید کننده (زایدکس)، جهت بررسی سلامت افزودنی، یک میلی لیتر زایکوترم با ۱۰ میلی لیتر آب آشامیدنی آمیخته شد. 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 نیمه گرم به کار گرفته شد.

جدول ۳. دانه بندی مصالح مصرفی

NMAS <sup>1</sup> = 12.5	حد پایین (درصد عبوری)	درصد عبوری (حد بالا)	درصد عبوری (حد وسط)
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۹۰	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

آزمایش‌های مصالح سنگی	واحد	استاندارد	نتایج مصالح آهکی	نتایج مصالح سیلیسی
وزن مخصوص مصالح درشت دانه	g/cm <sup>3</sup>	ASTM C127	۲/۵۷	۲/۶۱
وزن مخصوص مصالح ریز دانه	g/cm <sup>3</sup>	ASTM C128	۲/۵۴	۲/۵۱
درصد سایش به روش لس 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

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 توسط فخری و همکاران (۱۳۹۳)، زایکوترم تأثیر ناچیزی روی 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. 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.

از آنجایی که وزن مخصوص زایکوترم ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب است، استفاده از ۱ میلی‌لیتر بجای ۱ گرم از آن قابل قبول به نظر می‌رسد. براساس 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.

## ۲-۵. تعیین درصد قیر بهینه

در این مطالعه آزمایشگاهی، تعیین درصد قیر بهینه (OBC<sup>۱</sup>) به کمک روش مارشال صورت گرفت. از

### 1- Optimum Bitumen Content

## ۲-۶. ساخت نمونه‌های اصلی

جهت انجام آزمایش‌های مرتبط با استاندارد سوپر پیو<sup>۱</sup>، از متراکم کننده‌ی ژیراتوری (SGC<sup>۲</sup>) 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 ۲،۵ ۱۴۷۶ درجه سلسیوس حرارت داده شد. سپس، قیر مورد نظر با درصدهای بهینه‌ی مختلف به دست 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 به خوبی 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 نیمه گرم، 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 نیمه گرم 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.

## ۳. آزمایش‌های عملکردی

### ۳-۱. آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم (IDT<sup>۳</sup>)

جهت بررسی تأثیر افزودنی مورد نظر و همچنین جنس مصالح مصرفی روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی، این آزمایش به وسیله‌ی دستگاه UTM05 دانشگاه علم و صنعت ایران صورت گرفت. مدول برجهندگی یکی از اصلی‌ترین پارامترهای مخلوط‌های آسفالتی است و مستقیماً در طراحی‌ها به کار می‌رود. به خوبی شناخته شده که اکثر مخلوط‌های آسفالتی به صورت کاملاً الاستیک عمل نمی‌کنند. بلکه بعد از هر اعمال باری، متحمل مقداری تغییر شکل 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، تغییر شکل زیر هر سیکل بارگذاری تقریباً برگشت پذیر 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 اندازه‌گیری براساس تنش- کرنش است که به اندازه‌گیری خواص الاستیک این مخلوط‌ها می‌پردازد. در این آزمایش، مقدار تغییر مکان افقی به وسیله 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 نیمه گرم توسط یک بار دینامیک ۱۰۰۰ نیوتنی (به نحوی 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 و سپس ۵ بارگذاری اصلی به شکل نیم‌سینوسی<sup>۴</sup> به نمونه‌ها اعمال شده و مدول برجهندگی نمونه‌ها در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۵ درجه سلسیوس به دست آمد که در شکل ۳ نشان داده شده

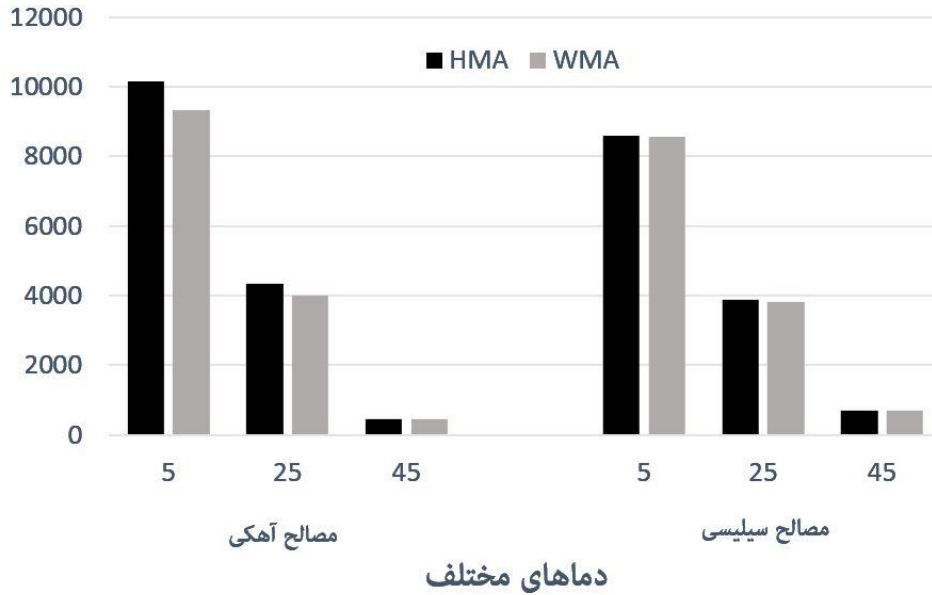
3- InDirect Tensile test  
4- Haversine

1- Superpave  
2- Superpave Gytratory Compactor

که در آن P بیشینه بار اعمالی به نمونه‌ها (نیوتن)،  $\mu$  ضریب پواسن (با فرض ۰/۳۵)، t ضخامت نمونه‌ها (میلی‌متر) و  $\delta_h$  کلیه تغییرمکان‌های افقی برگشت‌پذیر است.

است. اگر بار دینامیک وارد شده به نمونه را که سبب تغییرمکان افقی می‌شود P بنامیم، مقدار مدول برجهندگی نمونه‌ها ( $M_R$ ) از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$M_R = \frac{P(\mu+0.27)}{t \times \delta_h} \quad (1)$$



شکل ۳. نتایج آزمایش مدول برجهندگی در دماهای مختلف

قرار دادن نمونه‌ها در معرض شرایط اشباع انجام می‌گیرد. نمونه‌ها به صورت 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 ۷۶۱ قرار گیرد. برای هر جنس مصالح، تعداد ۳ نمونه به صورت عمل‌آوری شده و ۳ نمونه به صورت عمل‌آوری نشده مطابق استاندارد AASHTO T283 تحت آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) بین دونوار فلزی صلب در راستای قطری نمونه‌ها با نرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر 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 رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن P بیشترین نیروی اعمالی جهت شکست نمونه‌ها (کیلونیوتن)، t ضخامت نمونه‌ها (میلی‌متر) و d

### ۲-۳. آزمایش‌های حساسیت رطوبتی

در این مطالعه آزمایشگاهی، جهت بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از روش‌های لاتمن اصلاح شده و آزمایش 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.

### ۱-۲-۳. آزمایش لاتمن اصلاح شده

یکی از معروف‌ترین و متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش لاتمن اصلاح شده<sup>۱</sup> (کشش غیرمستقیم) است. این آزمایش جهت تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های متراکم بعد از

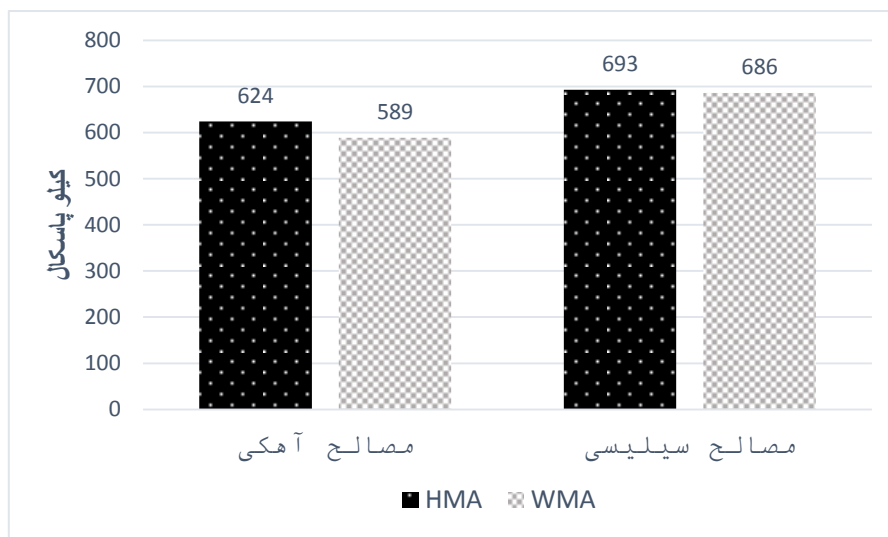
1- Modified Lottman test

تأثیر نوع مصالح بر خواص عملکردی آسفالت نیمه گرم اصلاح شده با زایکوترم

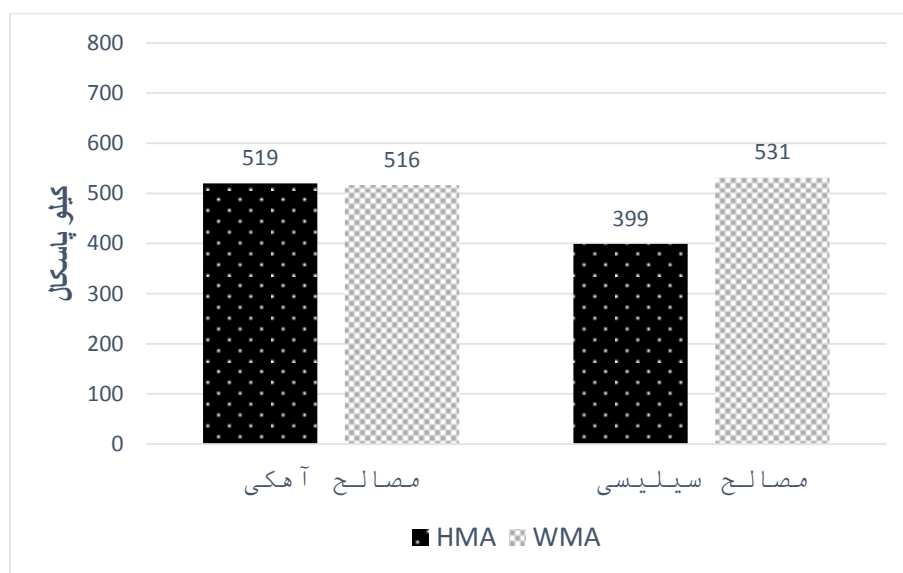
لاتمن (۱۹۷۸) اعلام کرد که مخلوط‌های آسفالتی با مقدار TSR بیشتر از ۷۰٪ عموماً کمتر مستعد آسیب‌های رطوبتی هستند. مقادیر ITS و TSR متناظر به دست آمده برای مصالح سیلیسی و آهکی در شکل‌های ۴ الی ۶ ارائه شده است.

قطر نمونه‌ها (میلی‌متر) بوده و مقدار TSR معمولاً به صورت درصد و به صورت میانگین مقدار ITS نمونه‌های اشباع شده به اشباع نشده به شکل زیر بیان می‌شود:

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

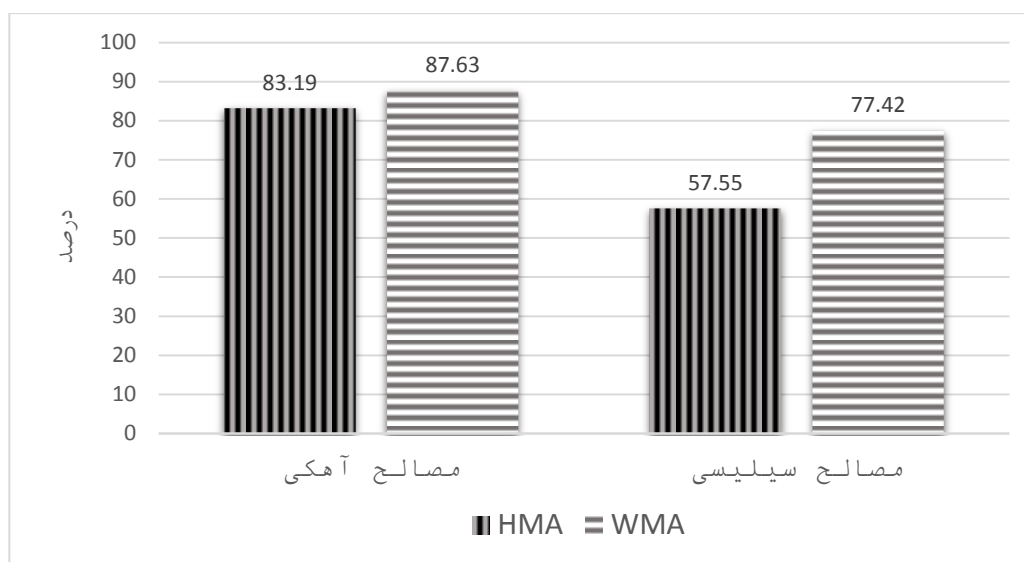


شکل ۴. مقادیر ITS نمونه‌های عمل‌آوری نشده



شکل ۵. مقادیر ITS نمونه‌های عمل‌آوری شده





شکل ۶. مقادیر TSR

متناظر با عدد ۲۵۵ در نرم‌افزار ثبت می‌شوند و سایر پیکسل‌ها با توجه به درجه‌ی روشنایی در این بازه قرار می‌گیرند. عدد ۱۲۸ به عنوان مرز بین مصالح عریان شده و عریان نشده فرض شده و آنالیز عکس نمونه‌های مختلف توسط پردازش تصاویر در این نرم‌افزار دقیقاً بررسی گردید. روند انجام کار و نتایج پردازش تصویر تمامی نمونه‌ها در شکل ۷ و جدول ۵ نشان داده شده است.

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

#### ۴. تحلیل نتایج

##### ۴-۱. تحلیل نتایج 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

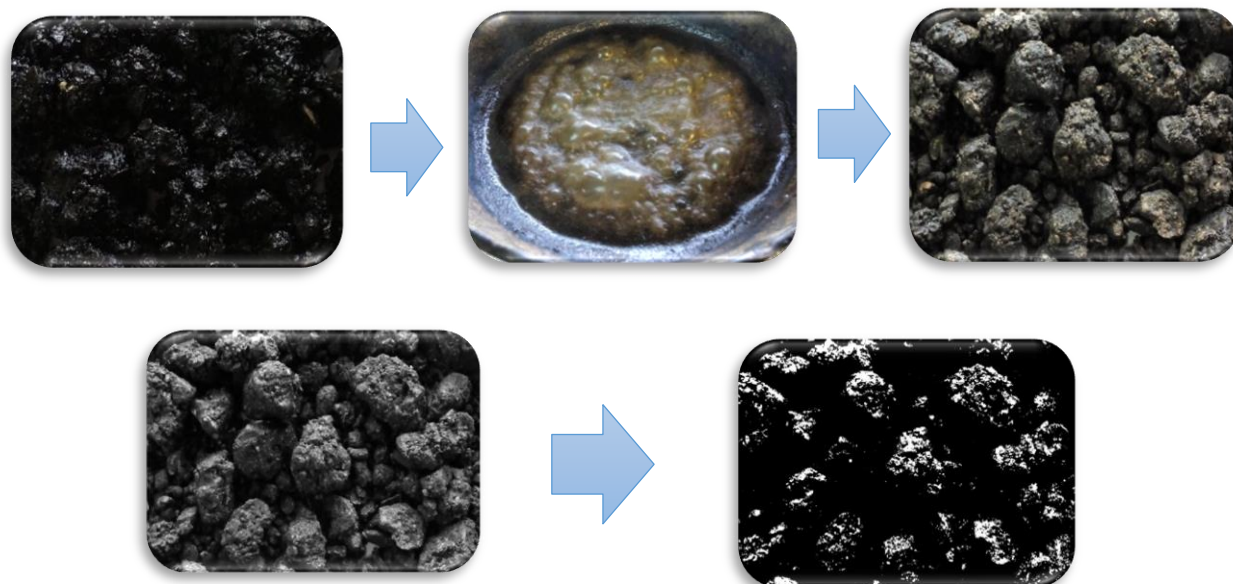
##### ۳-۲. آزمایش آب جوشان

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. در این مطالعه، 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 MATLAB به عکس‌های دیجیتال با پیکسل‌های 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

تأثیر نوع مصالح بر خواص عملکردی آسفالت نیمه‌گرم اصلاح شده با زایکوترم

این بدان معناست که پارامترهای جنس مصالح مصرفی و همچنین دمای آزمایش که هر دو متغیرهای این آزمایش بوده‌اند، تأثیری در روند مذکور ندارند.

(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.



شکل ۷. روند انجام آزمایش آب جوشان و پردازش تصاویر

جدول ۵. نتایج حاصل از پردازش تصاویر شکل ۷

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

دمای مناسبی به نظر نمی‌رسد و می‌بایست دمای بیشتری جایگزین گردد، که این امر می‌تواند ناقص مفهوم آسفالت نیمه‌گرم نیز باشد. البته بدیهی است که اظهار نظر دقیق‌تر مستلزم انجام آزمایش‌ها بیشتری بوده و نویسندگان پیشنهاد می‌کنند جهت نتیجه‌گیری نهایی، آزمایش‌ها در مقیاس وسیع‌تری صورت پذیرد.

آنچه جای بحث دارد علت وقوع این امر است که می‌تواند ناشی از عدم عملکرد مناسب زایکوترم به عنوان یک ماده‌ی تولیدکننده‌ی آسفالت نیمه‌گرم<sup>۱</sup> باشد. در تکمیل آنچه ذکر شد، می‌توان گفت با توجه به پروتکل میکس ارائه شده توسط شرکت سازنده (زایدکس)، دمای اصلاح قیر، که ۱۲۰ درجه سلسیوس پیشنهاد گردیده،

1- Warm-mix agent

#### ۲-۴. تحلیل نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده

اگر نمونه‌های عمل‌آوری نشده را مورد بررسی قرار دهیم، 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 بوده و مقدار ITS نمونه‌های شاهد بزرگتر 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 درصد کاهش، به تقریباً نصف، یعنی ۳۹۹ کیلوپاسکال، می‌رسد. در حالی که مخلوط حاوی افزودنی، کاهش چشمگیری در مقاومت تجربه نکرده است و مقدار آن از

۶۸۶ کیلوپاسکال به ۵۳۱ کیلوپاسکال رسیده است. بر خلاف روند نزولی مشاهده شده در آزمایش مدول برجهنگی و همچنین ITS نمونه‌های عمل‌آوری نشده، می‌توان اظهار داشت که افزودنی زایکوترم تأثیر مثبتی روی 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

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. زایکوترم تأثیر بسیار بیشتری بر مصالح سیلیسی، نسبت به مصالح آهکی، داشته و درصد این تأثیر در جدول ۷ بیان شده است.

جدول ۷. تأثیر زایکوترم بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی

مصالح 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	

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 هیدروژن دار (هیدرید سیلیکون) است که دارای یک زنجیره آلی با تمایل به قیر و یک انتهای قطبی با تمایل به سطح غیر آلی (معدنی) می‌باشد (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 گشته و به فرم سیلوکسان حاوی اجزای آبگریز در می‌آید و به صورت محلول در قیر باقی می‌ماند. در حالی که قسمت غیر آلی با هیدروکسیل سطح سیلیسی سنگدانه‌ها پیوند هیدروژنی برقرار می‌کند. در اثر گرم شدن، این پیوندهای هیدروژنی درهم فشرده شده و یا می‌شکنند و تولید لایه‌ای از پیوند Si - O - Si روی سطح سنگدانه‌ها می‌کنند که بیشتر 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  $(\text{SiOH})_n$ --- $(\text{H}_2\text{O})_n$  می‌دهد (کندال، ۱۹۹۲).

برای درک بهتر پدیده ی 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 (زانپوسکی و ویسواناتان، ۲۰۰۶).

در بررسی این پدیده می‌توان گفت که سنگ‌های سیلیسی دارای کانی‌های کوارتز ( $\text{SiO}_2$ ) بوده و در هنگام حضور آب به علت پیوند هیدروژنی دارای چسبندگی ضعیفی هستند. سنگ‌های آهکی دارای کانی‌های کلسیت ( $\text{CaCO}_3$ ) و همچنین دولومیت ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) بوده، معمولاً دارای چسبندگی خوبی هستند و با قیر پیوندهای قوی الکترواستاتیک برقرار می‌کنند؛ ولی شکننده می‌باشند. مفهوم درجه چسبندگی شیمیایی براساس 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 با هم خواهند داشت. حتی اگر قیر 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<sup>۱</sup> 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 اسیدیته آب برابر ۷ باشد و قیر اسیدیته کمتر از ۷ 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 و یا قلیایی بودن به صورت نسبت جزء اسیدی ( $\text{SiO}_2, \text{CO}_2$ ) به جزء قلیایی (عمدتاً  $\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}, \text{MgO}$  و  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) بیان می‌گردد. سنگدانه‌های سیلیسی داری درصد بالایی از سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) می‌باشند. حال آن که سنگدانه‌های آهکی دارای درصد بالایی از کلسیم کربنات ( $\text{CaCO}_3$ ) می‌باشند. بنابراین، سطوح این سنگدانه‌ها دارای ترکیبات شیمیایی متفاوت بوده و

<sup>1</sup> Hydronium ion

#### ۳-۴. تحلیل نتایج آزمایش آب جوشان

عکس‌های دیجیتال گرفته شده از نمونه‌ها نشان می‌دهند که در حالت کلی، افزودنی زایکوترم سبب کاهش قسمت‌های عمده‌ای از پیکسل‌های سفیدرنگ می‌شود. این بدین معناست که زایکوترم به‌عنوان یک افزودنی ضدعریان‌شدگی 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 (سنگ‌سفیدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ حسامی و همکاران، ۲۰۱۵) بوده و نتایج آنان را تأیید می‌کند.

#### ۵. نتیجه‌گیری

- تحلیل نتایج حاصل از آزمایش مدول برجهندگی نشان می‌دهد که جنس مصالح و دمای آزمایش، تأثیر چشمگیری بر 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. نتیجه‌گیری 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 شاهد کاهش قابل توجه مقاومت کششی غیرمستقیم مصالح سیلیسی نسبت به مصالح آهکی هستیم. در حالی که تفاوت فاحشی بین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی تولید شده

#### ۷. مراجع

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

با مصالح آهکی و سیلیسی در حالت غیراشباع وجود ندارد.

- زایکوترم تأثیر مثبتی روی مقاومت مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم تهیه شده با مصالح سیلیسی در چرخه اشباع دارد و از کاهش چشمگیر مقاومت آن 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 آنها توصیه نمی‌شود.

- نمونه‌های آسفالتی گرم تولید شده با مصالح سیلیسی، به‌دلیل وجود پیوندهای ضعیف هیدروژنی با قیر 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 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 تصاویر نمونه‌های آزمایش آب جوشان نیز مطابقت دارد.

#### ۶. سپاسگزاری

بدین‌وسیله 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 همه‌جانبه اعلام می‌داریم.

- 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.
- DiVito, 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". J. Mater. 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 Amir Khanian, 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.