

بهبود عملکرد مخلوط های آسفالتی حاوی تراشه های بازیافتی و مواد جوانساز در مقابل خرابی رطوبتی

چکیده

در این تحقیق، تأثیر تراشه های آسفالتی بازیافتی، درصد استفاده از آنها و جوانسازهای روغنی بر خصوصیات خرابی رطوبتی مخلوط های آسفالتی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. قیر مورد استفاده در این تحقیق، از نوع PG 64-16 می باشد. این تحقیق شامل ترکیبات مختلف با درصد های مختلف تراشه و جوانساز بوده است. به منظور تعیین پارامترهای وقوع خرابی رطوبتی، آزمایشات انرژی آب سطحی بر روی قیر و آزمایش آب جو شان (به همراه پردازش تصویر جهت تحلیل میزان خرابی) و PULL OFF بر روی مخلوط های حاوی تراشه های آسفالتی بازیافتی انجام شد. نتایج نشان داد که تغییرات در ترکیب تراشه ها و افزودن جوانسازها تأثیر قابل توجهی بر مقاومت مخلوط ها در برابر خرابی رطوبتی دارند. همچنین مخلوط های آسفالتی حاوی سنگ آهک در هر دو شرایط خشک و تر دارای مقادیر چسبندگی و پیوستگی بیشتری با قیر پایه می باشد. اما با اضافه شدن جوانساز مقاومت چسبندگی و پیوستگی در حالت خشک در سنگ آهک کاهش و در حالت تر افزایش می یابد. نتایج آزمایش PULL OFF حاکی از اهمیت جوانسازها در بهبود چسبندگی سنگدانه ها و پیوستگی مخلوط ها به سطح جاده است. همچنین نتایج اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که قیر اصلاح شده با جوانساز دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در مقایسه با قیر پایه است. نمونه ها با سنگدانه آهکی دارای بالاترین سطح پوشش سنگدانه (۸۰/۶۱۸ درصد) و سنگدانه های سیلیسی با سطح پوشش ۵۱/۳۴۰ درصد کمترین میزان سطح پوشش را پس از انجام آزمایش آب جوشان نتیجه دادند.

کلیدواژه: مخلوط آسفالتی بازیافتی، درصد تراشه، خرابی رطوبتی، مواد جوانساز

۱- مقدمه

مطالعات نشان می دهد که استفاده از تکنولوژی بازیافت آسفالت قبل از تخریب کامل لایه های آسفالتی، هزینه های تعمیر و نگهداری را به طور معنی داری کاهش می دهد [۱]. اگرچه استفاده گسترده از مواد بازیافتی (RAP) در تولید مخلوط های آسفالتی به مزایای اقتصادی و زیست محیطی چشمگیری منجر شده است، اما مهم ترین چالش در استفاده از مخلوط های آسفالتی با درصد بالای RAP، فرسودگی قیر موجود در RAP است که به علت اکسیداسیون قیر و گذشت زمان، سفتی آن را افزایش داده و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن را تغییر می دهد و کارایی آن را کاهش می دهد [۲]. کارایی ناکافی مخلوط های آسفالتی با تراکم مناسب در محل را متوقف کرده و در نهایت می تواند منجر به تشکیل ترک های ریز و زودرس شکست در سطح روسازی ایجاد شده در مکان گردد.

بسیاری از پژوهشگران معتقدند که با توجه به ساختار لایه‌ای قیر در تراشه‌های آسفالت، قیر همیشه به تراشه‌ها چسبیده و سنگدانه‌هایی با رنگ تیره ایجاد می‌کند. این قیر هرگز از سنگدانه‌ها جدا نمی‌شود و جلوگیری از ورود آب به سنگدانه‌های تراشه آسفالت می‌شود و در نتیجه تراشه‌ها مشکلی در مورد حساسیت به رطوبت نخواهند داشت. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که این موضوع، یعنی مواد خرده آسفالتی مانند سنگدانه‌های تیره در ترکیب با قیر جدید عمل نمی‌کنند، تا حدی صحیح است و نوع مواد سنگی می‌تواند تأثیرگذار باشد [۳]. این موضوع تا به امروز به طور دقیق مورد بررسی قرار نگرفته و تأثیر ارتباط میان میزان عریان شدگی قبل از بازیافت آسفالت و میزان عریان شدگی پس از بازیافت آسفالت مورد بررسی قرار نگرفته است. بررسی این مسئله می‌تواند باعث شود که متخصصان راه‌سازی و افراد فعال در صنعت بازیافت آسفالت در طراحی ترکیبات آسفالت بازیافتی در مورد موضوعاتی مانند عریان شدگی و حساسیت به رطوبت حواس‌تر عمل کنند و این موضوع را در نظر بگیرند [۴-۵]. از همین رو در مطالعه حاضر، ضمن بررسی تأثیر جنس تراشه‌های آسفالت مختلف، به بررسی تأثیر وجود خرابی رطوبتی در تراشه آسفالت بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی و همچنین تأثیر استفاده از انواع مواد جوانساز مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی بر حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها پرداخته می‌شود.

۲- مطالعات پیشین

مطالعات مختلف بر روی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی انجام شده است. در بسیاری از این مطالعات تأثیر تراشه‌های به کار رفته در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی تنها مورد بررسی قرار گرفت و در شماری دیگر علاوه بر این موضوع به تأثیر استفاده از انواع جوانسازها نیز پرداخته شد. قابچی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی با درصدهای مختلف تراشه آسفالت با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که نرخ انرژی با استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی افزایش پیدا می‌کند و از نظر انرژی آزاد سطحی، با افزایش درصد تراشه حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی کم می‌شود. همچنین میزان تأثیر تراشه آسفالت زمانی که سنگدانه‌های جدید از انواع مختلف استفاده می‌شوند متفاوت هستند. به عنوان مثال تأثیر مثبت تراشه آسفالت بر نرخ انرژی در سنگدانه‌های آهکی بسیار بیشتر از گرانیتی هستند [۶]. ایازی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی و افزایش درصد تراشه آسفالت موجب بهبود مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی خواهد شد [۷]. آن‌ها نشان دادند که با افزایش میزان تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی تا ۷۰ درصد، پارامتر TSR تا میزان ۲۰ درصد افزایش پیدا می‌کند و به ۱۰۰ درصد می‌رسد. علت این موضوع عمدتاً ساختار لایه‌ای قیر در تراشه‌های آسفالتی عنوان شده است. در واقع این طور بیان شده است که یک لایه قیر همیشه اطراف تراشه‌های آسفالت چسبیده است باعث می‌شود تا برخورد رطوبت با مصالح سنگی در این مخلوط‌های کم‌تر اتفاق می‌افتد و لذا حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها بهبود پیدا می‌کند. منیری و همکارانش در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که استفاده از تراشه آسفالت تا میزان ۱۰۰ درصد باعث می‌شود تا مقاومت این مخلوط‌ها در برابر رطوبت افزایش پیدا کند. در این تحقیق هم علت این موضوع ساختار لایه‌ای قیر در این مخلوط‌ها عنوان شده است [۸].

علی‌رغم این‌که بسیاری از مطالعات حاکی از تأثیر مثبت استفاده از تراشه آسفالت در مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی بوده است، برخی مطالعات وجود دارد که نشان‌دهنده تأثیر منفی استفاده از خرده آسفالت بازیافتی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. فخری و احمدی در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی با افزایش سیکل یخبندان و ذوب با طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که حتی در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی هم یخبندان و ذوب تأثیر منفی بر عملکرد مخلوط دارد. آن‌ها همچنین بیان کردند که شیب کاهش پارامتر مقاومت ترک‌خوردگی در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت و مخلوط‌های متداول با یکدیگر تفاوت چندانی ندارند [۹]. ترن^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت بدون استفاده از جوانساز کاهش پیدا می‌کند. با این‌وجود پس از استفاده از جوانساز این مقاومت مجدداً بازیابی می‌شود. مطالعات ترن نشان داده است که استفاده از تراشه آسفالت تأثیر منفی در مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت دارند [۱۰]. سینگ^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ طی تحقیقی به بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی مختلف در برابر رطوبت پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش درصد تراشه آسفالت تا ۳۰ درصد باعث بهبود حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و پس از آن در صورتی که درصد تراشه آسفالت تا ۴۰ درصد افزایش پیدا کند مقاومت این مخلوط‌ها در برابر رطوبت کاهش می‌یابد [۱۱].

یان^۳ و همکارانش در سال ۲۰۲۲ از روش انرژی سطحی برای بررسی چسبندگی روغن سوخته خوراکی بازیافتی به‌عنوان جوانساز استفاده کردند [۱۲]. آن‌ها نشان دادند که استفاده از روغن بازیافتی موجب افزایش نرخ انرژی و بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی در برابر عریان شدگی می‌شود. فنگ^۴ و همکارانش در سال ۲۰۲۱ در مطالعه‌ای موردی به بررسی تأثیر جوانسازهای مختلف بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی پرداختند [۱۳]. آن‌ها نشان دادند که روغن کلزا، روغن‌های گیاهی و روغن تال تأثیر مثبت بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها دارند. با این‌وجود روغن کرچک و روغن سوخته خوراکی باعث کاهش مقاومت در برابر رطوبت می‌شود. شیه^۵ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که استفاده از ۲۵ درصد تراشه آسفالت بازیافتی با دو جوانساز مختلف می‌تواند تا حد زیادی پارامتر مقاومت کششی غیرمستقیم را کاهش دهد [۱۴].

زهوور^۶ و همکارانش در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که عدد اسیدی در جوانسازهای بازیافتی تأثیر بسزایی در حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی دارند [۱۵]. حق‌شناس و همکارانش هم در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که خصوصیات شیمیایی جوانسازها تأثیر بسزایی در حساسیت رطوبتی آن‌ها دارد [۱۶].

¹ Tran

² Singh

³ Yan

⁴ Fang

⁵ Xie

⁶ Zahoor

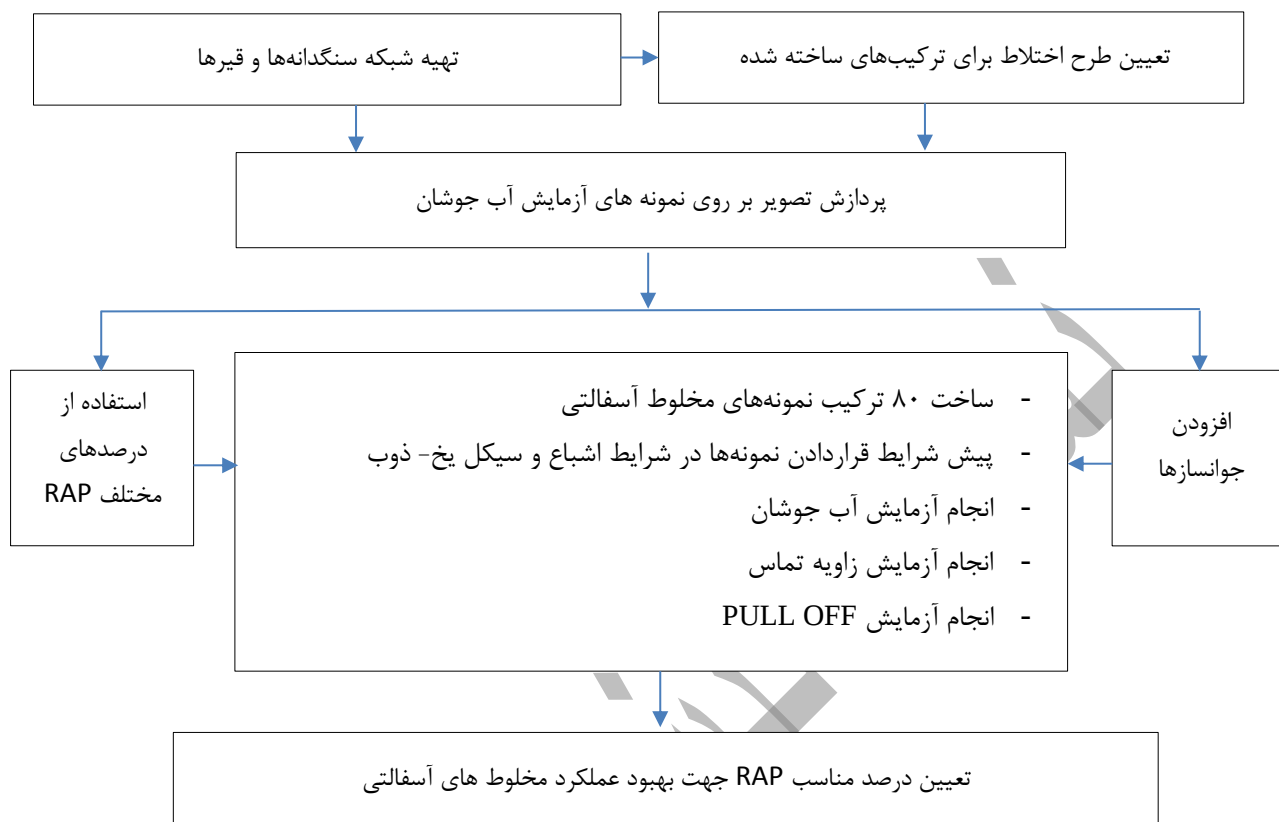
مطالعات زیادی در مورد تأثیر جوان سازی های مختلف بر مقاومت شیارافتادگی مخلوط های آسفالت ترکیب شده با مصالح RAP وجود دارد [۲۱-۱۷]. با توجه به این واقعیت که جوانسازها باعث کاهش سفتی قیر پیر شده ی مصالح RAP شده باعث کاهش قابل توجه مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط های آسفالتی می شود. جیا و هوانگ با آماده سازی مخلوط هایی با سه درصد RAP (۰، ۲۵، ۴۰ درصد) و ترکیب با ۳ درصد جوانساز از نوع روغن ضایعاتی (۰، ۲، ۵ درصد) مقاومت در برابر شیار شدگی را با استفاده از آزمایش APA ارزیابی کرده و مشاهده کرد که جوانسازها تأثیر منفی بر مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط های آسفالتی دارد [۲۲]. کارکی و همکارانش با استفاده از آزمایش ویل تراک، مقاومت در برابر شیار شدگی سه نوع مخلوط نیمه گرم شده و درصدهای مختلف از جوانساز (۰، ۲، ۵، ۱۰) مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که مخلوط های دارای جوانساز دارای عمق شیار شدگی بیشتری نسبت به مخلوط های بدون جوانساز می باشد [۲۳]. آرامبولا و کاسر، تأثیر جوانساز از نوع روغن های چوب را بر شیار شدگی مخلوط های پیر شده ی کوتاه مدت (دو ساعت در دمای ۱۳۵ درجه ی سانتی گراد) با دو نوع مصالح سنگی (آهکی و ماسه ای) مورد ارزیابی قرار دادند. آن ها دریافتند که مخلوط حاوی ۱۲،۵ درصد جوانساز روغن چوب نمی تواند معیار مقاومت در برابر شیار شدگی (کمتر از ۱۲،۵ میلی متر) را عبور کند [۲۴].

۳- روش تحقیق

در این پژوهش از چهار درصد RAP با درصدهای ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و سه نوع جوانساز از گروه های مختلف انواع جوانسازها استفاده گردید. سپس برای تعیین درصد بهینه ی جوانسازها، قیرپیر شده ی مخلوط های باز یافتی (RAP) استخراج گردیده و سپس با استفاده از آزمایش های متداول قیر (درجه ی نفوذ و نقطه ی نرمی) درصد بهینه ی هریک از جوانسازها تعیین گردید. با ارزیابی میزان اثر گذاری ساختار مصالح طرح بر روی ویژگی های حجمی مخلوط های آسفالتی، از بین دانه بندی های مختلف ساختار و دانه بندی که پاسخگوی نیازهای طرح اختلاط و سیستم رو سازی باشد انتخاب گردید. با انتخاب دانه بندی مصالح طرح، نمونه های آسفالتی به منظور تعیین درصد بهینه ی حالت های مختلف مخلوط های آسفالتی، با استفاده از الزامات و استانداردهای طرح اختلاط مارشال تهیه گردید. سپس به ازای درصدهای قیر بهینه ی به دست آمده نمونه ها در ابعاد مشخص طبق استاندارد هر نوع آزمایش با استفاده از متر اکم کننده ی برقی چکش مارشال تهیه گردیده و نمونه های ساخته شده تحت بار گذاری دستگاه های مورد نظر برای ارزیابی خواص مکانیکی قرار گرفتند. در مطالعه حاضر به منظور بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی از دو آزمایش آب جوشان و آزمایش PULL OFF و همچنین به منظور بررسی مشخصات قیر، از آزمایش انرژی آزاد سطحی قیر استفاده شد. شکل ۱، قلوچارت مطالعه حاضر را نشان می دهد.

۳-۱- مصالح مصرفی

در ساخت نمونه های آزمایشگاهی از مصالح مختلفی از قبیل: خرده مصالح آسفالتی، قیر، مصالح سنگی و جوانساز استفاده شده که در ادامه به تفکیک ارائه شده است.



شکل ۱- مراحل روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش

۳-۱-۱- مصالح سنگی

کانی های تشکیل دهنده مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود که سنگدانه برداشت شده از آسفالت راه های شهری استان مازندران از نوع آهکی می باشد. با بررسی سایر سنگدانه ها مشخص شد که سنگدانه های استان گلستان از نوع گرانیتی می باشد. سنگدانه های دو بزرگراه همت و بابایی نیز از نوع گرانیتی می باشد.

جدول ۱- کانی های تشکیل دهنده سنگدانه های تراشه آسفالت

ردیف	معبر	Sio ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mgo	Cao	Sio ₂ / Cao
۱	گلستان	۶۶/۸۴	۱۳/۵۲	۴/۰۵	۱/۷۲	۱۳/۴۷	۴/۹۶
۲	مازندران	۱۶/۴۷	۴/۷۸	۳/۸۲	۲/۲۲	۷۲/۳۴	۰/۲۸
۳	بزرگراه بابایی	۵۲/۱۹	۶/۰۴	۷/۰۷	۲/۸۸	۳۱/۷۱	۱/۶۵
۴	بزرگراه همت	۵۰/۱۰	۵/۹۱	۶/۹۳	۲/۸۰	۳۰/۴۵	۱/۶۴

۳-۱-۲- دانه‌بندی مصالح سنگی تراشه‌ی آسفالت (RAP)

دانه‌بندی چهار نمونه از مصالح سنگی تراشه‌ی آسفالت پس از جداسازی قیر پیر شده در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج حاصل از دانه‌بندی مصالح سنگی تراشه‌ی آسفالت نشان می‌دهد که دانه‌بندی موردنظر در محدوده‌ی دانه‌بندی شماره‌ی ۴ آیین‌نامه واقع شده است.

جدول ۳- درصد عبوری مصالح سنگی تراشه آسفالت پس از جداسازی قیر

درصد عبوری نمونه‌ی					درصد عبوری (دانه‌بندی شماره‌ی ۴ نشریه‌ی ۲۳۴)	اندازه الک
متوسط	۴	۳	۲	۱		
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۹ میلی‌متر (۳/۴ اینچ)
۹۸٫۹	۹۹	۹۸٫۹	۹۹٫۵	۹۸٫۲	۱۰۰-۹۰	۱۲٫۵ میلی‌متر (۱/۲ اینچ)
۹۴٫۹	۹۵٫۴	۹۵٫۵	۹۵٫۳	۹۳٫۳	---	۹٫۵ میلی‌متر (۳/۸ اینچ)
۵۹٫۲	۶۴٫۸	۶۲٫۴	۵۸٫۸	۵۰٫۶	۷۴-۴۴	۴٫۷۵ میلی‌متر (شماره‌ی ۴)
۳۸٫۳	۴۳٫۷	۴۱٫۶	۳۸٫۲	۲۹٫۵	۵۸-۲۸	۲٫۳۶ میلی‌متر (شماره‌ی ۸)
۲۴٫۰	۲۴٫۵	۲۳٫۰	۲۴٫۰	۲۴٫۵	---	۱٫۱۸ میلی‌متر (شماره‌ی ۱۶)
۱۸٫۵	۱۸٫۰	۱۹٫۵	۱۸٫۵	۱۸٫۰	---	۰٫۶ میلی‌متر (شماره‌ی ۳۰)
۱۱٫۹	۱۴٫۶	۱۱٫۰	۱۱٫۶	۱۰٫۵	۲۱-۵	۰٫۳ میلی‌متر (شماره‌ی ۵۰)
۶٫۶	۹٫۲	۴٫۶	۶٫۵	۵٫۹	۱۰-۲	۰٫۰۷۵ میلی‌متر (شماره‌ی ۲۰۰)

۳-۱-۳- قیر

در صد قیر آسفالت بازیافتی طبق استاندارد ASTM D2172 [۲۵] و روش اکسترکشن تعیین گردید. قیر مصرفی مورد استفاده در این راه‌ها، قیر PG 64-16 می‌باشد. نوع قیر و خصوصیات آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات قیر بازیافتی از تراشه آسفالت

T-H	T-B	M-B	G-G	روش استاندارد	نوع آزمایش
۴/۷۹	۵/۰۲	۵/۵۸	۴/۴۷	ASTM D2172	درصد قیر (درصد)
۲۲	۲۵	۲۹	۳۱	ASTM D5	درجه نفوذ در دما ۲۵ درجه سانتیگراد (۰/۱ میلیمتر)
۶۱/۳	۵۹/۶	۵۷/۷	۵۶/۴	ASTM D36	نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)
۰/۷۶۱	۰/۷۸۲	۰/۷۹۱	۰/۸۱۱	ASTM 4402	ویسکوزیته در دما ۱۳۵ درجه سانتیگراد (پاسکال ثانیه)

۳-۱-۴- جوانساز

در این پژوهش به منظور بازگرداندن خواص فیزیکی و شیمیایی قیر پیر شده‌ی موجود در آسفالت بازیافتی از سه نوع جوانساز و عامل بازیافتی روغن آفتابگردان، آروماتیک (سایکولوژن cyclogen) و نفتیک (وکیوم باتوم)

استفاده شده است. جدول (۴) مشخصات جواناتهای مورد استفاده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مشخصات جواناتهای مورد استفاده

نوع آزمایش	روش استاندارد	گیاهی (روغن آفتابگردان)	آروماتیک (سایکولوژن cyclogen)	نفیک (وکیوم باتوم)
پایه	*	گیاهی	نفی	نفی
رنگ	*	زرد	زرد	سیاه
بو	*	ندارد	ندارد	ندارد
حلالیت در آب	*	ندارد	ندارد	ندارد
وزن مخصوص در دما ۲۵ درجه سانتیگراد (گرم بر سانتیمتر مکعب)	ASTM D70	۰/۹۸۱	۰/۹۷۲	۱/۰۳۲
درجه اشتعال (درجه سانتیگراد)	ASTM D92	۳۱۵	۲۱۹	۲۸۱
کندروانی کینماتیکی در دما ۱۰۰ درجه سانتیگراد (استوکس)	ASTM D2170	۳۱	۱۱	۱۳
لعب نازک قیر افت حرارتی (درصد)	ASTM D1754	۲/۱	۱/۶	۲/۷

۳-۲-آزمایش های انجام شده

۳-۲-۱-آزمایش آب جوشان

آزمایش آب جوشان^۱، یک آزمایش ساده برای ارزیابی حساسیت مخلوطهای آسفالتی در برابر رطوبت است که با توجه به استاندارد ASTM D3625 انجام می‌گیرد [۲۷]. براساس این استاندارد در حدود ۲۵۰ گرم از نمونه‌های غیرمتراکم از مخلوطهای آسفالتی به آب جوشان اضافه می‌شوند و در حدود ۱۰ دقیقه در همین شرایط قرار داده می‌شوند، سپس نمونه‌ها را به دمای محیط آورده تا خنک شوند. بعد از خنک و خشک شدن نمونه‌ها، آن‌ها را بر روی کاغذ سفید رنگ ریخته و جهت پردازش تصویر، از آن‌ها عکسبرداری می‌شود. کاهش سطح پوشش قیری بعد از آزمایش آب جوشان به عنوان شاخص خرابی رطوبتی ارزیابی می‌شود [۲۸].

۳-۲-۲-آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن (Pull off)

در این تحقیق، آزمایش off-Pull نیز استفاده شده است. در این آزمایش، نمونه‌های قیری تحت شرایط کشش مستقیم برای اندازه‌گیری مقدار چسبندگی قیر به سنگدانه و اندازه‌گیری پیوستگی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این راستا، از دستگاه A-AT test Pose استفاده شد. همچنین، استاندارد ۹۱-AASHTO TP (2015) و (2017) ASTM D4541 برای آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش استفاده گردید. نمونه‌ها

تحت شرایط چند سیکل ذوب و انجماد قرار گرفتند. در آزمایش off-Pull، استاب هایی استفاده می گردد که قیر از یک سو به انتهای استاب میچسبد و از طرف دیگر به سطح سنگدانه می چسبد. در ادامه، نرخ کشش برای اندازه گیری مقدار مقاومت چسبندگی در دستگاه تنظیم می شود و فک دستگاه روی استاب قرار میگیرد. سپس، نمونه بدون اعمال پیچش و با استفاده از نیروی کششی، تحت تنش قرار می گیرد تا گسیختگی صورت پذیرد. نرخ افزایش نیرو باید طوری تنظیم شود که یک حرکت پیوسته ایجاد گردد و گسیختگی در مدت کمتر از ۱۰۰ ثانیه رخ دهد. این نرخ باید کمتر از یک مگاپاسکال بر ثانیه باشد [۲۹]. نرخ افزایش نیرو در این تحقیق ۰/۶۶ مگاپاسکال بر ثانیه بود. عدد مقاومت چسبندگی در آزمایش off-Pull، حداکثر تنشی است که نمونه تا لحظه گسیختگی تحمل می کند.

در این پژوهش، آزمایش off-Pull مطابق شکل (۲) در دو حالت خشک و تر و با ضخامت کم و زیاد قیر انجام شده است. ضخامت زیاد قیر، معادل با گسیختگی در غشای قیر یا گسیختگی پیوستگی و حالت ضخامت کم قیر، معادل با گسیختگی سطح تماس قیر- سنگدانه یا گسیختگی چسبندگی است.

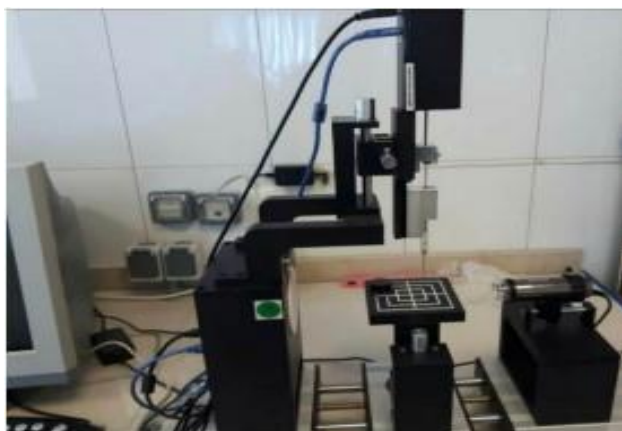


شکل ۲- قرارگیری نمونه ها در آزمایش PULL OFF

۳-۲-۳- آزمایش زاویه تماس (Sessile Drop)

برای اندازه گیری زاویه تماس دو روش وجود دارد: در روش غیر مستقیم زاویه تماس با اندازه گیری نیرو (مانند روش Wilhelmy به دست می آید. در روش های مستقیم زاویه تماس از روی تصویر (مثل روش Sessile Drop) اندازه گیری می شود. از بین این روش ها، روش های مستقیم به علت دقت بالاتر و نیاز به حجم کمتری از مایع، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. روش های Sessile Drop و صفحه شیب دار دو روش اصلی برای اندازه گیری زاویه تماس دینامیک هستند. در روش Sessile Drop (شکل ۳) ابتدا قطره روی یک نمونه افقی تزریق می شود، تزریق ادامه پیدا می کند و زاویه تماس حین حرکت خط تماس اندازه گیری می شود (زاویه تماس پیشروی). عکس این حرکت برای اندازه گیری زاویه تماس پسروی انجام می شود. برای یک سطح صاف همگن، انرژی آزاد سطح با نوشتن معادله حالت از طریق روش Sessile Drop به

دست می آید. در روش صفحه شیب دار، وقتی قطره روی سطح قرار گرفت نگه دارنده نمونه را (همراه نمونه) کج می کنیم. به محض اینکه قطره شروع به لغزش روی سطح کرد زاویه پیشروی و زاویه پسروی را ثبت می کنیم [۲۶].



شکل ۳- دستگاه اندازه گیری زاویه تماس

اندازه گیری مؤلفه های انرژی آزاد سطحی با استفاده از روش قطره چسبیده یکی از روشهای متداولی است که امروزه برای مواد جامد مورد استفاده قرار میگیرد. این روش را هم می توان برای سنگدانه و هم برای قیر (به صورت جامد) مورد استفاده قرار داد، به شرطی که مؤلفه های انرژی آزاد سطحی سنگدانه کوچک باشد. سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش دارای مؤلفه های انرژی آزاد سطحی بزرگ هستند که این روش برای اندازه گیری اجزای انرژی آزاد سطحی آنها مناسب نیست.

۴- نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده از آزمایشات مختلف بر روی مخلوطهای آسفالتی بازیافتی حاوی درصدهای متفاوت تراشه های مختلف از راه های شهری در دو استان مازندران و گلستان و بزرگراه های همت و بابایی و سه جوانساز روغن آفتابگردان، سایکلوژن و وکیوم باتوم ارایه می شود.

۴-۱- آزمایش آب جوشان

نتایج بدست آمده از پردازش تصویر^۱ نمونه های آسفالتی غیرمترکم بعد از آزمایش آب جوشان در شکل (۴) نشان داده شده است. تصاویر نشان می دهند که نقاط زرد رنگ در نمونه های آسفالتی با تراشه راه های استان مازندران نسبت به نمونه های استان گلستان و بزرگراه های همت و بابایی کمتر می باشد. همچنین در جدول (۴) درصد مقدار پوشش^۲ قیری بر روی سطح سنگدانه ها ارایه شده است که با مقایسه تصاویر شکل (۴) و نتایج این جدول می توان بیان کرد که هر چه درصد کانی CaO در تراشه ها بیشتر باشد، مخلوطهای آسفالتی مقاومت بیشتری در برابر رطوبت دارد. علاوه بر این با مقایسه تراشه های استان گلستان و بزرگراه های همت و بابایی، می توان پی برد که هر چه مقادیر SiO_2 کمتر باشد، مقاومت در برابر خرابی رطوبتی بیشتر می باشد

^۱ Image Processing

^۲ coating

[۲۷]. همانطور که از نتایج جدول ۵ مشخص است؛ نمونه‌ها با سنگدانه آهکی دارای بالاترین سطح پوشش سنگدانه (۸۰/۶۱۸ درصد) و سنگدانه‌های سیلیسی با سطح پوشش ۵۱/۳۴۰ درصد کمترین میزان سطح پوشش را پس از انجام آزمایش آب جوشان نتیجه دادند.

جدول ۵- نتایج پردازش تصویر سنگدانه‌ها بعد از آزمایش آب جوشان

نوع تراشه	درصد سطح پوشش سنگدانه‌ها	شاخص تحلیل تصویری پوشش	ماهیت مصالح (XRD)
M-B	۸۰/۶۱۸	زیاد	آهکی
G-G	۵۱/۳۴۰	کم	سیلیسی
T-H	۷۶/۵۰۴	متوسط	ترکیبی
T-B	۷۹/۳۱۱	متوسط	ترکیبی

تراشه

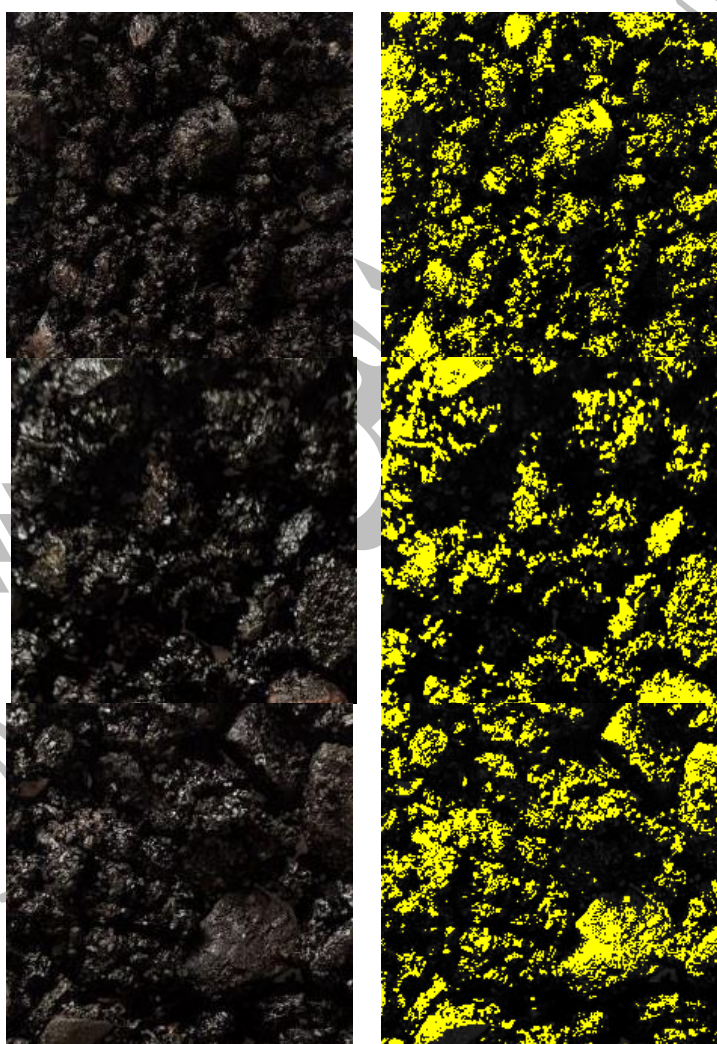
نمونه بعد از آزمایش جوشان

پردازش تصویر

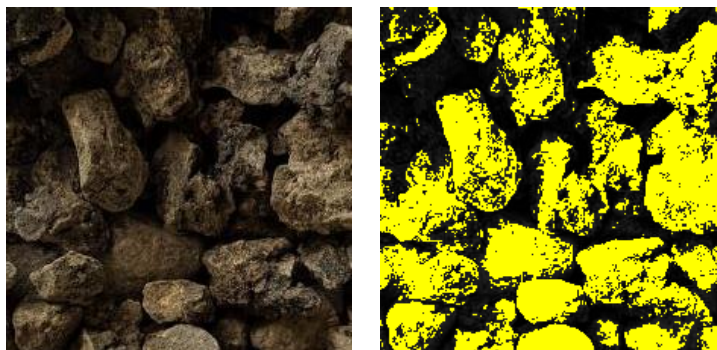
M-B

T-B

T-H



G-G



شکل ۴- پردازش تصویر نمونه‌ها بعد از آزمایش آب جوشان

۴-۲- آزمایش PULL OFF

در جداول ۶ و ۷ به ترتیب نتایج مقاومت چسبندگی و مقاومت پیوستگی پول آف ترکیبات ساخته شده در شرایط خشک و مرطوب ارائه شده است. دمای انجام آزمایش ۲۵ درجه سانتیگراد است. نرخ بارگذاری که یک پارامتر مهم در آزمایش‌های ارزیابی مقاومت کششی می‌باشد، ثابت فرض شده است. نرخ بارگذاری ۰/۷ مگاپاسکال بر ثانیه است. در این راستا، از دستگاه A-AT test Pose استفاده شد. همچنین، استاندارد ۹۱- AASHTO TP (2015) و (2017) ASTM D4541 برای آماده سازی نمونه ها و انجام آزمایش استفاده گردید. نمونه ها تحت شرایط چند سیکل ذوب و انجماد قرار گرفتند. در آزمایش off-Pull، استاب هایی استفاده می‌گردد که قیر از یک سو به انتهای استاب می‌چسبد و از طرف دیگر به سطح سنگدانه می‌چسبد. در ادامه، نرخ کشش برای اندازه گیری مقدار مقاومت چسبندگی در دستگاه تنظیم می‌شود و فک دستگاه روی استاب قرار می‌گیرد. سپس، نمونه بدون اعمال پیچش و با استفاده از نیروی کششی، تحت تنش قرار می‌گیرد تا گسیختگی صورت پذیرد. نرخ افزایش نیرو باید طوری تنظیم شود که یک حرکت پیوسته ایجاد گردد و گسیختگی در مدت کمتر از ۱۰۰ ثانیه رخ دهد. این نرخ باید کمتر از یک مگاپاسکال بر ثانیه باشد (۴۵۴۱ ASTM D ۲۰۱۷). (نرخ افزایش نیرو در این تحقیق ۰/۶۶ مگاپاسکال بر ثانیه بود. عدد مقاومت چسبندگی در آزمایش off-Pull، حداکثر تنشی است که نمونه تا لحظه گسیختگی تحمل می‌کند.

همان طور که از نتایج پیداست سنگ آهک در هر دو شرایط خشک و تر و در هر چهار نوع سنگدانه دارای مقادیر چسبندگی و پیوستگی بیشتری با قیر پایه می باشد. اما با اضافه شدن جوانساز مقاومت چسبندگی و پیوستگی در حالت خشک در سنگ آهک کاهش و در حالت تر افزایش می یابد. همچنین مقادیر مقاومت چسبندگی و پیوستگی نمونه‌های اصلاح شده با انواع جوانساز دارای مقادیر چسبندگی و پیوستگی بیشتری می باشد. علاوه بر این، در بین مواد جوانساز، نمونه های اصلاح سده با سایکلوژن دارای بیشترین مقدار چسبندگی و پیوستگی می باشد [۳۰]. بنابراین می توان بیان کرد که افزودن جوانسازها به قیرهای بازیافتی می تواند تأثیر قابل توجهی بر افزایش چسبندگی داشته باشد. مقادیر مقاومت چسبندگی و پیوستگی برای هر نمونه به صورت دقیق اندازه گیری و ثبت شد، و تجزیه و تحلیل داده ها نشان داد که استفاده از تراشه های بازیافتی با در صدهای مختلف و جوان سازهای متفاوت، می تواند به بهبود عملکرد آسفالت در برابر نیروهای کششی کمک کند.

حالت	مصالح سنگی	قیر PG 64-10	قیر با جوانساز گیاهی	قیر با سایکلوژن	قیر با وکیوم باتوم
خشک	M-B	۲/۸	۳/۰	۳/۸	۳/۶
	T-H	۲/۵	۳/۲	۳/۸	۳/۵
	T-B	۲/۴	۳/۲	۳/۸	۳/۵
	G-G	۲/۳	۳/۳	۳/۸	۳/۵
تر	M-B	۲/۰	۲/۷	۳/۵	۳/۳
	T-H	۱/۶	۲/۶	۳/۲	۳/۱
	T-B	۱/۵	۲/۶	۳/۲	۳/۰
	G-G	۱/۴	۲/۵	۳/۱	۲/۹

جدول ۷- مقاومت پیوستگی (کیلو پاسکال) در آزمایش چسبندگی PULL OFF

حالت	مصالح سنگی	قیر PG 64-10	قیر با جوانساز گیاهی	قیر با سایکلوژن	قیر با وکیوم باتوم
خشک	M-B	۴/۰	۴/۵	۴/۹	۴/۷
	T-H	۳/۹	۴/۶	۵/۰	۴/۸
	T-B	۳/۹	۴/۷	۵/۱	۴/۸
	G-G	۳/۸	۴/۸	۵/۲	۵/۰
تر	M-B	۳/۲	۳/۸	۴/۵	۴/۳
	T-H	۲/۸	۳/۶	۴/۲	۴/۲
	T-B	۲/۶	۳/۵	۴/۰	۴/۱
	G-G	۲/۴	۳/۴	۳/۸	۴/۰

۴-۳- انرژی آزاد سطحی قیر

برای اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی قیر در روش قطره چسبنده، ابتدا باید زاویه تماس سه مایع آزمایش با قیر مورد نظر اندازه گیری شود. برای اینکه بتوان مولفه های انرژی آزاد سطحی قیر را از روی زوایای تماس با مایع های آزمایش تعیین کرد، باید از مایع هایی استفاده نمود که مولفه های انرژی آزاد سطحی آن ها معلوم باشد. معمولاً برای اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی با روش زاویه تماس از یک ماده قطبی، یک ماده غیرقطبی و یک ماده نیمه قطبی استفاده میشود که این مواد در این پژوهش به ترتیب آب، دی یدومتان و اتیلن گلیکول بوده اند. مولفه های انرژی آزاد سطحی مایع های آزمایش مورد نظر در این پژوهش در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸- مایعات آزمایش به همراه اجزای انرژی آزاد سطحی آنها

مایعات آزمایش	مولفه قطبی Γ_L^{AB}	مولفه بازی Γ_L^{-}	مولفه اسیدی Γ_L^{+}	مولفه غیرقطبی Γ_L^{LW}	مولفه کل Γ_L^{total}
آب	۵۱/۰	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۱/۸	۷۲/۸
دی یدومتان	۰	۰	۰	۵۰/۸	۵۰/۸
اتیلن گلیکول	۱۹/۱	۳۱/۳	۲/۳۴	۲۹/۰	۴۸/۲۹

پوشش دهی یکی از توانایی های مایع ها در تماس با سطح جامد میباشد که با زاویه تماس ارتباط دارد. این پارامتر در نتیجه تماس دو ماده که در کنار یکدیگر قرار گرفته اند، اندازه گیری می شود. اگرچه این مفهوم

معنای متفاوتی با چسبندگی دارد اما براساس نظر بعضی پژوهشگران میتواند شرایط الزم برای ایجاد چسبندگی مناسب را فراهم کند. هر چه زاویه تماس جسم مایع بر روی سطح جامد کمتر باشد نشان دهنده این است که قابلیت پوشش دهی آن ماده بهتر است. معمولاً زوایای تماس کمتر از ۹۰ درجه را به عنوان پوشش پذیری خوب و زوایای تماس بزرگتر از ۹۰ درجه را به عنوان پوشش پذیری ضعیف در نظر می‌گیرند. همانطور که از داده‌های جدول (۹) مشاهده میشود، مایع‌های آزمایش روی قیر اصلاح شده با جوانساز دارای زاویه تماس‌های کوچکتری نسبت به قیر پایه هستند. این رخداد مورد انتظار بود، زیرا جوانسازها سبب کاهش کندروانی و افزایش درجه نفوذ و قابلیت روانی می‌شوند که این پارامتر میتواند در پوشش پذیری موثر باشد. البته ساختار قیر و نوع مایع مورد استفاده در تعیین پوشش دهی تعیین کننده است.

جدول ۹- اجزای انرژی آزاد سطحی قیر پایه و اصلاح شده به همراه زوایای تماس آنها با مایعات آزمایش.

مشخصات	قیر پایه	قیر + جوانساز R1	قیر + جوانساز R2	قیر + جوانساز R3
زاویه تماس با آب	۱۲۶/۶۷	۱۲۳/۲۰	۱۱۷/۴۰	۱۲۰/۴۴
زاویه تماس با دی پدومتان	۱۱۶/۳۳	۱۱۲/۴۳	۱۰۹/۶۳	۱۱۱/۳۹
زاویه تماس با اتیلن گلیکول	۱۱۳/۷۲	۱۰۹/۷۸	۱۰۵/۵۸	۱۰۷/۶۸
انرژی آزاد سطحی کل (mJ/m^2)	۱۴/۹۴	۲۰/۶۵	۲۶/۱۵	۲۳/۹۴
انرژی آزاد غیرقطبی (mJ/m^2)	۱۳/۲۳	۱۸/۷۸	۲۳/۷۸	۲۰/۵۳
انرژی آزاد قطبی (mJ/m^2)	۲/۱۱	۲/۱۷	۲/۶۷	۲/۴۴
مولفه اسیدی انرژی آزاد سطحی (mJ/m^2)	۲/۲۵	۱/۹۵	۱/۸۲	۱/۹۰
مولفه بازی انرژی آزاد سطحی (mJ/m^2)	۰/۴۳	۰/۶۴	۰/۹۴	۰/۷۸

انرژی آزاد کل پارامتری با تاثیر دوگانه به شمار می‌آید زیرا افزایش آن سبب بهبود مقاومت در برابر خرابی خستگی از نوع پیوستگی شده که یک اثر مثبت در کاهش گسیختگی پیوستگی به شمار می‌آید و از طرفی باعث کاهش در پوشش پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه می‌شود که برای ایجاد چسبندگی مناسب بین قیر-سنگدانه نامطلوب است. زیرا افزایش در پوشش پذیری سبب میشود تا سطح تماس بیشتری از سنگدانه توسط قیر پوشش داده شود که میتواند به موثر بودن چسبندگی مناسب بین قیر و سنگدانه کمک کند. نتایج اندازه گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نشان میدهد که قیر اصلاح شده با جوانساز دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در مقایسه با قیر پایه است که باعث میشود تا این قیر گسیختگی پیوستگی کمتری را در مقایسه با قیر پایه تجربه کند. همانطور که از داده‌های ارائه شده در جدول مشخص است، مولفه قطبی قیر در مقایسه با مولفه غیرقطبی آن بسیار کوچک است. حتی دیده شده است، در بعضی از تحقیقات مولفه قطبی قیر برابر با صفر محاسبه شده است. براین اساس میتوان گفت قیر یک ماده با خصوصیات قطبی ضعیف است که پیوند آن با سایر مواد نیز عمدتاً از طریق مولفه غیرقطبی و پیوندهای کوالانسی می‌باشد. اندازه‌گیری‌های انرژی آزاد سطحی قیر از نمونه‌های مختلف نشان دهنده تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای بود. قیرهای اصلاح شده با جوانساز نشان دادند که دارای انرژی آزاد سطحی بالاتری هستند که این امر میتواند به معنای بهبود خواص چسبندگی و کاهش احتمال گسیختگی در بین

سنگدانه‌ها با شد. مقایسه نتایج با داده‌های موجود در ادبیات نشان داد که افزایش در صد جواز ساز به طور مؤثری بر افزایش پایداری و کارایی آسفالت تأثیر می‌گذارد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۲۳، که بر روی اثرات مختلف مواد جواز ساز بر روی خصوصیات مکانیکی و دوام آسفالت تمرکز داشت، مشخص شد که استفاده از جواز سازهای بر پایه روغن‌های گیاهی می‌تواند به طور مؤثری مقاومت در برابر ترک خوردگی و خستگی را بهبود بخشد. این نتایج با یافته‌های مطالعه حاضر که نشان دهنده بهبود عملکرد آسفالت با استفاده از ترکیبات جواز ساز و تراشه‌های بازیافتی است، هم‌راستا هستند [۱].

در سال ۲۰۲۴، مطالعاتی که بر روی تأثیر تراشه‌های بازیافتی بر خواص فیزیکی و شیمیایی آسفالت تمرکز داشتند، نشان دادند که در صد بالایی از تراشه می‌تواند منجر به کاهش انعطاف‌پذیری و افزایش شکنندگی مخلوط شود. این یافته‌ها تا حدی با نتایج این مطالعه متفاوت است که نشان می‌دهد با استفاده از نسبت‌های مناسب و جواز سازهای انتخابی، می‌توان اثرات منفی ناشی از استفاده بیش از حد تراشه‌ها را کاهش داد [۳۱].

۵- نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر به صورت اختصار در ادامه بیان شده است:

- با توجه به نتایج آزمایش آب جوشان و پردازش تصویر نمونه‌های آسفالتی غیرمتراکم، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های آسفالتی با تراشه آهکی نسبت به نمونه‌های گرانیته دارای نقاط زرد کمتری هستند. به عبارت دیگر ترکیب‌های با مقادیر بیشتر CaO و کمتر SiO_2 در تراشه‌ها، موجب افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در مقابل عوامل خرابی رطوبتی می‌شوند.
- نمونه‌ها با سنگدانه آهکی دارای بالاترین سطح پوشش سنگدانه (۸۰/۶۱۸ درصد) و سنگدانه‌های سیلیسی با سطح پوشش ۵۱/۳۴۰ درصد کمترین میزان سطح پوشش را پس از انجام آزمایش آب جوشان نتیجه دادند.
- با بررسی نتایج آزمایش PULL OFF می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از جواز سازها، به ویژه سایکلوزن، در اصلاح سطح سنگ آهک منجر به افزایش قابلیت چسبندگی و پیوستگی می‌شود. این موارد می‌توانند در بهبود عملکرد مصالح سنگی مورد استفاده قرار گیرند.
- نتایج اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده با جواز ساز دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در مقایسه با قیر پایه است که باعث می‌شود تا این قیر گسیختگی پیوستگی کمتری را در مقایسه با قیر پایه تجربه کند.

مراجع

- [1] H. Ziari, B. Mojaradi, S. A. Saadatjoo, A. Amini, V. Najafi Moghaddam Gilani, and S. M. Hosseinian, "Laboratory investigation of reclaimed asphalt mixtures containing cyclogen and vacuum bottom rejuvenators," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2023, 2023.

- [2] R. Fariman, S. A. Hosseini, and M. Fakhri, "Developing a prediction model for rutting depth of warm mix asphalt mixture using neural network," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 1–16, 2023 (In Persian).
- [3] H. Nabizadeh, H. F. Haghshenas, Y.-R. Kim, and F. T. S. Aragão, "Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 152, pp. 65–73, 2017.
- [4] T. Mattinzioli, F. Moreno, M. Rubio, and G. Martínez, "LCA and cost comparative analysis of half-warm mix asphalts with varying degrees of RAP," in *Pavement, Roadway, Bridg. Life Cycle Assess.* 2020, Proceedings of the International Symposium on Pavement. Roadway, Bridg. Life Cycle Assess. 2020, Sacramento, CA, Jun. 2020, CRC Press, 2020, p. 354.
- [5] A. Sarhangi, F. Omidinasab, and A. Dalvand, "Evaluation of mechanical properties of concrete by replacing natural aggregates with fine and coarse recycled aggregates," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 87–110, 2023 (In Persian).
- [6] R. Ghabchi, D. Singh, and M. Zaman, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixes containing RAP and different types of aggregates and asphalt binders using the surface free energy method," *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 479–489, 2014.
- [7] 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. 35, no. 9, pp. 890–895, 2017.
- [8] A. Moniri et al., "Laboratory study of the effect of oil-based recycling agents on high RAP asphalt mixtures," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 22, no. 11, pp. 1423–1434, 2021.
- [9] M. Fakhri and A. Ahmadi, "Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 748–756, 2017.
- [10] N. H. Tran, A. Taylor, and R. Willis, "Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents," *NCAT report*, no. 1, pp. 12–05, 2012.
- [11] D. Singh, S. F. Chitragar, and P. K. Ashish, "Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 1145–1153, 2017.
- [12] S. Yan, C. Zhou, and J. Ouyang, "Rejuvenation effect of waste cooking oil on the adhesion characteristics of aged asphalt to aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 327, p. 126907, 2022.

- [13] Y. Fang et al., "Comprehensive review on the application of bio-rejuvenator in the regeneration of waste asphalt materials," *Construction and Building Materials*, vol. 295, p. 123631, 2021.
- [14] Z. Xie et al., "Performance of asphalt mixtures with high recycled contents using rejuvenators and warm-mix additive: field and lab experiments," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 29, no. 10, p. 04017190, 2017.
- [15] F. Zhou, C. Estakhri, and T. Scullion, "Literature review: performance of RAP/RAS mixes and new direction," *Texas Department of Transportation, Research and Technology Implementation Office*, 2014.
- [16] M. Zahoor et al., "Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 278, p. 123304, 2021.
- [17] J. Ji, H. Yao, Z. Suo, Z. You, H. Li, S. Xu, and L. Sun, "Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, p. D4016003, 2017.
- [18] N. Tran, A. Taylor, P. Turner, C. Holmes, and L. Porot, "Effect of rejuvenator on performance characteristics of high RAP mixture," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, pp. 183–208, 2017.
- [19] W. S. Mogawer, A. Booshehrian, S. Vahidi, A. J. Austerman, "Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, pp. 193–213, 2013. doi:10.1080/14680629.2013.812836.
- [20] L. Uzarowsk, H. Prilesky, E. Berube, V. Henderson, and R. Rizvi, "Laboratory Testing of Vancouver HMA Mixes Containing Recycled Asphalt Shingles," *Transportation Association of Canada*, Halifax, Nov. Scotia, 2010.
- [21] X. Jia, B. Huang, J. A. Moore, and S. Zhao, "Influence of waste engine oil on asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, p. 4015042, 2015.
- [22] S. Im, P. Karki, and F. Zhou, "Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators," *Construction and Building Materials*, vol. 115, pp. 727–734, 2016.
- [23] H. Taherkhani and F. Noorian, "Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP)," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, pp. 1238–1257, 2020.
- [24] Z. H. Al Saffar, H. Yaacob, M. K. Idham, M. K. Saleem, J. A. U. C. Lai, R. Putra Jaya, "A review on rejuvenating materials used with reclaimed hot mix asphalt," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2020.

- [25] L. Chatergoon, R. Whiting, and C. Smith, "Improved methods for separation and chromatographic analysis of natural asphalts," *Analyst*, vol. 117, no. 12, pp. 1869–1873, 1992.
- [26] H. Behbahani, G. H. Hamed, and V. M. Gilani, "Evaluating the surface free energy and moisture susceptibility of modified asphalt mixtures with nano hydrated lime under saturated conditions with deicer materials and distilled water," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 97, pp. 791–798, 2020.
- [27] V. N. M. Gilani, S. M. Hosseini, H. Behbahani, and G. H. Hamed, "Prediction and pareto-based multi-objective optimization of moisture and fatigue damages of asphalt mixtures modified with nano hydrated lime," *Construction and Building Materials*, vol. 261, p. 120509, 2020.
- [28] V. N. M. Gilani, S. M. Hosseini, D. Safari, and G. H. Hamed, "Presentation of predictive models for two-objective optimization of moisture and fatigue damages caused by deicers in asphalt mixtures," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 49, no. 6, pp. 4437–4458, 2021.
- [29] N. Mukhtar, M. R. M. Hasan, K. A. Shariff, and W. Van Den Bergh, "Relationship between the physicochemical and electrostatic charge characteristics of filler materials on the morphological and adhesive Pull-Off tensile strength of asphalt mastics," *Construction and Building Materials*, vol. 346, p. 128343, 2022.
- [30] G. H. Hamed, M. R. Esmaeili, V. N. M. Najafi Moghaddam Gilani, and S. M. Hosseini, "The effect of aggregate-forming minerals on thermodynamic parameters using surface free energy concept and its relationship with the moisture susceptibility of asphalt mixtures," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, pp. 1–15.
- [31] P. Yin, F. Liu, Z. Li, B. Pan, and T. Liu, "Evaluation on the Adhesion Property of Recycled Asphalt Based on the Multi-Scale Experiments," *Buildings*, vol. 14, no. 8, p. 2365, 2024.

واژه نامه

Cyclogen

سایکولوژن

RAP

تراشه‌ی آسفالت بازیافتی

Pull-off Test

آزمایش کشش چسبندگی