



## بررسی عوامل تأثیرگذار بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه گرم (WMA)

سعید صبحی<sup>۱\*</sup>، افشار یوسفی<sup>۲</sup>، سعید حسامی<sup>۱</sup>، محمود عامری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران.

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۴-۲۳

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۳۰

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۰۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۳۱

### کلمات کلیدی:

مخلوط آسفالتی WMA

حساسیت رطوبتی

سنگدانه

قیر

دمای تراکم

**خلاصه:** به دنبال افزایش آلاینده‌ها و نگرانی‌های زیست محیطی و همچنین بالا رفتن قیمت سوخت و انرژی، فن آوری آسفالت نیمه گرم (WMA) به‌عنوان یک فن آوری سازگار با محیط زیست معرفی گردید و امروزه نیز گرایش صنعت روسازی به سمت استفاده از آن بیشتر شده است. فن آوری آسفالت WMA علیرغم کاهش دمای تولید و تراکم روسازی آسفالتی و سایر مزیت‌ها نسبت به آسفالت گرم (HMA)، دچار ضعف خرابی رطوبتی می‌باشد که یکی از نگرانی‌های اصلی این فن آوری است و استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در جهت کاهش این خرابی می‌باشد. مخلوط آسفالتی WMA از مصالح مختلف قیر، سنگدانه و مواد افزودنی WMA تشکیل می‌شود و بررسی تأثیر هر یک از این مصالح در کاهش حساسیت رطوبتی کمتر مورد توجه و بررسی قرار گرفته است، لذا در این پژوهش با هدف آگاهی بیشتر مهندسان راه‌سازی در جهت بهبود این معضل در این نوع مخلوط آسفالتی، به بررسی بیشتر عوامل تأثیرگذار در مقاومت رطوبتی مخلوط WMA پرداخته می‌شود. مطالعه‌های انجام شده نشان می‌دهد که نوع سنگدانه (خصوصیات اسیدی یا بازی)، نوع افزودنی WMA و دمای اختلاط و تراکم از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مقاومت مخلوط آسفالتی WMA می‌باشند که به‌طور غیرمستقیم روسازی ساخته شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

### ۱- مقدمه

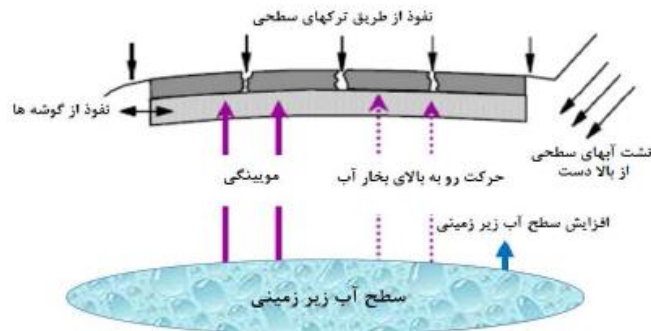
آن فن آوری کف قیر برای کاهش دمای مخلوط آسفالتی مورد توجه کشورهای آمریکا و اروپایی قرار گرفت [۱] مخلوط آسفالتی WMA در مقایسه با مخلوط آسفالتی معمولی مزایا و معایب متفاوتی دارد که مهم‌ترین مزیت این فن آوری نو، کاهش دمای تولید آسفالت به میزان ۲۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و این کاهش دما به عنوان راهکاری مؤثر در کاهش آلودگی هوا به حساب می‌آید. ملاحظات زیست‌محیطی، پیرشدگی کمتر، مصرف انرژی کمتر و افزایش مدت زمان اجرا در طول سال از مزایای این نوع مخلوط آسفالتی می‌باشد و از طرفی هزینه افزودنی‌های ویژه و هزینه اصلاح و تجهیز کارخانه‌های آسفالت و ضعف روسازی در برابر خرابی رطوبتی از معایب آن می‌باشد. حساسیت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت از دغدغه‌های اصلی فن آوری WMA است که در اثر از بین رفتن پیوند قیر و مصالح سنگی

استفاده از مخلوط آسفالتی گرم به علت بالا بودن دمای تراکم و اختلاط مقدار انرژی و سوخت مصرفی را افزایش داده و با انتشار آلاینده‌ها و گازهای سمی، محیط زیست را با خطر جدی روبه‌رو می‌کند. با افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید روسازی مخلوط آسفالتی HMA و افزایش قیمت سوخت و انرژی، گرایش به سمت استفاده از مخلوط‌های آسفالتی WMA بیشتر شده و در سراسر دنیا مقبولیت بیشتری پیدا کرده است. این فن آوری برای اولین بار در سال ۱۹۵۶ توسط لیدیس سانی<sup>۱</sup> در دانشگاه ایالت آیووا به‌صورت کف قیر برای تثبیت خاک مورد استفاده قرار گرفت و بعد از

1 Ladis Csanyi

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: loordsaeid@gmail.com





شکل ۱. راه‌های احتمالی ورود آب به داخل روسازی [۵]

Fig. 1. Possible ways of penetrating water into the pavement

می‌شوند [۴]

عریان شدگی پدیده پیچیده‌ای است که عوامل گوناگونی در آن تأثیر دارد و برخی از این عوامل شناخته شده نیستند، اما برخی از آن‌ها مانند فشار منفذی، جداسازی، جابه‌جایی، امولسیون شدگی و شرایط محیطی به عنوان مکانیزم‌های این پدیده پذیرفته شده‌اند که به طور خلاصه در جدول ۱ بیان شده است.

### ۳- روش‌های اندازه‌گیری خرابی رطوبتی

حساسیت رطوبتی یکی از نگرانی‌های اصلی محققان برای دوام مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد و تلاش‌های بسیاری برای پیدا کردن آزمایش‌های مختلف جهت ارزیابی عریان شدگی انجام شده است. امروزه روش‌های آزمایشگاهی جهت ارزیابی خرابی رطوبتی بر اساس نظرات محققان مختلف به طور کلی به دو دسته مختلف به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند [۹]

• آزمایش‌هایی که بر روی مخلوط آسفالتی متراکم نشده انجام می‌شود و نتایج آن به صورت کیفی، تخمینی و بصری است.

• آزمایش‌هایی که بر روی مخلوط متراکم شده انجام می‌شود و نتایج آن به صورت عددی و دقیق است.

وجود عوامل مختلف در بروز حساسیت رطوبتی موجب توسعه و تنوع آزمایش‌های لازم جهت ارزیابی خرابی رطوبتی شده است. این آزمایش‌ها از طریق مختلف مقاومت رطوبتی را مورد بررسی قرار می‌دهند. طبق تحقیقات انجام شده سال ۱۹۹۱ در بین چندین ایالت برای بررسی پرتکرارترین آزمایش‌ها، نتایج نشان داد که آزمایش لاتمن (NCHRP 246) و آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO)

و یا خرابی در ساختار قیر پدید می‌آید. با نفوذ رطوبت به درون لایه روسازی پیوند قیر و سنگدانه از بین رفته و طی بارگذاری‌ها پی‌درپی، ساختار آسفالت دچار گسیختگی شده و به صورت خرابی‌هایی نظیر شیارشدگی و شن زدگی بروز می‌کند [۲]. علت اصلی این پدیده کاهش دمای اختلاط و تراکم می‌باشد، به طوری که کاهش دما موجب می‌شود آب موجود در سنگدانه به خوبی تبخیر نشده و رطوبت باقی مانده مانع اندود کافی مصالح با قیر می‌شود [۳]. بنابراین باید به دنبال راهکار برای کاهش تأثیر این پارامتر بر روی روسازی آسفالتی بود که استفاده از مواد ضد عریان شدگی یکی از راه‌حل‌های این مشکل در روسازی‌های WMA می‌باشد. خرابی رطوبتی مخلوط آسفالتی در اثر عوامل مختلفی اتفاق می‌افتد که در این پژوهش عوامل مؤثر دیگر از جمله نوع سنگدانه، قیر و انواع مواد افزودنی WMA مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

### ۲- معرفی مکانیزم خرابی رطوبتی

با وجود اینکه چندین عامل به صورت هم‌زمان باعث عریان شدگی آسفالت می‌شود ولی همه محققان به این اتفاق نظر رسیده‌اند که عامل اصلی که باعث ایجاد این پدیده می‌شود، آب است. برای این اتفاق آب به داخل غشای قیر نفوذ می‌کند. برای بررسی دقیق مکانیزم‌های خرابی ناشی از رطوبت، ضروری است که منابع و راه‌های ورود و خروج آن در سیستم روسازی شناسایی شود. با وجود تلاش‌هایی که برای جلوگیری از ورود آب به روسازی صورت می‌گیرد، حضور و نفوذ آب در آن امری اجتناب‌ناپذیر است، زیرا منابع مختلف آب وجود دارند که هرکدام با روش‌های مختلف طبق شکل ۱ وارد ساختار روسازی

جدول ۱. عوامل مختلف بروز عریان شدگی  
Table 1. Different factors occurrence of Stripping

مکانیزم	عوامل مختلف عریان شدگی
فشار منفذی بیش از حد در شرایط زهکشی نشده موجب شکستن لایه قیری دور سنگدانه ها شده و موجب نفوذ آب بین قیر و سنگدانه می شود.	فشار منفذی
لایه نازکی از آب دور سنگدانه را پوشانده و موجب جدایی قیر از سنگدانه می شود (شکل ۲).	جداشدگی
مطابق شکل ۲ به علت عدم پوشش کامل سنگدانه توسط قیر، چسبندگی قیر به مصالح سنگی توسط آب ضعیف شده و قیر از سطح سنگدانه جدا می شود [۶]	جابجایی
وجود عوامل امولسیون ساز مانند نمک و ترکیبات رس در روسازی و چسبندگی قطرات آب و سنگدانه موجب تضعیف چسبندگی داخلی بین قیر و سنگدانه می شود [۷]	امولسیون شدگی



شکل ۲. تفاوت پدیده جا به جایی و جداشدگی [۸]

Fig. 2. The difference between the phenomenon of displacement and detachment

توسط عامری و همکاران از دو آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی جهت بررسی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA استفاده شد و مشاهدات حاکی از آن بود که نتایج آزمایشها مشابه بوده و روندی یکسانی را نشان می دهند و دارای همبستگی مناسبی می باشند [۱۳].

علاوه بر روشهای آزمایش نمونههای متراکم شده، امروزه روشهای انرژی بر پایه نظریه انرژی آزاد سطحی بین قیر و سنگدانه می باشند و بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند در این روش با اندازه گیری انرژی سطحی قیر و سنگدانه و با استفاده از روابط ترمودینامیکی، می توان سازگارترین حالت ترکیب قیر و سنگدانه را در کمترین حساسیت رطوبتی ممکن به دست آورد. در سالهای اخیر از یک فن آوری جدید بنام پخش نوترون (به علت نفوذ بالای نوترون) برای بررسی ساختار استاتیک و خواص دینامیکی میکروسکوپی استفاده شده است. در این تحقیق، هوانگ و همکاران از پخش نوترون برای شناسایی رطوبت در مخلوط آسفالتی WMA ساخته شده با فناوری

(T283) بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و محبوبیت و اعتبار بیشتری نسبت به سایر آزمایشهای تعیین حساسیت رطوبتی دارد که علت این امر می تواند به خاطر شرایط مناسب اعمال شوک رطوبتی و شبیه سازی روند واقعی خرابی رطوبتی در بهترین حالت ممکن بر روی نمونه آزمایشگاهی باشد [۱۰]. در این آزمایشها نسبت مقاومت کششی نمونه اشباع به خشک به عنوان شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) تعریف شده و معیار بررسی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی قرار می گیرد. برخی مطالعه ها برای مقایسه شاخص TSR و سایر روشهای بررسی حساسیت رطوبتی جهت برقراری رابطه بین آزمایشها انجام شده است که نشان می دهد به علت تفاوت ماهیت روش آزمایش، نتایج متفاوت است. به طور مثال، در تحقیقی برای بررسی حساسیت رطوبتی در مخلوط آسفالتی نیمه گرم از دو آزمایش کشش غیرمستقیم و آزمایش ویل ترک استفاده شد و نتایج نشان داد که هیچ گونه همبستگی و ارتباطی بین نتایج دو آزمایش وجود ندارد و هر آزمایش نتایج متفاوتی را نشان می دهد [۱۱، ۱۲]. در تحقیقی

جدول ۲. روش‌های آزمایشگاهی مبنی بر پایه انرژی جهت بررسی حساسیت رطوبتی [۱۵]  
Table 2. Energy-based laboratory methods for investigating moisture sensitivity

دسته‌بندی نوع آزمایش	روش آزمایش	شرح آزمایش
<b>آزمایش‌های بر پایه انرژی روی مخلوط متراکم نشده</b>		
روش‌های مکانیکی، اندازه‌گیری چسبندگی و پیوستگی	تجهیزات آزمایش کشش چسبندگی پنوماتیک (PATTI)	اندازه‌گیری مقدار نیروی مورد نیاز برای از بین بردن چسبندگی بین قیر و سنگدانه در شرایط عدم وجود رطوبت
	آزمایش پیل	اندازه‌گیری انرژی شکست چسبندگی قیر و سنگدانه
مکانیک شکست و شاخص مبتنی بر انرژی	تحلیل گر مکانیکی دینامیکی (DMA)	کرنش کنترل شده یا اعمال تنش پیچشی آزمایشگاهی بر روی مخلوط آسفالتی
آزمایش‌های غیر مکانیکی	صفحه ویلهلمی <sup>۱</sup>	اندازه‌گیری انرژی سطحی قیر
	دستگاه جذب کلی (USD)	اندازه‌گیری انرژی سطحی سنگدانه
	زاویه تماس قطره چسبیده	اندازه‌گیری انرژی سطحی قیر و سنگدانه
روش‌های پیشرفته	رنگ‌نگاری معکوس (IGC)	مشابه آزمایش قبلی
	اولتراسونیک	تخمین چشمی نرخ سطح عریان شده
	طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)	اندازه‌گیری جذب یا دفع آب در لایه‌های نازک قیر/ تعیین شاخص‌های کربونیل و کربوسیلیک اسید
	تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR)	اندازه‌گیری تغییرات در ترکیبات شیمیایی/ تحرک مولکولی مخلوط آسفالتی در اثر رطوبت
	الیسپومتري <sup>۲</sup>	یک روش اپتیکی بسیار حساس برای اندازه‌گیری شاخص انکسار قیر و سنگدانه
	میکروکالری متر	اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی چسبندگی ترکیب قیر و سنگدانه

<sup>1</sup> Wilhelmy Plate

<sup>2</sup> Elipsometry

بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱- قیر

قیر به‌عنوان چسب بین سنگدانه‌ها، یکی از اجزای اصلی مخلوط آسفالتی بوده و نقش مهمی در مقاومت مخلوط‌ها در برابر رطوبت دارد، به‌طوری‌که بررسی رئولوژیکی آن در طراحی بهتر روسازی تأثیر بسزایی دارد. نوع و مقدار قیر مصرفی در بروز حساسیت رطوبتی تأثیرگذار می‌باشد، به‌طوری‌که با افزایش مقدار درصد قیر مصرفی، فضای خالی آسفالت کاهش پیدا کرده و مخلوط آسفالتی نفوذپذیری کمتری پیدا می‌کند. دلیل کاهش نفوذپذیری و افزایش عمر روسازی در این است که مقدار فیلم دور سنگدانه‌ها، لایه‌ای ضخیم‌تر می‌شود و با افزایش این لایه میل به ترک‌خوردگی در آن کاهش می‌یابد [۱۶].

کف قیر استفاده نمود و نتایج مطالعه ثابت کرد که روش پخش نوترون یک روش مؤثر برای بررسی ساختار میکرومخلوط آسفالتی است [۱۴]. علاوه بر روش‌های بیان شده در بالا سایر روش‌های جدید در جدول ۲ به‌طور خلاصه آورده شده است.

#### ۴- تأثیر مصالح در حساسیت رطوبتی

مخلوط آسفالتی از اجزای مختلف سنگدانه، قیر و مواد افزودنی تشکیل می‌شود که هر کدام از این اجزا بر خصوصیات مخلوط آسفالتی تأثیر بسزایی دارد، بنابراین برای بررسی بهتر مخلوط آسفالتی لازم است که تمام خصوصیات شیمیایی و فیزیکی اجزای تشکیل دهنده آن مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق، تأثیر خواص سنگدانه، قیر و مواد افزودنی (افزودنی WMA و مواد ضد عریان شدگی) مورد

#### ۱-۴- خصوصیات شیمیایی قیر

مواد ضد عریان شدگی، مقدار انرژی به مراتب بیشتر می‌شود که این نشان دهنده افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط قیر و سنگدانه می‌باشد.

#### ۲-۱-۴- پیر شدگی قیر

در طی فرآیند پیرشدگی قیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی تغییر کرده و موجب عملکرد مختلف قیر در ساخت مخلوط آسفالتی می‌شود. پیرشدگی موجب سفتی و شکننده شدن قیر می‌شود، از این رو بررسی مقاومت رطوبتی قیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و تاکنون تحقیقات اندکی در این خصوص صورت گرفته است.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که پیرشدگی بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی تأثیر بسزایی دارد و موجب افزایش شاخص TSR می‌شود [۲۲، ۲۳]. در طی مطالعه‌ای، تأثیر پیرشدگی کوتاه مدت بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط WMA حاوی ساسوبیت در دماهای مختلف و در مدت زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که طبق شکل ۳ نتایج نشان داد که مدت زمان پیرشدگی در دمای پایین تأثیر بسزایی در حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی داشته و موجب کاهش خرابی رطوبتی می‌شود و این تأثیر با افزایش دما به مراتب کمتر می‌شود [۲۲]. همچنین کاهش مدت زمان پیرشدگی افزایش حساسیت رطوبتی را در پی دارد [۲۲، ۲۴].

در تحقیق دیگری تأثیر پیرشدگی بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط WMA ساخته شده با انواع افزودنی نیمه گرم و سنگدانه گرانیت مورد بررسی قرار گرفت و طبق شکل ۴ نتایج حاکی از آن بود که همه مخلوط WMA پس از پیرشدگی حساسیت رطوبتی کمتر و عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های پیر نشده دارند و این امر نشان می‌دهد که پیرشدگی تأثیرات مثبتی بر مقاومت رطوبتی مخلوط WMA دارد [۲۳].

در تحقیق دیگری کوکالون Cocalun و همکاران، تأثیر پیرشدگی را بر اساس انرژی چسبندگی قیر اصلاح شده با انواع افزودنی WMA و دو نوع قیر و سنگدانه مورد آزمایش قرار دادند و نتایج نشان داد که در تمام حالت‌های پیرشدگی کوتاه مدت مقدار ضریب انرژی چسبندگی (ER) در تمام نمونه‌ها بجز نمونه اصلاحی با افزودنی ریدست<sup>۱</sup> افزایش می‌یابد که این نشان دهنده افزایش چسبندگی قیر پیر شده و در نتیجه افزایش مقاومت مخلوط WMA در برابر

ساختار قیر پیچیده بوده و ساختار شیمیایی آن به‌طور کامل شناخته شده نیست و ترکیبات شیمیایی قیر و ساختار آن به نفت و فرآیندهایی که جهت تولید آن به کار رفته، بستگی دارد. البته مواد افزودنی نقش بسزایی در تقویت ساختار شیمیایی قیر داشته و موجب رفتار متفاوت قیر می‌شوند، به‌طوری‌که افزودن مواد ضد عریان شدگی در قیر با افزایش گروه‌های قطبی موجب افزایش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در حضور آب می‌شوند [۱۷]. در مورد تأثیر ساختار شیمیایی قیر در بروز خرابی رطوبتی مخلوط WMA مطالعات اندکی انجام شده است. قیر خالص در حالت کلی عموماً دارای خصوصیت اسیدی بوده و سنگدانه بر اساس درصد کانی‌های تشکیل یافته از آن دارای خاصیت بازی و اسیدی می‌باشد. در این میان خصوصیت شیمیایی این دو ماده از لحاظ اسیدی یا بازی بودن در تشکیل پیوند قیر و سنگدانه نقش بسزایی دارد. تحقیقات عربانی و همکاران، حسامی و همکاران و همچنین شفابخش و همکاران نشان می‌دهد که مواد افزودنی WMA به علت ساختار شیمیایی خود موجب افزایش خاصیت اسیدی در قیر می‌شوند و در تشکیل پیوند این نوع قیر با انواع سنگدانه، قیر اصلاحی عملکرد متفاوتی دارد [۱۸-۲۱] که نتایج آزمایش‌ها به‌طور خلاصه در جدول ۳ نمایش داده شده است.

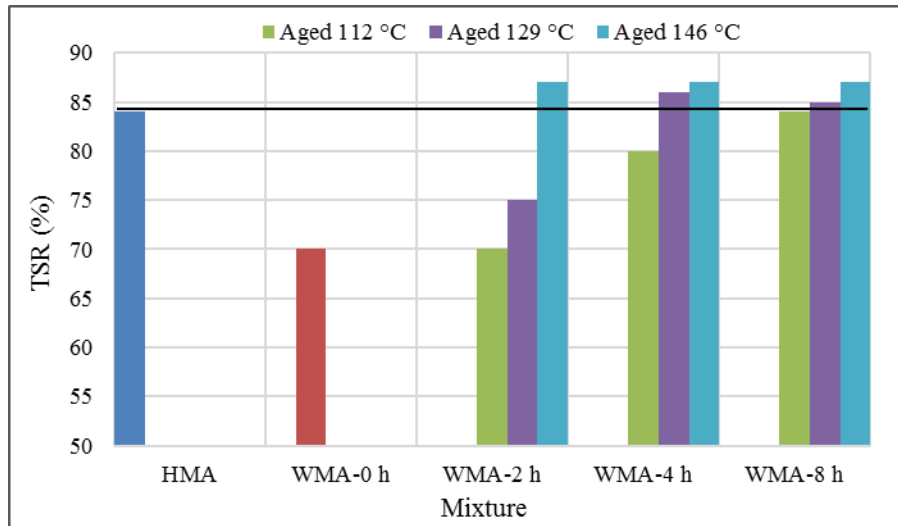
در تحقیق دیگری نتایج قابچی و همکاران نشان داد که افزودن ادورا زئولیت (افزودنی فن آوری کف قیری آب) نیز خصوصیات اسیدی قیر را بطور چشمگیر افزایش داده، بطوریکه مقدار جز اسیدی قیر پایه را از ۱/۲۲ به مقدار ۳/۰۸ افزایش می‌یابد و این امر موجب تشکیل قوی‌ترین پیوند بین قیر اصلاحی و مصالح بازالتی و ضعیف‌ترین پیوند با مصالح گرانیتی شده است [۲۰].

طبق مفاهیم درجه چسبندگی که بر اساس درجه اسیدیته بیان می‌شود، چسبندگی بین یک ماده اسیدی و بازی نسبت به دو ماده اسیدی یا بازی قوی‌تر است، بنابراین می‌توان گفت چسبندگی بین سنگدانه آهکی (خاصیت بازی) و قیر اصلاح شده با افزودنی نیمه گرم (مانند ساسوبیت) نسبت به چسبندگی قیر و سنگدانه‌ای که خاصیت اسیدی دارد (گرانیت)، بهتر می‌باشد و در برابر خرابی رطوبتی نسبتاً مقاومت بالاتری دارد. طبق جدول مشاهده می‌شود که انرژی سطحی قیر و سنگدانه در حالت مرطوب برای سنگدانه‌های آهکی بیشتر از سنگدانه‌های گرانیتی بوده و همچنین با افزودن

جدول ۳. انرژی آزاد چسبندگی و انرژی آزاد سطحی قیر-سنگدانه و مواد افزودنی

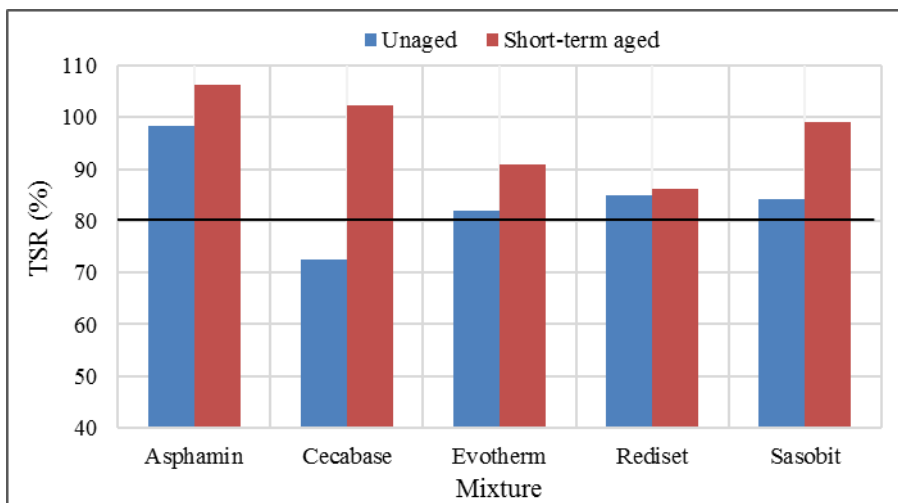
Table 3. Free energy of adhesion and surface free energy of bitumen-aggregates and additives

محققین	نوع سنگدانه	نوع قیر	انرژی آزاد سطحی کل (ergs/cm <sup>2</sup> )	جز اسیدی (ergs/cm <sup>2</sup> )	جز بازی (ergs/cm <sup>2</sup> )	انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه در حضور آب (ergs/cm <sup>2</sup> )
Hesami et al (2013)	آهکی	ساسوبیت + قیر پایه	۱۴/۵۰	۲/۹۶	۰/۵۷	-۱۲۰/۸۲
	گرانیت	ساسوبیت + قیر پایه				-۱۷۷/۸۲
	آهکی	آسفامین + قیر پایه	۱۳/۱۲	۲/۶۷	۰/۵۲	-۱۲۲/۵۶
	گرانیت	آسفامین + قیر پایه				-۱۸۰/۹۴
	آهکی	آهک + ساسوبیت + قیر پایه	-	-	-	-۱۴۴/۹۵
	گرانیت	آهک + ساسوبیت + قیر پایه				-۱۷۰/۴۱
	آهکی	آهک + آسفامین + قیر پایه	-	-	-	-۱۱۶/۵۶
	گرانیت	آهک + آسفامین + قیر پایه				-۱۷۳/۳۶
Arabani et al (2012)	آهکی	ساسوبیت + قیر پایه	۱۴/۵۰	۲/۹۶	۰/۶۷	-۹۱/۹۵
	گرانیت	ساسوبیت + قیر پایه				-۱۷۲/۰۵
	آهکی	آسفامین + قیر پایه	۱۳/۱۲	۲/۶۷	۰/۵۲	-۴۸/۴۷
	گرانیت	آسفامین + قیر پایه				-۱۷۵/۰۴
	آهکی	زایکوسل + ساسوبیت + قیر پایه	۱۵/۷۸	۱/۵۷	۰/۹۳	-۴۷/۵۴
	گرانیت	زایکوسل + ساسوبیت + قیر پایه				-۱۷۰/۷۵
	آهکی	زایکوسل + آسفامین + قیر پایه	۱۴/۵۲	۱/۲۹	۰/۸۲	-۴۶/۹۶
	گرانیت	زایکوسل + آسفامین + قیر پایه				-۱۷۲/۳۴
Shafabakhsh et al (2013)	آهکی	قیر پایه	۲۰/۱۷	۱/۲۳	۰/۱۶	-۶۰/۳۵
	گرانیت	قیر پایه				-۹۲/۵۹
	آهکی	زایکوترم + قیر پایه	۲۸/۰۳	۱/۳۸	۰/۹۴	-۵۸/۴۵
	گرانیت	زایکوترم + قیر پایه				-۹۱/۵



شکل ۳. تأثیرات دما و زمان پیرشدگی بر تغییرات مقاومت رطوبتی آسفالتی [۲۲].

Fig. 3. Effects of temperature and aging time on changes in asphalt moisture resistance



شکل ۴. تأثیر پیرشدگی بر مقاومت رطوبتی انواع مخلوط آسفالتی WMA [۲۳].

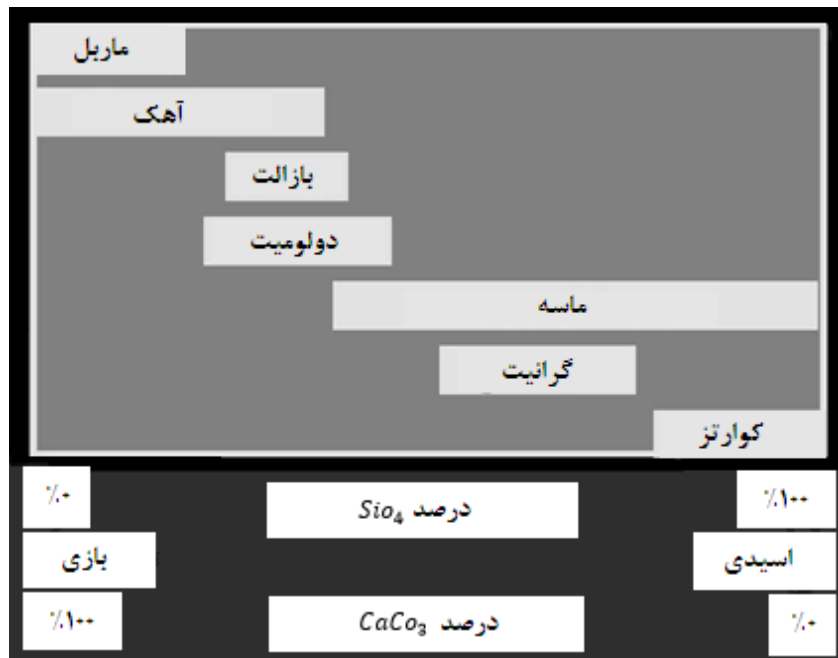
Fig. 4. Effect of aging on the TSR values of different WMA mixtures

تشکیل مخلوط آسفالتی می شود [۲۶]. با بررسی دقیق در مورد اجزای تشکیل دهنده و خواص مصالح سنگی می توان به این نتیجه رسید که نوع سطح سنگدانه در چسبندگی قیر تأثیر بسزایی دارد و این خواص شامل مشخصات کانی تشکیل دهنده مصالح سنگی، زبری و رطوبت سطح می باشد. طبق مطالعات انجام شده، توجه به نوع سنگدانه و نوع ساختار آن بیشتر از نوع قیر مورد توجه قرار گرفته است که این مسأله اهمیت خواص سنگدانه در چسبندگی با قیر و استحکام مخلوط آسفالتی را در بروز خرابی های رطوبتی نشان

حساسیت رطوبتی می باشد [۲۵]. با توجه به نتایج مختلف مطالعات می توان گفت پیرشدگی قیر که با تغییر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی همراه است، با توجه به نوع سنگدانه و نوع افزودنی WMA پتانسیل کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط WMA را دارد.

#### ۴-۲- سنگدانه

مصالح سنگی نقش اسکلت بندی مخلوط را جهت انتقال بار ایفا کرده و سطحی را برای چسبیدن قیر ایجاد می کند که موجب



شکل ۵. ترکیبات سنگدانه‌های مختلف از نظر خاصیت باز-اسید [۲۹].  
 Fig. 5. Composites of various aggregates in terms of alkali-acid properties

به‌راحتی واکنش داده و چسبندگی و پیوند قوی‌تری دارند، بنابراین می‌توان گفت که هرچه سنگدانه‌ها به سمت سنگدانه‌های آهکی متمایل باشند آب‌گریز (قیردوست) بوده و واکنش بهتری با قیر دارند و دارای پیوند قوی‌تری می‌باشند و برعکس هر چه سنگدانه‌ها به سمت سنگدانه‌های سیلیسی متمایل باشند آب‌دوست (قیرگریز) بوده و پیوند ضعیفی با قیر تشکیل می‌دهند و در نتیجه در برابر آب پیوند این نوع سنگدانه‌ها زودتر گسیخته شده و دچار خرابی عریان‌شدگی می‌شوند [۲۸].

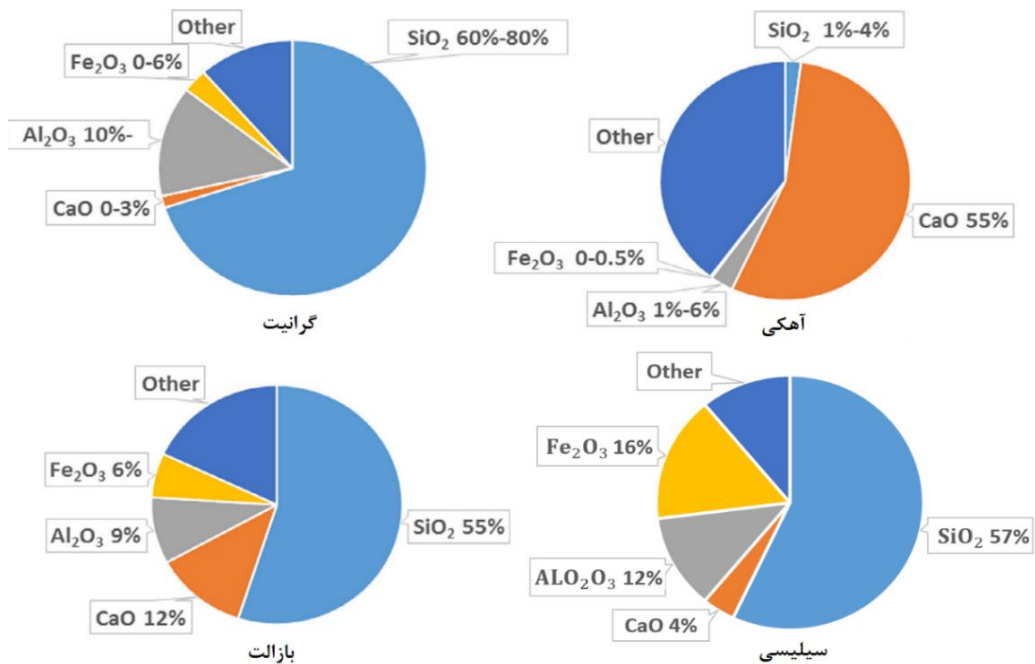
شکل ۶ خلاصه‌ای از ترکیبات شیمیایی اجزای تشکیل‌دهنده چهار سنگدانه پرکاربرد مورد استفاده در آزمایش‌های محققان را نشان می‌دهد. طبق شکل مشاهده می‌شود که سنگ گرانیت و بازالت دارای درصد بالایی ترکیبات سیلیکا ( $SiO_2$ ) و سنگدانه آهکی دارای بیشترین درصد اکسید کلسیم (CaO) می‌باشد. در تحقیق عربانی و همچنین تحقیق بوراک نتایج نشان داد که سنگدانه‌هایی که خصوصیات بازی در سطح خود دارند (آهکی) نسبت به سنگدانه‌های اسیدی (بازالت و گرانیت) دارای پیوند قوی قیر و سنگدانه بوده و در برابر خرابی رطوبتی در مخلوط آسفالتی نیمه گرم مقاومت رطوبتی بالایی دارند [۱۹، ۳۰].

می‌دهد [۲۷]. در ادامه برای نشان دادن تأثیر سنگدانه در مقاومت مخلوط آسفالتی، به بررسی نوع سنگدانه و دانه‌بندی مصالح سنگی پرداخته می‌شود.

#### ۱-۲-۴- نوع سنگدانه

سنگدانه‌ها دارای خاصیت شیمیایی مختلفی هستند که این خصوصیات موجب عملکرد مختلف مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت می‌شود. مصالح سنگی با توجه به منبع استخراج آن‌ها و همچنین کانی‌های تشکیل‌دهنده بیشتر از جنس سیلیس و یا آهک می‌باشند. سنگدانه‌هایی که بیشتر سیلیسی هستند سطحشان دارای خاصیت اسیدی بوده به مصالح آب‌دوست معروف می‌باشند و همچنین سنگدانه‌هایی که خاصیت آهکی دارند سطحشان بازی بوده و به مصالح آب‌گریز معروف هستند. شکل ۵ خاصیت سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سنگدانه‌هایی که خاصیت اسیدی دارند دارای مقدار قابل توجه سیلیکا ( $SiO_2$ ) در ساختار خود می‌باشند و هرچه مصالح دارای مقدار زیاد کلسیم کربنات ( $CaCO_3$ ) می‌باشند مصالح عمدتاً از نوع آهکی می‌باشد. قیر عموماً دارای خاصیت اسیدی می‌باشند، بنابراین در ترکیب با سنگدانه‌هایی که سطحی بازی دارند،





شکل ۶. ترکیبات شیمیایی سنگدانه‌های مختلف [۳۱].

Fig. 6. Chemical compositions of different aggregates

می‌باشد و در نتیجه مقاومت رطوبتی بهتری دارد [۳۲]. در تحقیقی توسط کانیتپانگ Kanitpong و همکاران، نتایج آزمایش‌ها نشان داد مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده (ترکیب سنگدانه گرانیتی و سرباره) با دانه‌بندی ریزتر عملکرد بهتری داشته و به علت فضای خالی کمتر نفوذ ناپذیر بوده و مقدار نفوذ آب در آن‌ها کمتر می‌باشد که این نتیجه با نتایج سفید سنگی و همکاران متفاوت می‌باشد [۳۳]. در حالت کلی می‌توان گفت با توجه به ساختار متفاوت سنگدانه، نوع سنگدانه، میزان درصد شکستگی سنگدانه و سایر پارامترها، روال مشخصی در تعیین مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی بر اساس نوع دانه‌بندی وجود ندارد و نیازمند بررسی بیشتر با در نظر گرفتن پارامترهای بیشتری از جمله بار سطحی سنگدانه، نوع قیر مصرفی و نحوه ساخت مخلوط آسفالتی می‌باشد.

### ۴-۳-۴- تأثیر مصالح بازیافتی در حساسیت رطوبتی

#### ۴-۳-۱- خرده آسفالت بازیافتی<sup>۱</sup>

در سال‌های اخیر فن آوری WMA به‌منظور کاهش هزینه ساخت روسازی و حفظ هرچه بیشتر محیط زیست، از خرده آسفالت بازیافتی

### ۴-۲-۲- دانه‌بندی مصالح سنگی

با توجه به اینکه حجم بالایی از مخلوط آسفالتی از مصالح سنگی تشکیل می‌شود، علاوه بر نوع سنگدانه عوامل دیگری همچون میزان قفل و بست سنگدانه، زبری سطح، شکل سنگدانه و به‌طور خلاصه نحوه دانه‌بندی مصالح سنگی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در استحکام و مقاومت مخلوط آسفالتی می‌باشد [۳۱]. نوع ساختار دانه‌بندی در مخلوط آسفالتی یکی از پارامترهای مهم در طرح اختلاط روسازی می‌باشد که تحت عنوان دانه‌بندی بیان می‌شود. در مطالعه‌ای توسط سفید سنگی و همکاران، تأثیر دانه‌بندی بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از سه نوع دانه‌بندی نزدیک به دانه‌بندی شماره ۴ (حد بالا، پایین و حد متوسط) مطابق آیین‌نامه نشریه ۲۳۴ استفاده شد و نتایج نشان داد که دانه‌بندی نزدیک حد بالا (ریزدانه‌تر) به خاطر سطح مخصوص بالا و ضخامت کم قیر بر روی سنگدانه‌ها حداقل مقدار آیین‌نامه را برآورده نکرده و جزوه دانه‌بندی حساس در برابر رطوبت می‌باشد و همچنین دانه‌بندی نزدیک حد پایین (درشت‌دانه‌تر) دارای ضخامت غشای قیر بیشتری بر روی سطح مصالح بوده و قفل و بست سنگدانه‌ها در این دانه‌بندی بیشتر

جدول ۴. تأثیر RAP بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA  
Table 4. Effect of RAP on moisture resistance of WMA mixtures

نتیجه آزمایش	درصد RAP مورد استفاده	نوع افزودنی WMA	محققین
کاهش TSR	۰٪، ۴۰٪	Sasobit	Moghadas nejad et al (2013)
افزایش TSR	۰٪، ۱۵٪، ۴۵٪	Zeolite, F-T wax	Hill et al (2013)
افزایش TSR	۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪	Foamed WMA	Shu et al (2012)
افزایش TSR	۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪	Evotherm, Foamed WMA	Zhao et al (2013)
تأثیر ناچیز	۰٪، ۲۵٪، ۴۰٪	Sonne warm mix	Mogawer et al (2013)
کاهش TSR	۰٪، ۴۰٪	Evotherm, Chemical additive	Guo et al (2014)
تأثیر ناچیز	۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪	Sasobit	Doyle et al (2013)
کاهش TSR	۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪	Evotherm	Lu et al (2016)
افزایش TSR	۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۰٪	Sasobit	Ayazi et al (2017)
افزایش TSR	۰٪، ۲۰٪، ۴۰٪	Sasobit	Fakhri and Ahmadi (2017)

رطوبتی مخلوط آسفالتی دارد [۴۴، ۴۵]. در حالت کلی می‌توان گفت، درصد استفاده از RAP، نوع افزودنی WMA، دمای اختلاط و تراکم و نوع سنگدانه مورد استفاده از جمله مواردی هستند که در مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی ساخته شده با RAP تأثیر بسزایی داشته و موجب عملکرد متفاوت RAP بر روی حساسیت مخلوط آسفالتی WMA می‌شوند. بنابراین توصیه می‌شود برای بررسی دقیق‌تر از روش‌های انرژی آزاد سطحی و انرژی چسبندگی استفاده شود.

#### ۲-۳-۴- انواع سرباره<sup>۱</sup>

سرباره فولاد و مس به‌عنوان ضایعات کارخانه‌های فولاد و مس یکی از مواد بازیافتی هستند که امروزه در صنعت روسازی به‌عنوان سنگدانه روسازی و یا بخشی از آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرباره فولاد بجا مانده از کارخانه‌های فولاد بر اساس نوع فن آوری مورد استفاده، عموماً به دو صورت سرباره فولادی حاصل از کوره اکسیژنی (BOF)<sup>۲</sup> و سرباره حاصل از کوره قوس الکتریکی (EAF)<sup>۳</sup> استفاده می‌شوند. سرباره فولاد به‌عنوان محصول جانبی کارخانه فولاد با توجه مقاومت و سختی بالا، درصد شکستگی بالا و وزن مخصوص بالا

(RAP) به عنوان یک روسازی جدید استفاده کرده و در این راستا مطالعات گسترده‌ای در رابطه با تأثیر استفاده از RAP در روسازی WMA انجام شده است [۳۴، ۳۵]. مطالعات نشان می‌دهد استفاده از RAP موجب ارتقای عملکرد روسازی شده و کاهش خرابی متداول روسازی WMA را به دنبال دارد. مطالعات گسترده‌ای در مورد تأثیر RAP در حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA انجام شده است و نتایج مطالعات، عملکرد مختلف RAP بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد که خلاصه‌ای نتایج در جدول ۴ آورده شده است. نتایج مطالعات برخی از محققان نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن نوع افزودنی WMA، افزودن RAP تأثیر مثبتی بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط داشته و با افزایش مقدار درصد RAP این تأثیر افزایش می‌یابد که علت این امر می‌تواند به دلیل تشکیل پیوند قوی بین قیر پیر شده و سنگدانه باشد [۳۶-۴۰]. برخی نتایج نیز نشان می‌دهد بکار بردن RAP در مخلوط آسفالتی و افزایش درصد آن به دلیل افزایش ویسکوزیته قیر می‌تواند تأثیر منفی بر مقاومت رطوبتی داشته و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را تشدید می‌کند [۴۱-۴۳]. علاوه نتایج ذکر شده، نتایج تحقیق دوپلی Doyle و همکاران و همچنین تحقیق موگاور Mogawer و همکاران نشان می‌دهد که استفاده از RAP تأثیر ناچیزی بر روی حساسیت

1 Slag  
2 Basic Oxygen Furnace  
3 Electric Arc Furnace

جدول ۵. تأثیر سرباره بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA  
Table 5. Effect of Slag on moisture resistance of WMA mixtures

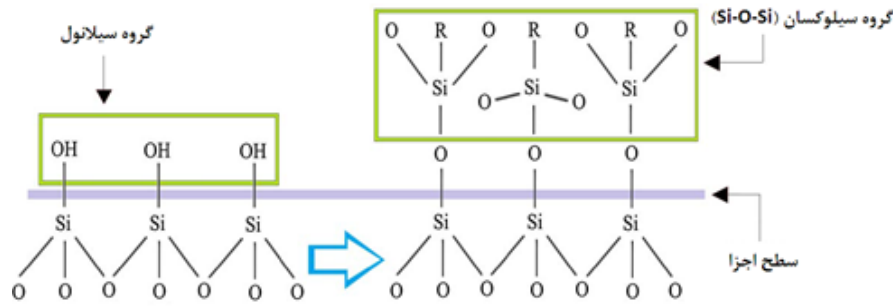
محققین	نوع سنگدانه مورد استفاده	نوع افزودنی WMA	آزمایش TSR	
			مقدار	تأثیر
Amelian et al (2018)	آهکی	ساسوبیت	۸۷	افزایش
	سرباره فولادی (BOF) (درشت‌دانه)		۸۹	
Fakhri and Ahmadi (2017)	آهکی	ساسوبیت	۸۰	افزایش
	سرباره فولادی (EAF) (درشت‌دانه)		۸۲/۵	
Masoudi et al (2017)	آهکی	ساسوبیت	۸۵/۱	افزایش
	سرباره فولادی (EAF) (درشت‌دانه)		۹۰/۷	
Hesami et al (2015)	آهکی	ساسوبیت	۹۵	افزایش
	سرباره فولادی (EAF) (درشت‌دانه)		۹۶	
	آهکی	ردیست	۹۵	افزایش
	سرباره فولادی (EAF) (درشت‌دانه)		۹۷	
Tafti et al (2016)	آهکی	ساسوبیت	۸۴/۳	کاهش
	سرباره فولادی (EAF) (کل دانه‌بندی)		۸۰/۵	
	آهکی	ژئولیت	۹۰/۷	کاهش
	سرباره فولادی (EAF) (کل دانه‌بندی)		۸۴	

می‌باشد که در پی ضعف پیوند بین قیر و سنگدانه در حضور آب و شکستن این پیوند رخ می‌دهد. یکی از راه‌حل‌های رفع این مشکل استفاده از مواد افزودنی ضد عریان شدگی جهت تغییر ویژگی‌های سطح سنگدانه و سازگاری و بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه می‌باشد. در این میان استفاده از مواد ضد عریان شدگی مایع و مواد افزودنی آهک هیدراته و پلیمر سه ماده پرکاربرد برای جلوگیری از عریان شدگی می‌باشند. در حالت کلی برای بهبود چسبندگی قیر و سنگدانه و کاهش حساسیت رطوبتی می‌توان از دو رویکرد مختلف بهره برد که با توجه به رویکرد اول می‌توان سطح سنگدانه را با استفاده از یک عامل مناسب مانند اضافه کردن آهک هیدراته به سنگدانه که موجب کاهش انرژی سطحی سنگدانه می‌شود، کامل پوشاند. در رویکرد دوم می‌توان با اضافه کردن مواد ضد عریان شدگی مایع به قیر، انرژی سطحی قیر را کاهش داده و با ایجاد بار الکتریکی مخالف سنگدانه موجب بهبود پیوند بین قیر و سنگدانه شد [۵۲]. در ادامه به تأثیر برخی از مواد ضد عریان شدگی بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA اشاره می‌شود.

می‌تواند به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار بگیرد و در این خصوص نیز مطالعات گسترده‌ای انجام شده و نتایج نشان دهنده اثرات مثبت آن در بهبود برخی خرابی‌های رایج در مخلوط آسفالتی می‌باشد [۴۶]. مطالعات محققان در رابطه با حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد که استفاده از سرباره فولادی به‌عنوان بخش درشت‌دانه سنگدانه‌های آهکی توانایی کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA را دارد ولی استفاده از آن به‌عنوان کل سنگدانه مخلوط آسفالتی موجب افزایش خرابی رطوبتی می‌شود [۳۶، ۴۷-۵۰]. خلاصه نتایج مطالعات در جدول ۵ آورده شده است. در تحقیقی توسط زیاری و همکاران از سرباره مس با درصد‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ به عنوان جایگزین درشت‌دانه در مخلوط آسفالتی WMA استفاده شد و نتایج نشان داد با افزایش درصد سرباره مس به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه، مقدار پارامتر TSR افزایش می‌یابد [۵۱].

#### ۴-۴- تأثیر مواد افزودنی ضد عریان شدگی

خرابی رطوبتی از عمده خرابی‌های مخلوط آسفالتی WMA



شکل ۷. اضافه کردن زایکوترم و تشکیل پیوند کووالانسی بین سنگدانه و ماده ضد عریان شدگی [۱۹].

Fig. 7. Adding of Zycotherm and formation of a covalent bond between the aggregate and the anti-stripping agent

#### ۱-۴-۴- گیسونایت

گیسونایت (قیر طبیعی) به عنوان یک ماده معدنی اثر قابل توجهی بر روی خصوصیات رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA دارد. تاکنون تحقیقات اندکی بر روی خواص این ماده انجام شده و متأسفانه جایگاه مناسبی در بین سایر افزودنی‌ها ندارد. این ماده با ارزش با توجه به خواص شیمیایی عمدتاً به عنوان سفت کننده قیر شناخته شده و باعث افزایش مقاومت روسازی در برابر بارهای ترافیکی شدید می‌شود. وجود آسفالتن قابل ملاحظه و همچنین اجزای تشکیل دهنده نیتروژن در گیسونایت موجب شده که این ماده چسبندگی قوی بین قیر و سنگدانه تشکیل دهد. در پژوهش صبحی و حسامی درصدهای مختلف این افزودنی به مخلوط آسفالتی WMA افزوده شد و نتایج نشان داد که این ماده به علت افزایش ویسکوزیته، داشتن ترکیبات کلسیت و دولومیت در خود و همچنین درصد بالای آسفالتن، چسبندگی خیلی خوبی با سنگدانه های سیلیسی داشته و موجب بهبود پیوند قیر-سنگدانه و کاهش قابل توجه خرابی رطوبتی در مخلوط‌های WMA می‌شود [۴]. در تحقیقات اکبری و همکاران این ماده افزودنی در مخلوط آسفالتی HMA در دو نوع سنگدانه مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج آزمایش حاکی از آن بود که این افزودنی با افزایش قابل توجه شاخص حساسیت رطوبتی، پتانسیل استفاده در مناطق مرطوب و بارانی را دارد [۵۳].

#### ۲-۴-۴- آهک

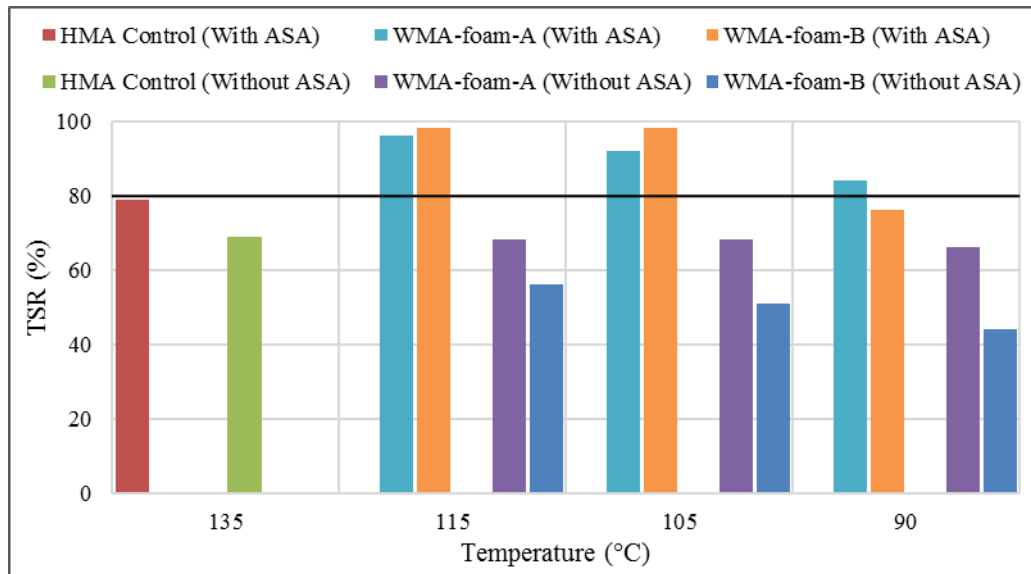
تحقیقات زیادی در مورد تأثیر آهک بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی انجام شده است که نشان می‌دهد آهک به عنوان یک ماده ضد عریان شدگی خصوصیات مکانیکی مخلوط را تغییر

داده و موجب افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود. در تحقیق خدایی و همکاران تأثیر آهک هیدراته بر روی مخلوط آسفالت WMA مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که افزودن آهک هیدراته موجب کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی شده و با افزایش درصد این ماده خرابی رطوبتی بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۲]. در تحقیق دیگری تأثیر اندازه ذرات آهک هیدراته در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA در دو اندازه ی معمولی و نانو مورد آزمایش قرار گرفت. طبق این تحقیق مشاهده شد که ذرات با اندازه ی ریزتر نسبت به آهک هیدراته معمولی به دلیل سطح نرم‌تر، تأثیر قابل توجهی در کاهش رطوبت داشته و موجب بهبود ۱۰ درصدی شاخص حساسیت رطوبتی می‌شود [۵۴، ۵۵].

#### ۳-۴-۴- زایکوترم و زایکوسل

زایکوترم به عنوان یک ماده افزودنی نانوفن آوری سیلان به دلیل ایجاد پیوند شیمیایی قوی بین قیر و سنگدانه موجب بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود. عملکرد این ماده ضد عریان شدگی بر اساس دو فاز آلی و معدنی می‌باشد که از طریق تشکیل پیوند کووالانسی بین قیر و سنگدانه ارتباط برقرار می‌کند. بخش آلی این ماده در هنگام اختلاط با قیر در دمای بالا در قیر حل شده و بخش معدنی آن به کمک مولکول  $H_2O$  که در اثر شکستن پیوند هیدروژنی در سطح سنگدانه ها به وجود می‌آید، تشکیل پیوند کووالانسی Si-O-Si در سطح سنگدانه داده و مطابق شکل ۷ سطح آب‌گریز در سطح به وجود آورده و بدین ترتیب از عریان شدگی مخلوط آسفالتی جلوگیری می‌کند [۵۶].

در تحقیقی توسط عامری و همکاران تأثیر دو ماده ضد عریان



شکل ۸. تأثیر دمای اختلاط و تراکم بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی [۵۹].

Fig. 8. Effect of compaction and mixing temperature on moisture sensitivity of asphalt mixtures

## ۵- عوامل مؤثر در ساخت مخلوط آسفالتی

### ۵-۱- دمای تراکم و اختلاط مخلوط آسفالتی

دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی WMA عامل اصلی و کلیدی در میزان تراکم مخلوط و میزان پوشش قیر و سنگدانه می‌باشد که ارتباط مستقیمی با مقاومت رطوبتی مخلوط ساخته شده دارد. عمل تراکم مناسب باعث کاهش فضای خالی نفوذپذیری مخلوط آسفالتی و در نتیجه افزایش مقاومت مخلوط در برابر خرابی رطوبتی می‌شود [۵۸، ۵۹]. با توجه به نوع افزودنی WMA و نحوه عملکرد هرکدام از آنها، میزان کاهش دمای تراکم متفاوت بوده و مخلوط ساخته شده در کنار سایر عوامل مؤثر در ساخت از جمله وجود رطوبت در سنگدانه عملکرد متفاوتی را نشان می‌دهد. در تحقیق کاووسی و هاشمی از دو نوع افزودنی کف قیر برای ساخت مخلوط WMA در سه دمای مختلف استفاده شد و مطابق شکل ۸ نتایج نشان داد با کاهش دمای تراکم میزان حساسیت مخلوط به رطوبت افزایش می‌یابد. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که دمای اختلاط و تراکم در کنار سایر عوامل بیان شده از مهم‌ترین پارامترها در تعیین مقدار مقاومت مخلوط در برابر رطوبت می‌باشد، بنابراین در انتخاب دما باید سایر عوامل (احتمال وجود رطوبتی در سنگدانه) نیز در نظر گرفته شود.

شدگی زایکوترم و ایوانیک در مخلوط آسفالتی نیمه گرم مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج آزمایش نشان دهنده تأثیر چشمگیر این دو ماده افزودنی در بهبود خرابی رطوبتی بود [۵۷]. در تحقیق دیگر نقش زایکوترم در خرابی رطوبتی در مخلوط آسفالتی نیمه گرم با دو نوع سنگدانه و دو دانه‌بندی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، نوع سنگدانه نسبت به نوع دانه‌بندی تأثیر بیشتری در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ماده افزودنی زایکوترم نشان داد. همچنین تأثیر زایکوترم در بهبود خصوصیات مقاومتی مخلوط آسفالتی در مصالح سنگی آهکی به علت ساختاری آن (وجود درصد بالای کلسیت و آب‌گریز بودن مصالح) بیشتر از سنگدانه نوع دیگر بود [۵۶]. در تحقیق دیگری از عامری و همکاران در سال ۲۰۱۳ حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA توسط افزودنی ضد عربان شدگی زایکوسل و آهک هیدراته مورد پژوهش قرار گرفت. در این تحقیق از دو نوع سنگدانه آهکی و سیلیسی استفاده شد که نتایج نشان داد در مخلوط آسفالتی ساخته شده با سنگدانه سیلیسی ماده افزودنی زایکوسل تأثیر بیشتری نسبت به آهک دارد، ولی در مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی نتیجه برعکس بوده و آهک هیدراته نسبت به زایکوسل مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی را بیشتر افزایش داد [۱۳].

جدول ۶. دمای اختلاط و تراکم انواع افزودنی نیمه گرم [۱].

Table 6. Mixing and compaction temperatures of WMA additives

نوع فن آوری تولید	افزودنی	دمای اختلاط (°C)	دمای تراکم (°C)
افزودنی آلی (واکسی)	ساسوبیت	۹۳-۱۳۸	۶۶-۱۲۱
	واکس مونتان (لیگنیت)	۱۲۵-۱۳۰	۱۰۵-۱۲۰
افزودنی شیمیایی	اووترم	۸۲-۱۲۱	۷۱-۱۱۶
	ردیست	۱۲۹	۱۰۷
	رویكس	۱۱۸-۱۲۹	۹۶-۱۰۷
افزودنی کف قیری	آسفامین (حاوی آب)	۱۳۵-۱۴۰	۱۰۰<
	ادورا (حاوی آب)	۱۳۵-۱۴۰	۱۰۰<
	ژئولیت (حاوی آب)	۱۳۵	۱۰۰<
	دوبل بارل گرین (روش پایه آب)	۱۲۱-۱۳۵	۱۱۳

### ۲-۵- نوع فن آوری ساخت مخلوط آسفالتی نیمه گرم (WMA)

امروزه استفاده از فن آوری آسفالت نیمه گرم روندی رو به رشد داشته که به دنبال آن، طیف وسیعی از روش‌های تولید آسفالت نیمه گرم در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. روش تولید این فن آوری در حالت کلی در یکی از سه گروه زیر که در جدول ۶ آورده است قرار می‌گیرد:

انتخاب نوع افزودنی در فن آوری آسفالت نیمه گرم به عوامل مختلفی بستگی دارد که یکی از عوامل مقدار مخلوط تولیدی با توجه به قیمت افزودنی می‌باشد. با توجه به اینکه میزان کاهش دمای تمام افزودنی‌ها مطابق جدول ۶ یکسان نمی‌باشد، عامل دیگر انتخاب نوع افزودنی، میزان کاهش درجه حرارت مورد نیاز در تولید روسازی می‌باشد [۱].

فرآیند استفاده از افزودنی‌های آلی به این صورت است که در دمای بالاتر از نقطه ذوب افزودنی موجب کاهش ویسکوزیته شده و دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد. فرآیند افزودنی کف قیر نیز به این صورت است که با تبدیل مایع به بخار باعث افزایش حجم قیر شده و در نتیجه ویسکوزیته قیر را کاهش می‌دهد و فرآیند افزودنی شیمیایی به نوع افزودنی بستگی دارد [۱]. در ادامه بحث به بررسی خصوصیات و تأثیر مواد افزودنی نیمه گرم متداول و پر مصرف بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه گرم پرداخته می‌شود.

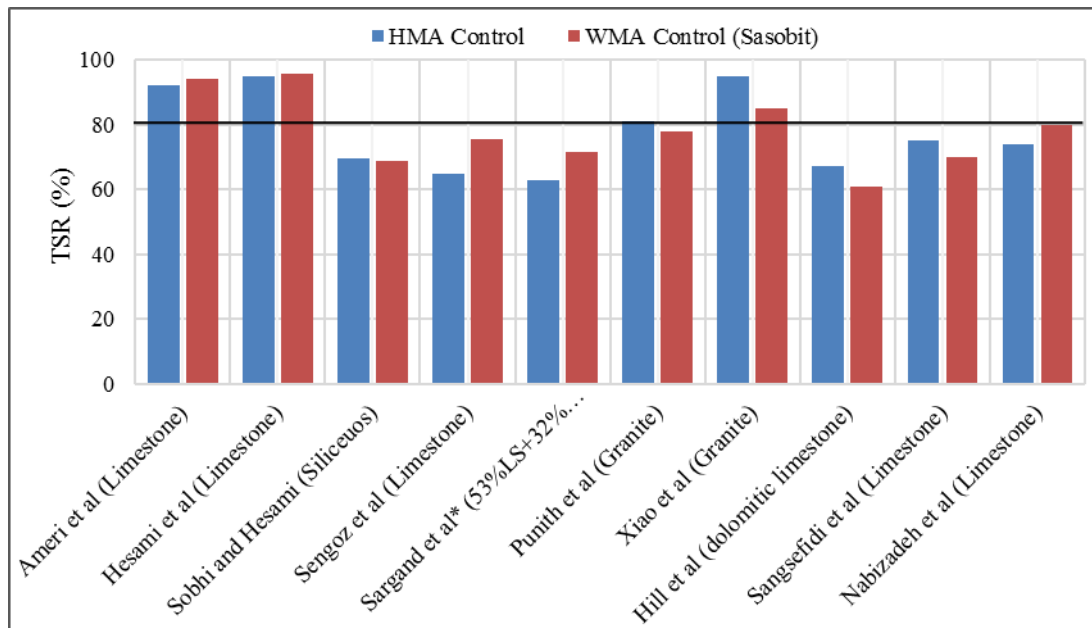
### ۱-۲-۵- افزودنی‌های آلی (واکسی)

افزودنی‌های آلی در دمای بالای نقطه ذوب خود موجب کاهش ویسکوزیته شده و در نتیجه کاهش دمای تراکم و اختلاط مخلوط آسفالتی را به دنبال دارند [۶۰]. این افزودنی‌ها عمدتاً زنجیره هیدروکربنی بلندی دارند و دمای ذوب آن‌ها متناسب با طول زنجیره کربن حدود ۸۰-۱۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این افزودنی‌ها متناسب با نوع واکس شامل سه نوع، ساسوبیت، اسیدهای چرب آمید و واکس مونتان (واکس لیگنیت) می‌باشد.

#### • ساسوبیت

ساسوبیت به عنوان افزودنی نیمه گرم دارای زنجیره طولانی هیدروکربن آلفاتیکی (۱۱۵-۴۰ اتم کربن) می‌باشد که از تبدیل زغال سنگ به گاز طی فرآیند عمل‌آوری کک از طریق دمیدن بخار به روش فیسپر- تراپسچ حاصل می‌گردد. دمای نقطه ذوب ساسوبیت در حدود ۷۰-۱۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و در دمای بالاتر از نقطه ذوب با کاهش ویسکوزیته، دمای تراکم و اختلاط را حدود ۵۴-۱۸ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد. همچنین در دماهای زیر نقطه ذوب خود، این ماده ساختار شبکه بلوری در قیر پدید آورده و موجب پایداری بیشتر و افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود [۶۱].

تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با تأثیر ساسوبیت بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی انجام شده است که نشان می‌دهد این



شکل ۹. تأثیر ساسوبیت بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی  
 Fig. 9. Effect of Sasobit on moisture sensitivity of asphalt mixtures

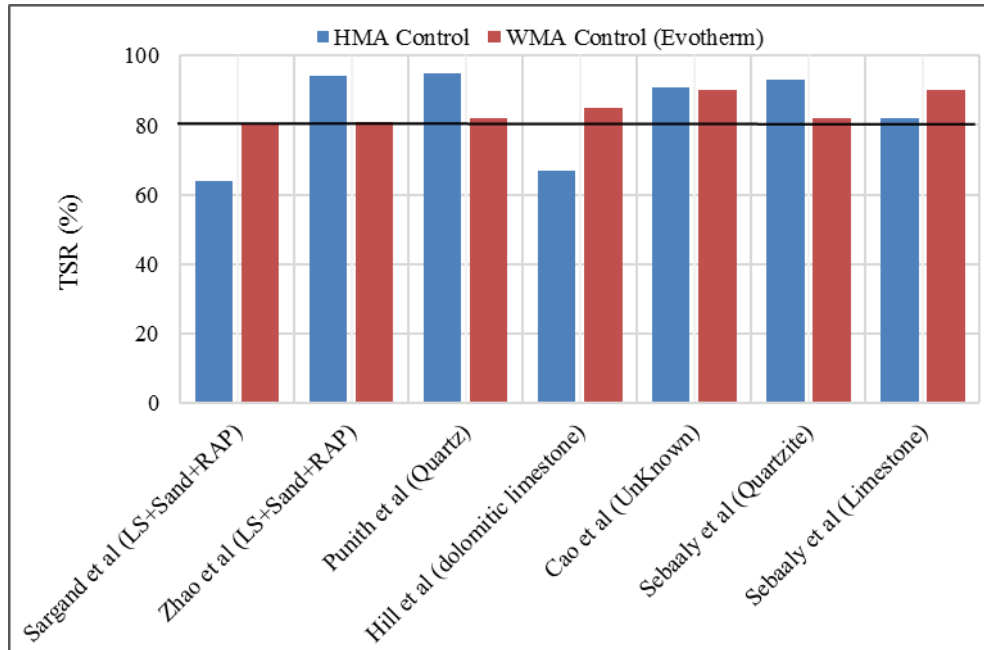
اسیدی در قیر و کاهش انرژی آزاد سطحی اجزای قیر و سنگدانه شده و در نتیجه کاهش چسبندگی پیوند بین قیر و سنگدانه را به دنبال دارد [۱۸، ۱۹]. وی و همکاران با بررسی خصوصیات شیمیایی سنگدانه و مقایسه نتایج انرژی آزاد سطحی به این نتیجه رسیدند که بین خصوصیات شیمیایی سنگدانه مصرفی و انرژی آزاد سطحی همبستگی و رابطه خوبی برقرار است [۶۸]. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که مقدار درصد افزودنی ساسوبیت و نوع سنگدانه در بهبود یا تضعیف مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ساسوبیت مؤثر می‌باشد. با توجه به اینکه قیر اصلاح شده با ساسوبیت خصوصیات اسیدی دارد توصیه می‌شود که در صورت استفاده از افزودنی ساسوبیت جهت جلوگیری از تضعیف پیوند قیر و سنگدانه، از سنگدانه‌هایی که خاصیت اسیدی بالایی دارند استفاده نشود.

#### ۲-۲-۵- افزودنی‌های شیمیایی

استفاده از مواد افزودنی شیمیایی نوع دیگری از فن آوری WMA است. ساز و کار این افزودنی‌ها جهت کاهش دمای تراکم و اختلاط بستگی به کاهش ویسکوزیته ندارد و در حالت کلی جهت بهبود پوشش قیر سنگدانه و افزایش کارایی مخلوط شامل ترکیبی از امولسیفایرها، سورفکتانت‌ها، پلیمرها و افزودنی‌ها می‌شود. مقدار

ماده افزودنی متناسب با نوع سنگدانه عملکرد متفاوتی از خود نشان می‌دهد که در شکل ۹ تعدادی از نتایج آزمایش مقاومت رطوبتی محققان آورده شده است. با توجه به نوع سنگدانه مصرفی در مخلوط آسفالتی می‌توان گفت که اثر این افزودنی در مقاومت رطوبتی بر اساس نوع سنگدانه با خاصیت اسیدی یا قلیایی تقریباً دارای روال مشخصی است، به طوری که هرچه سنگدانه دارای خاصیت قلیایی (سنگدانه قیر دوست) مانند سنگدانه آهکی و ماربل باشد، قیر اصلاح شده با ساسوبیت تا حدودی موجب افزایش پارامتر حساسیت رطوبتی (TSR) می‌شود و همچنین اگر سنگدانه خاصیت اسیدی بیشتری (آب‌دوست) مانند سنگدانه سیلیسی، بازالت و گرانیت داشته باشد، افزودن ساسوبیت به مخلوط آسفالتی موجب تضعیف چسبندگی قیر و سنگدانه شده و کاهش پارامتر حساسیت رطوبتی را در بر دارد [۴، ۲۳، ۳۰، ۳۲، ۳۹، ۵۰، ۶۲-۶۵].

برخی از محققان برای بررسی بهتر تأثیر ساسوبیت بر مقاومت رطوبتی از انرژی آزاد سطحی استفاده نمودند که نتایج متفاوت بود، بطوری که برخی افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه را گزارش نمودند که علت این امر می‌تواند به خاطر خاصیت قلیایی سنگدانه مورد استفاده در مخلوط آسفالتی باشد [۶۶، ۶۷]، درحالی که برخی دیگر ثابت کردند که اضافه کردن این افزودنی موجب افزایش اجزای



شکل ۱۰. تأثیر افزودنی اووترم بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی

Fig. 10. Effect of Evotherm additive on moisture sensitivity of asphalt mixtures

شکل ۱۰ آورده شده است. نتایج محققان نشان می‌دهد که تأثیر این افزودنی شیمیایی بر روی سنگدانه های مختلف متفاوت بوده و دارای روال مشخصی نمی‌باشد [۲۴، ۷۱].

ژاو و همکاران در تحقیقی برای ساخت مخلوط آسفالتی WMA از ترکیب سنگدانه آهکی، شن طبیعی و ۱۵ درصد RAP به‌عنوان مصالح سنگی و از اووترم به‌عنوان ماده افزودنی نیمه گرم استفاده کرده و مشاهده کردند که این ماده افزودنی تأثیر منفی بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط WMA دارد [۴۰]. در تحقیق دیگر از سنگدانه کوارتز و پتاسیم فلدسپات به‌عنوان مصالح سنگی استفاده شد و نتایج کاهش مقاومت رطوبتی مخلوط WMA حاوی افزودنی اووترم را نشان داد [۷۲]. تحقیقات هیل و همکاران و همچنین سرگند و همکاران برخلاف دو تحقیق قبلی نتایج متفاوتی را در مورد اثر اووترم نشان داد و ثابت کرد که اووترم تأثیر مثبتی بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط دارد و مانع از بروز خرابی رطوبتی می‌شود [۳۹، ۶۴]. قاچی و همکاران با استفاده از روش انرژی پایه حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی اووترم را بررسی نموده و مشاهده کردند که اووترم موجب افزایش چسبندگی و بهبود خرابی رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود [۶۶].

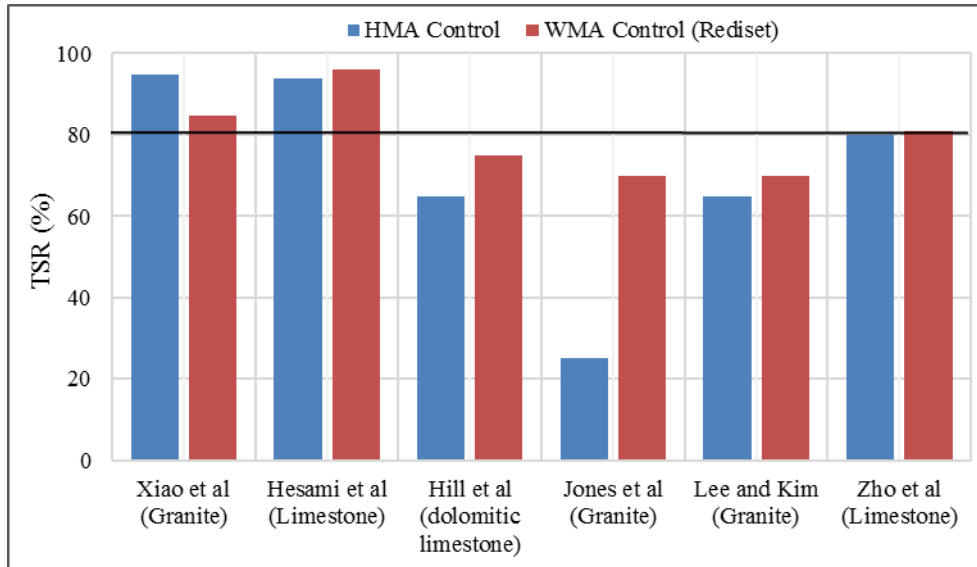
مورد نیاز این افزودنی‌های جهت کاهش دما بستگی به نوع محصول مورد استفاده دارد. این مواد افزودنی علاوه بر ایالت متحده آمریکا در کشورهای اروپایی مانند فرانسه و نروژ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقدار کاهش دما توسط این افزودنی‌ها متناسب با نوع محصول متفاوت است، بطوری‌که محصول رویکس<sup>۱</sup> کاهش ۱۵ الی ۳۰ درجه سانتی‌گراد و محصول اووترم<sup>۲</sup> کاهش ۷۵-۵۰ درجه سانتی‌گراد را به دنبال دارد [۶۹].

#### • اووترم<sup>۲</sup>

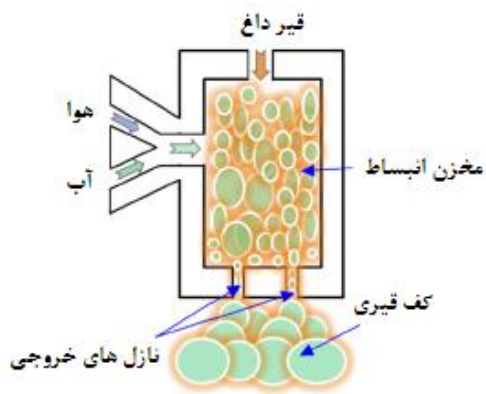
اووترم به شکل امولسیون بوده و شامل مواد افزودنی مختلف از جمله مواد ضد عریان شدگی جهت بهبود پوشش مصالح، کارایی مخلوط و افزایش چسبندگی می‌باشد. در این افزودنی در مرحله اختلاط، آب موجود در ماده امولسیونی در ترکیب با مصالح بصورت بخار آزاد گردیده و موجب پوشش بهتر سنگدانه ها می‌شود [۷۰]. در خصوص تأثیر این افزودنی بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA مطالعات زیادی انجام شده که نتایج تعدادی از مطالعات در

1 Revix  
2 Evotherm  
3 Evotherm





شکل ۱۱. تأثیر افزودنی ردیست بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی  
 Fig. 11. Effect of Rediset additive on moisture sensitivity of asphalt mixtures



شکل ۱۲. شکل شماتیک نحوه تولید افزودنی کف قیری  
 Fig. 12. The schematic figure to the procedure of producing Foamed bitumen additive

دو نوع قیر مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزودن ردیست نسبت انرژی افزایش نمی‌یابد و در نتیجه هیچ تأثیری در کاهش حساسیت رطوبتی ندارد [۷۸]. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت این افزودنی قابلیت کاهش خرابی رطوبتی را دارد و توصیه می‌شود برای بررسی بهتر این خصوصیت آزمایش انرژی سطحی برای انواع سنگدانه انجام شود.

### ۳-۲-۵- فن آوری کف قیری<sup>۲</sup>

فن آوری افزودنی کف قیری عمدتاً شامل مقداری آب بوده و بدون

### • ردیست<sup>۱</sup>

ردیست ترکیبی از افزودنی آلی و سورفکتانت‌ها بوده که باعث افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها می‌شود، بطوری‌که سورفکتانت (مواد فعال سطحی) قابلیت پوشش کامل قیر دور سنگدانه را بهبود داده و مواد افزودنی آلی موجب کاهش ویسکوزیته قیر جهت پوشش و تراکم آسان‌تر مخلوط آسفالتی می‌شود [۷۳]. این افزودنی به شکل قرص با درصد ۱/۵ الی ۲/۵ درصد وزن سنگدانه می‌تواند به قیر یا سنگدانه اضافه شود [۷۴]. با توجه به وجود مواد فعال سطحی کاتیونی در ردیست انتظار می‌رود که این ماده افزودنی موجب کاهش حساسیت رطوبتی شود. مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که تمامی نتایج بجز تحقیق زاو xiao نشان دهنده تأثیر مثبت این افزودنی در افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی است [۲۳، ۳۹، ۵۰، ۷۵، ۷۶].

دمای تراکم و اختلاط مخلوط آسفالتی WMA از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در مقاومت رطوبتی مخلوط ساخته شده می‌باشد، بطوری‌که جونز و همکاران مشاهده کردند که افزودن ردیست برای تولید مخلوط در دمای پایین هیچ تأثیری بر روی خرابی رطوبتی ندارد [۷۷]. استخری و همکاران بوسیله آزمایش مفهوم انرژی آزاد سطح، تأثیر ردیست را بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط با دو نوع سنگدانه و

جدول ۷. مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی افزودنی کف قیری [۵۹].

Table 7. The moisture resistance of warm mix asphalt containing foamed bitumen additive

حالت‌های مختلف	مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی بدون ماده ضد عریان شدگی (TSR)				مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی ماده ضد عریان شدگی (TSR)			
	۱۳۵	۱۱۵	۱۰۵	۹۰	۱۳۵	۱۱۵	۱۰۵	۹۰
دمای اختلاط و تراکم	۱۳۵	۱۱۵	۱۰۵	۹۰	۱۳۵	۱۱۵	۱۰۵	۹۰
HMA Control	۶۹	-	-	-	۷۹	-	-	-
WMA-foam-A	-	۶۸	۶۸	۶۶	-	۹۶	۹۲	۸۴
WMA-foam-B	-	۵۶	۵۱	۴۴	-	۹۸	۹۸	۷۶

سه دمای متفاوت و همراه با افزودنی ضد عریان شدگی مورد بررسی قرار دادند. مطابق جدول ۷ نتایج نشان داد که در حالت بدون ماده ضد عریان شدگی شاخص TSR مخلوط WMA کمتر از نمونه شاهد HMA می‌باشد ولی با افزودن ماده ضد عریان شدگی، پارامتر TSR مخلوط WMA بطور قابل توجهی بیشتر از مخلوط HMA می‌شود. همچنین بررسی پارامتر دمای اختلاط و تراکم نشان می‌دهد که با کاهش دما پارامتر TSR کاهش می‌یابد.

• کف قیری حاوی آب<sup>۴</sup>

در این فن آوری از ژئولیت مصنوعی برای تولید کف قیری استفاده می‌شود که آسفامین<sup>۵</sup> و ادورا<sup>۶</sup> از انواع آن می‌باشد. ژئولیت از ۲۱ درصد آب تشکیل می‌شود و در ساختار خود دارای فضاهایی خالی قابل توجهی هستند که می‌توانند انواع کاتیون‌ها و مولکول‌های آب را وارد ساختار خود کند. ژئولیت در دمای بالای ۸۰-۹۰ درجه آب را وارد ساختار خود می‌آورد و به شکل کف در می‌آورد و در نتیجه با افزایش حجم قیر موجب افزایش کارایی مخلوط در این دما می‌شود [۷۵].

در مورد تأثیر آسفامین در کنترل خرابی رطوبتی مطالعات اندکی انجام شده و تقریباً نتایج تمامی مطالعات نشان می‌دهد این افزودنی موجب افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود که نتایج برخی از آن‌ها در شکل ۱۳ آورده شده است [۶۴، ۷۵، ۸۰]. بررسی آزمایش آزاد سطحی نیز نشان می‌دهد افزودن این ماده موجب کاهش انرژی آزاد سطحی چسبندگی در مخلوط آسفالتی می‌شود و افزودن

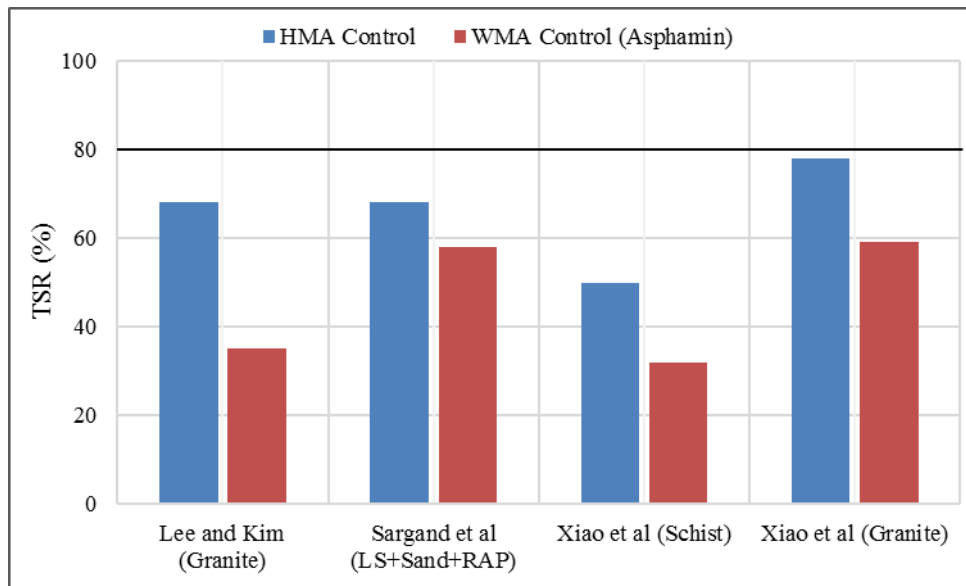
نیاز به هیچ‌گونه افزودنی تولید می‌شود. جهت تولید این افزودنی‌ها مطابق شکل ۱۲ آب سرد و هوای فشرده به داخل قیر داغ تزریق شده و حجم قابل ملاحظه‌ای کف قیری تولید می‌شود که کاهش ویسکوزیته مخلوط را به دنبال دارد. فرآیند تولید این افزودنی‌ها یکسان بوده ولی روش اضافه کردن آب به قیر به دو روش مستقیم (روش پایه آب) و غیرمستقیم (روش حاوی آب) انجام می‌گیرد. در ادامه مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA حاوی افزودنی‌های کف قیری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

• کف قیری پایه آب<sup>۱</sup>

در این فن آوری آب سرد از طریق نازل با فشار زیاد داخل قیر داغ تزریق شده و در اثر تماس قیر داغ با آب سرد، آب بخار شده و قیر بصورت کف افزایش حجم می‌دهد. افزودنی‌های گرین داوول بارل<sup>۲</sup> و ال تی ای آسفالت<sup>۳</sup> به این روش تولید می‌شوند. با توجه به استفاده مستقیم از آب در این فن آوری انتظار می‌رود که مقاومت کمتری در برابر خرابی رطوبتی داشته باشند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که حساسیت رطوبتی مخلوط‌های ساخته شده با این فن آوری به دلیل تنوع قیر مصرفی، نوع سنگدانه و همچنین دمای اختلاط و تراکم در نظر گرفته، متفاوت می‌باشد؛ به طوری که در برخی از تحقیقات افزایش شاخص TSR گزارش شده و در برخی دیگر نیز تفاوت ناچیزی در شاخص TSR نسبت به مخلوط HMA نشان داده شده است [۲۴، ۷۹]. کاووسی و هاشمیان در تحقیق خود مقاومت رطوبتی مخلوط WMA ساخته شده با دو نوع افزودنی کف قیر را در

4 Water-containing Foamed bitumen  
5 Apha-min  
6 Advera

1 Water-base Foamed bitumen  
2 Double Barrel Green  
3 ETA Asphalt



شکل ۱۳. تأثیر افزودنی آسفامین بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی  
 Fig. 13. Effect of Aspha-min additive on moisture sensitivity of asphalt mixtures

به صورت مخرب و غیرمخرب طراحی شود که همه این پارامترها را بصورت ترکیبی در نظر بگیرد و داده‌های دقیق تری را نشان دهد.

۲- مدت زمان اختلاط اجزای تشکیل دهنده ی مخلوط آسفالتی نیمه گرم به مدل و ظرفیت کارخانه، نوع مصالح و دانه بندی و پوشش قیری سنگدانه‌ها بستگی دارد که می تواند حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را تحت تأثیر قرار دهد، بنابراین توصیه می شود کارخانه های سازنده ی آسفالت، مدت زمان اختلاط را تعیین کنند.

۳- شرایط جوی، دمای محیط و آمادگی سطوح راه از عوامل تأثیر گذار در پخش مخلوط آسفالتی نیمه گرم است که می تواند حساسیت مخلوط های آسفالتی را در برابر رطوبت تغییر دهد. به عنوان مثال توصیه می شود در مواقع بارندگی، روی سطوح یخ زده و مرطوب باید از پخش آسفالت خودداری شده و پیمانکار باید به نحوی برنامه ریزی کند که آسفالت در فصول مناسب اجرا شده و درجه ی حرارت سطح راه از ۲۵ درجه سانتی گراد کمتر نباشد.

۴- در جریان حمل آسفالت، افزایش زمان و درجه ی حرارت زیاد آسفالت باید بیشتر مدنظر قرار بگیرد، بطوری که عدم توجه به این نکته باعث می شود قیر به صورت همگن در کل مخلوط پخش نشده و آسفالت کف کامیون دارای قیر بیشتر و آسفالت بالای کامیون کم قیر باشد. این جدایی قیر از مصالح سنگی باعث می شود که در قسمت های کم قیر، عریان شدگی و افزایش حساسیت رطوبتی اتفاق

آهک موجب کاهش اختلاف انرژی سطحی خشک مرطوب شده و در نتیجه بهبود مقاومت رطوبتی را به دنبال دارد [۱۸، ۱۹].

ادورا نیز از زئولیت مصنوعی تولید شده و خصوصیتی شبیه مواد افزودنی آسفامین ها دارد که از ۲۰-۱۸ درصد آب تشکیل می شود و طی فرآیند فن آوری نیمه گرم، رطوبت خود را آزاد کرده و دمای اختلاط مخلوط را در حدود ۲۰-۱۰ درجه کاهش می دهد [۷۵]. این ماده افزودنی در برابر خرابی رطوبتی تأثیر منفی داشته و مقاومت مخلوط آسفالتی را تا حدودی کاهش می دهد [۳۹، ۷۵] که پیشنهاد می شود این ماده افزودنی در کنار مواد ضد عریان شدگی استفاده شود.

#### ۶- پیشنهادها

با توجه به مطالعات انجام شده جهت اجرای هر چه بهتر مخلوط های آسفالتی نیمه گرم متناسب با شرایط بومی کشور توصیه می شود موارد ذیل مدنظر قرار گیرد:

۱- با توجه به مطالعه انجام شده مشاهده می شود که پارامترهای زیادی از جمله پیرشدگی، دمای ساخت آسفالت و شرایط محیطی بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه گرم تأثیر می گذارد و این پارامترها بطور همزمان مورد توجه محققان قرار نگرفته است. بنابراین پیشنهاد می شود که روشی بر پایه آزمایشگاهی

افتاده و عمر آسفالت کوتاه تر شود.

۴- دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی WMA عامل اصلی و کلیدی در میزان تراکم مخلوط و میزان پوشش قیر و سنگدانه می باشد که ارتباط مستقیمی با مقاومت رطوبتی مخلوط ساخته شده دارد.

۵- طبق آیین نامه ی روسازی آسفالتی راه های ایران به منظور جلوگیری از کاهش درجه ی حرارت و سرد شدن سطح، تغییر خاصیت و یکنواختی آسفالت، جلوگیری از حرارت مستقیم به مخلوط آسفالتی و جدایی قیر از مصالح سنگی توصیه می شود که کامیون های حامل حمل آسفالت مجهز به مخزن دوجداره با گرم کن توسط روغن بوده و یا دارای پوشش برزنتی باشند.

## ۷- نتیجه گیری

حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی جزو خرابی های سازه ای و یکی از خرابی های محتمل در روسازی آسفالتی WMA است که نقش مهم و کلیدی در عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی دارد. از این رو، این موضوع نیازمند بررسی و توجه بیشتری در جهت افزایش عمر روسازی می باشد. امروزه روش های آزمایشگاهی متفاوتی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی وجود دارد که هر کدام از آن ها در هر منطقه بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند، ولی به علت وجود پارامترهای متعدد در بروز این خرابی بلندمدت، تاکنون روش دقیق و جامعی برای تخمین مقاومت رطوبتی وجود ندارد. این مطالعه به منظور شناخت بهتر عوامل تأثیرگذار در بروز حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی WMA انجام شده که برخی از نتایج آن به شرح زیر است:

۱- نوع سنگدانه مصرفی در مخلوط آسفالتی بر اساس نظریه اسیدیته از لحاظ خصوصیت اسیدی و یا بازی نقش بسزایی در تشکیل پیوند بین قیر و سنگدانه دارد و عموماً سنگدانه هایی با خصوصیت بازی (سنگدانه آهکی) نسبت به سنگدانه های اسیدی پیوند قوی تری با قیر برقرار کرده و مقاومت رطوبتی بالاتری را در پی دارند.

۲- قیرهای خالص عموماً دارای خاصیت اسیدی بوده و اصلاح قیر با افزودنی WMA (ساسوبیت) موجب افزایش خاصیت اسیدی قیر اصلاحی می شود که در این صورت قیر اصلاحی با سنگدانه بازی پیوند قوی تری نسبت به سنگدانه اسیدی تشکیل می دهد.

۳- سرباره (فولاد و مس) به علت تشابه ساختاری (کانی های سازنده) با سنگدانه آهکی دارای خصوصیت بازی بوده و استفاده از آن در مخلوط آسفالتی WMA در کنار بهبود سایر خرابی ها، افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی را به دنبال دارد.

## مراجع

- [1] D. Cheng, R. G. Hicks, and T. Teesdale, "Assessment of Warm Mix Technologies for Use with Asphalt Rubber Paving Applications," 2011.
- [2] A. Khodaii, H. Haghshenas, and H. K. Tehrani, "Effect of grading and lime content on HMA stripping using statistical methodology," Construction and Building

- evaluation of stiffness, low-temperature cracking, rutting, moisture damage, and fatigue performance of WMA mixes,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 16, no. 2, pp. 334-357, 2015.
- [13] M. Ameri, S. Kouchaki, and H. Roshani, “Laboratory evaluation of the effect of nano-organosilane anti-stripping additive on the moisture susceptibility of HMA mixtures under freeze-thaw cycles,” *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 1009-1016, 2013.
- [14] B. Huang, Y. Zhang, X. Shu, Y. Liu, D. Penumadu, and X. P. Ye, “Neutron scattering for moisture detection in foamed asphalt,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 7, pp. 932-938, 2013.
- [15] M. R. Kakar, M. O. Hamzah, and J. Valentin, “A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 99, pp. 39-58, 2015.
- [16] B. Sengoz and E. Agar, “Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt,” *Building and environment*, vol. 42, no. 10, pp. 3621-3628, 2007.
- [17] V. Mouillet, F. Farcas, and S. Besson, “Ageing by UV radiation of an elastomer modified bitumen,” *Fuel*, vol. 87, no. 12, pp. 2408-2419, 2008.
- [18] S. Hesami, H. Roshani, G. H. Hamed, and A. Azarhoosh, “Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt,” *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 935-941, 2013.
- [19] M. Arabani, H. Roshani, and G. H. Hamed, “Estimating moisture sensitivity of warm mix asphalt modified with zycosoil as an antistrip agent using surface free energy method,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 7, pp. 889-897, 2012.
- [20] R. Ghabchi, D. Singh, M. Zaman, and Q. Tian, “A laboratory study of warm mix asphalt for moisture damage potential using surface free energy method,” in *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements*, 2013, pp. 54-63.
- Materials*, vol. 34, pp. 131-135, 2012.
- [3] S. W. Goh, Z. You, and T. J. Van Dam, “Laboratory evaluation and pavement design for warm mix asphalt,” in *Proceedings of the 2007 Mid-Continent transportation research symposium*, 2007, pp. 1-11.
- [4] S. Sobhi, “Evaluation of moisture sensitivity warm mix asphalt containing Gilsonite (in Persian),” Babol Noshirvani University of Technology, 2018
- [5] Barry R. Christopher, C.S. P.E., and P.E. Richard Boudreau, *Geotechnical Aspects of Pavements FHWA NHI-05-037*, National Highway Institute Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation Washington, D.C., 2006.
- [6] A. Tarrer and V. Wagh, “The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding,” Strategic Highway Research Program, National Research Council Washington, DC, USA1991.
- [7] H. J. Fromm, “The mechanisms of asphalt stripping from aggregate surfaces,” 1974.
- [8] E. A. Mercado, Influence of fundamental material properties and air void structure on moisture damage of asphalt mixes (no. 06). 2007.
- [9] M. Solaimanian, J. Harvey, M. Tahmoressi, and V. Tandon, “Test methods to predict moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements,” in *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements-A National Seminar* California Department of Transportation; Federal Highway Administration; National Asphalt Pavement Association; California Asphalt Pavement Alliance; and Transportation Research Board., 2003.
- [10] A. Kavussi, M. Qorbani, A. Khodaii, and H. Haghshenas, “Moisture susceptibility of warm mix asphalt: a statistical analysis of the laboratory testing results,” *Construction and Building Materials*, vol. 52, pp. 511-517, 2014.
- [11] A. Buss, A. Cascione, and R. C. Williams, “Evaluation of warm mix asphalt containing recycled asphalt shingles,” *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 1-9, 2014.
- [12] R. Ghabchi, D. Singh, and M. Zaman, “Laboratory

- and Transportation Research Board., 2003.
- [30] B. Şengöz, A. Topal, and C. Gorkem, "Evaluation of moisture characteristics of warm mix asphalt involving natural zeolite," *Road materials and pavement design*, vol. 14, no. 4, pp. 933-945, 2013.
- [31] S. Xu, F. Xiao, S. Amirkhanian, and D. Singh, "Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies—a review," *Construction and Building Materials*, vol. 142, pp. 148-161, 2017.
- [32] E. Sangsefidi, H. Ziari, and A. Mansourkhaki, "The effect of aggregate gradation on creep and moisture susceptibility performance of warm mix asphalt," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 133-141, 2014.
- [33] K. Kanitpong, N. Charoentham, and S. Likitlersuang, "Investigation on the effects of gradation and aggregate type to moisture damage of warm mix asphalt modified with Sasobit," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 451-458, 2012.
- [34] W. Hodo, A. Kvasnak, and E. Brown, "Investigation of foamed asphalt (warm mix asphalt) with high reclaimed asphalt pavement (RAP) content for sustainment and rehabilitation of asphalt pavement," in *Proc., Transportation Research Board Annual Meeting*, 2009.
- [35] M. Tao and R. Mallick, "Effects of warm-mix asphalt additives on workability and mechanical properties of reclaimed asphalt pavement material," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2126, pp. 151-160, 2009.
- [36] M. Fakhri and A. Ahmadi, "Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation," *Construction and Building Materials*, vol. 147, pp. 630-638, 2017.
- [37] M. J. Ayazi, A. Moniri, and P. Barghabany, "Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives," *Petroleum Science and Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 1-10, 2004.
- [21] G. Shafabakhsh, M. Faramarzi, and M. Sadeghnejad, "Use of surface free energy method to evaluate the moisture susceptibility of sulfur extended asphalts modified with antistripping agents," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 456-464, 2015.
- [22] B. Li, J. Yang, X. Li, X. Liu, F. Han, and L. Li, "Effect of short-term aging process on the moisture susceptibility of asphalt mixtures and binders containing sasobit warm mix additive," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, 2015.
- [23] F. Xiao, V. S. Punith, S. N. Amirkhanian, and C. Thodesen, "Improved resistance of long-term aged warm-mix asphalt to moisture damage containing moist aggregates," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 7, pp. 913-922, 2013.
- [24] P. E. Sebaaly, E. Y. Hajj, and M. Piratheepan, "Evaluation of selected warm mix asphalt technologies," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 16, no. sup1, pp. 475-486, 2015.
- [25] L. Garcia Cucalon, E. Kassem, D. N. Little, and E. Masad, "Fundamental evaluation of moisture damage in warm-mix asphalts," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, no. sup1, pp. 258-283, 2017.
- [26] J.-L. Lambert, *Investigation into Asphalt Concrete Material and Volumetric Properties that Promote Moisture Damage*. University of Manitoba (Canada), 2013.
- [27] K. Majidzadeh and F. N. Brovold, *State of the art: Effect of water on bitumen-aggregate mixtures*. Highway Research Board, National Research Council, 1968.
- [28] L. Santucci, "Minimizing Moisture Damage in Asphalt Pavements," 2010.
- [29] J. D'angelo and R. Anderson, "Material production, mix design, and pavement design effects on moisture damage," in *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements-A National Seminar* California Department of Transportation; Federal Highway Administration; National Asphalt Pavement Association; California Asphalt Pavement Alliance;

- characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging," *Construction and Building Materials*, vol. 72, pp. 158-166, 2014.
- [47] S. Amelian, M. Manian, S. M. Abtahi, and A. Goli, "Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag," *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 329-337, 2018.
- [48] M. F. Tafti, M. M. Khabiri, and H. K. Sanij, "Experimental investigation of the effect of using different aggregate types on WMA mixtures," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 376-386, 2016.
- [49] Investigation of Long-term Performance of Warm Mix Asphalts Containing EAF Steel Slag (in Persian)," *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 23-42, 2017
- [50] S. Hesami, M. Ameri, H. Goli, and A. Akbari, "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 16, no. 8, pp. 745-759, 2015.
- [51] H. Ziari, A. Moniri, R. Imaninasab, and M. Nakhaei, "Effect of copper slag on performance of warm mix asphalt," *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-7, 2017.
- [52] S. K. Das, "Evaluation of asphalt--aggregate bond and stripping potential," Texas Tech University, 2004.
- [53] A. Akbari Nasrekani, M. Nakhaei, K. Naderi, E. Fini, and S. Aflaki, "Improving Moisture Sensitivity of Asphalt Concrete Using Natural Bitumen (Gilsonite)," 2017.
- [54] A. Diab, Z. You, R. Ghabchi, and M. Zaman, "Effects of regular-sized and nanosized hydrated lime on binder rheology and surface free energy of adhesion of foamed warm mix asphalt," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 9, 2015.
- [55] J. Cheng, J. Shen, and F. Xiao, "Moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing nanosized 35, no. 9, pp. 890-895, 2017.
- [38] X. Shu, B. Huang, E. D. Shrum, and X. Jia, "Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 125-130, 2012.
- [39] B. Hill, B. Behnia, W. G. Buttlar, and H. Reis, "Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement through mechanical performance tests and an acoustic emission approach," *Civil Engineering*, vol. 25, no. 12, 2013.
- [40] S. Zhao, B. Huang, X. Shu, and M. Woods, "Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement," *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 92-100, 2013.
- [41] N. Guo, Z. You, Y. Zhao, Y. Tan, and A. Diab, "Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 64, pp. 141-149, 2014.
- [42] X. D. Lu and M. Saleh, "Evaluation of warm mix asphalt performance incorporating high RAP content," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 43, no. 4, pp. 343-350, 2016.
- [43] F. Moghadas Nejad, A. Azarhoosh, G. H. Hamed, and H. Roshani, "Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 15, no. 1, pp. 207-219, 2014.
- [44] J. D. Doyle and I. L. Howard, "Rutting and moisture damage resistance of high reclaimed asphalt pavement warm mixed asphalt: loaded wheel tracking vs. conventional methods," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, no. sup2, pp. 148-172, 2013.
- [45] W. Mogawer, A. Austerman, L. Mohammad, and M. E. Kutay, "Evaluation of high RAP-WMA asphalt rubber mixtures," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, no. sup2, pp. 129-147, 2013.
- [46] A. Kavussi and M. J. Qazizadeh, "Fatigue

- [65] V. Punith, F. Xiao, and S. N. Amirkhani, "Effects of lime content on moisture susceptibility of rubberized stone matrix asphalt mixtures using warm mix additives in terms of statistical analysis," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, no. 12, pp. 1431-1440, 2012.
- [66] R. Ghabchi, D. Singh, M. Zaman, and Q. Tian, "Mechanistic evaluation of the effect of WMA additives on wettability and moisture susceptibility properties of asphalt mixes," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 41, no. 6, pp. 933-942, 2013.
- [67] A. Buddhala, Z. Hossain, N. M. Wasiuddin, M. Zaman, and A. Edgar, "Effects of an amine anti-stripping agent on moisture susceptibility of sasobit and aspha-min mixes by surface free energy analysis," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 40, no. 1, pp. 91-99, 2011.
- [68] J. Wei, F. Dong, Y. Li, and Y. Zhang, "Relationship analysis between surface free energy and chemical composition of asphalt binder," *Construction and Building Materials*, vol. 71, pp. 116-123, 2014.
- [69] W. Barthel and M. Von Devivere, "Warm Asphalt Mixes by Adding Aspha-Min. A Synthetic Zeolite," in *Proceedings of the 48 th Annual Convention of the National Asphalt Pavement Association (NAPA)*, 2003, pp. 11-17.
- [70] S. Capitão, L. Picado-Santos, and F. Martinho, "Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 1016-1024, 2012.
- [71] W. Cao and S. Liu, "Performance evaluation of asphalt-rubber stone matrix asphalt mixtures with warm mix asphalt additives," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 41, no. 1, pp. 141-147, 2012.
- [72] V. Punith, F. Xiao, B. Putman, and S. N. Amirkhani, "Effects of long-term aging on moisture sensitivity of foamed WMA mixtures containing moist aggregates," *Materials and structures*, vol. 45, no. 1-2, pp. 251-264, 2012.
- [73] M. O. Hamzah, B. Golchin, A. Jamshidi, and E. hydrated lime," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 11, pp. 1552-1559, 2011.
- [56] P. Mirzababaei, "Effect of zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations," *Construction and Building Materials*, vol. 116, pp. 403-412, 2016.
- [57] M. Ameri, M. Vamegh, S. F. C. Naeni, and M. Molayem, "Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing Evonik, Zycotherm and hydrated lime," *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 958-965, 2018.
- [58] F. Xiao, V. Punith, and B. Putman, "Effect of compaction temperature on rutting and moisture resistance of foamed warm-mix-asphalt mixtures," *J. Mater. Civ. Eng*, vol. 25, no. 9, pp. 1344-1352, 2013.
- [59] A. Kavussi and L. Hashemian, "Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of WMA foam mixes," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 415-423, 2012.
- [60] M. Zaumanis, "Warm mix asphalt investigation," Master of science thesis. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark in cooperation with the Danish Road Institute, Department of Civil Engineering, 2010.
- [61] Y. Edwards and U. Isacson, "Wax in bitumen: Part II—characterization and effects," *Road materials and pavement design*, vol. 6, no. 4, pp. 439-468, 2005.
- [62] H. Nabizadeh, B. Naderi, and N. Tabatabaee, "Effects of moisture on warm mix asphalt containing Sasobit," *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, vol. 24, no. 4, p. 1866, 2017.
- [63] M. Ameri, S. Hesami, and H. Goli, "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag," *Construction and Building materials*, vol. 49, pp. 611-617, 2013.
- [64] S. Sargand, M. D. Nazzal, A. Al-Rawashdeh, and D. Powers, "Field evaluation of warm-mix asphalt technologies," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, no. 11, 2012.



- [77] D. Jones, B.-W. Tsai, J. M. Signore, and U. o. C. P. R. Center, Warm-mix asphalt study: laboratory test results for AkzoNobel Rediset™ WMX. University of California, Pavement Research Center, 2010.
- [78] C. K. Estakhri, J. W. Button, and A. E. Alvarez, "Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas," Texas Transportation Institute, Texas A & M University System 2010.
- [79] B. W. Hailesilassie, M. Hugener, and M. N. Partl, "Influence of foaming water content on foam asphalt mixtures," Construction and Building Materials, vol. 85, pp. 65-77, 2015.
- [80] F. Xiao, W. Zhao, T. Gandhi, and S. N. Amirkhanian, "Laboratory investigation of moisture susceptibility of long-term saturated warm mix asphalt mixtures," International Journal of Pavement Engineering, vol. 13, no. 5, pp. 401-414, 2012.
- Chailleux, "Evaluation of Rediset for use in warm-mix asphalt: a review of the literatures," International Journal of Pavement Engineering, vol. 16, no. 9, pp. 809-831, 2015.
- [74] R. Bonaquist, "Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. NCHRP 9-43, Interim Report," Washington DC: National Cooperation Highway Research Program, 2008.
- [75] H. Lee and Y. Kim, "Performance measures of warm asphalt mixtures for safe and reliable freight transportation," Mid-America Transportation Center 2009.
- [76] H. Zhu, Z. X. Xie, W. Z. Fan, L. L. Wang, and J. N. Shen, "Effects of warm mix asphalt (WMA) additives on the properties of WMA mixtures," in Applied Mechanics and Materials, 2013, vol. 275, pp. 2097-2102: Trans Tech Publ.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Sobhi, A. Yusefi, S. Hesami, M. Ameri, An Investigation of Factors Affecting The Moisture Sensitivity of Warm Mix Asphalt (WMA), Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 187-212.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14707.5726](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14707.5726)



