ارتباط شاخص‌های شیمیایی قیر با عملکرد خستگی و ترمیم مخلوط آسفالتی بازیافتی با استفاده از روغن ضایعاتی و پلیمر

اصغر ملامحمدی، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

سعید حسامی*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

Email: s.hesami@nit.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱ – پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

چکیده

مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی، به‌علت پیرشدگی، از اجزای مولکولی سنگین بیشتری تشکیل یافته، که قابلیت تحرک مولکولی و ترمیم آسفالت را کاهش می‌دهند. استفاده از مواد جوان‌ساز دارای اجزای مولکولی سبک در بهبود خصوصیات خستگی و ترمیم‌شوندگی، و همچنین استفاده از پلیمر جهت جلوگیری از پدیده شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای زیاد می‌تواند مؤثر باشد. در این پژوهش، رفتار خستگی و ترمیم مخلوط آسفالتی بازیافتی با استفاده از روغن ضایعاتی و پلیمر استایرن بوتادین استایرن ارزیابی شد. برای بررسی آنالیز شیمیایی از روش کروماتوگرافی و برای رفتار خستگی و ترمیم مخلوط آسفالتی از آزمایش تیر خمش چهارنقطه‌ای (4PBBT) استفاده شد. نتایج آزمایش‌های خستگی نشان داد که روغن و ترکیب روغن و پلیمر به‌ترتیب باعث افزایش ۶ و ۳/۵ برابری عمر خستگی مخلوط بازیافتی شده است. آنالیز همبستگی بین اجزای شیمیایی و عمر خستگی و ترمیم مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که بین میزان ترمیم‌شوندگی و مقادیر شاخص‌های شیمیایی قیر ارتباط معنی‌داری وجود دارد. میزان همبستگی پارامترهای شیمیایی شامل شاخص کلوئیدی، مجموع مولکول‌های سنگین قیر- یعنی آسفالتین به‌اضافه رزین- و همچنین نسبت اجزای سبک- یعنی نسبت اشباع‌کننده به آروماتیک- و همچنین مقدار ترمیم‌شوندگی در سطح کرنش ۴۰۰ میکرواسترین به‌ترتیب ۰/۹۶۷، ۰/۹۴۳ و ۰/۹۷۹ بود. بر اساس نتایج، هرچه مقدار اجزای سنگین قیر، شامل آسفالتین و رزین، در مخلوط آسفالتی بیشتر شود، وزن مولکولی آسفالت افزایش یافته و توانایی ترمیم‌شوندگی کم می‌شود. افزودن موادی که اجزای سبک (آروماتیک) بیشتری دارند، به‌خصوص روغن، در افزایش ترمیم‌شوندگی آسفالت بسیار مهم است. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی ارتباط معنی‌داری با شاخص کلوئیدی نداشت.

واژه‌های کلیدی: عمر خستگی، SBS، روغن خوراکی ضایعاتی، SARA، نرخ ترمیم

۱. مقدمه

در حال حاضر، اکثر زیرساخت‌های کشور از روسازی آسفالتی تشکیل شده است. استفاده مجدد از این منابع گامی بسیار مفید در جهت حفاظت از محیط‌زیست می‌باشد. قیر، از نظر ترکیبات شیمیایی، از دو جزء آسفالتین و مالتین (شامل اشباع‌شده، آروماتیک و رزین)تشکیل شده است. در طی پیرشدگی قیر، ابتدا گرما باعث جداشدگی روغن‌ها از قیر می‌شود. بخشی از روغن‌ها به‌صورت فرار در آمده و بخش دیگر به رزین تبدیل می‌شوند. سپس اکسیژن به داخل سیستم نفوذ کرده، و باعث تبدیل رزین به مولکول‌های بسیار قطبی بنام آسفالتین می‌شود. در نتیجه، مقدار آسفالتین در قیر پیرشده افزایش می‌یابد (خوزه و همکاران، ۲۰۱۹). افزودن جوان‌ساز به قیر پیرشده باعث کاهش نسبت آسفالتین به مالتین و بازیابی خصوصیات اولیه قیر می‌شود.

استفاده از مواد جوان‌ساز تاریخچه‌ای بیش از ۵۰ سال دارد. در طی سالیان اخیر، مطالعات متعددی در خصوص استفاده از مواد روغنی ضایعاتی و غیرضایعاتی، جهت جوان‌سازی و بهبود عملکرد قیر و مخلوط‌های بازیافتی صورت گرفته است. ضعف در برابر خستگی و ترک‌خوردگی حرارتی با استفاده از روغن‌های جوان‌ساز و قیر تازه تا حدود زیادی قابل جبران است که نتایج تحقیقات حاکی از تأثیر بیشتر جوان‌ساز دارد (کثیر و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، جوان‌سازها عملکرد دمای میانی و کم را بهبود می‌بخشند. عملکرد خستگی در مدت زمان طولانی پس از ساخت حائز اهمیت می‌باشد.

مخلوط آسفالتی بازیافتی به‌دلیل استفاده مجدد در چرخه عملکرد طولانی مدت آنها نیاز به بررسی بیشتر دارد. همچنین، فقدان مطالعات در زمینه بازگشت سفتی یا نرخ ترمیم مخلوط بازیافتی بر مبنای اجزای تشکیل-دهنده قیر بازیافتی بعد از جوان‌سازی و تأثیر شیمیایی این بازیابی بر عملکرد خستگی و ترمیم مخلوط آسفالتی نیز مشهود است (تقوی و همکاران، ۲۰۱۸). بر این اساس، در این پژوهش، از جوان‌ساز حاوی روغن گیاهی ضایعاتی در احیاء و بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی بازیافتی استفاده شد. نتایج آزمایش شیمیایی کروماتوگرافی و همچنین ارتباط آن با نرخ ترمیم در دوره استراحت، علاوه بر رفتار خستگی در مخلوط‌های حاوی مقادیر زیاد خرده آسفالت، روغن ضایعاتی و پلیمر SBS نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مروری بر ادبیات تحقیق

امروزه، شرکت‌های حمل‌ونقل و تولید کننده مخلوط‌های آسفالتی، برای حفظ منابع طبیعی بکر، متقاعد شده‌اند که از روسازی آسفالت مخلوط بازیافتی در طراحی مخلوط آسفالت استفاده کنند (موگاور و همکاران، ۲۰۱۶). زومانیس و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقات خود نشان دادند که استفاده از مخلوط حاوی ۱۰۰٪ مصالح بازیافتی منجر به کاهش قیمت ٪۵۰ تا ٪۷۰ در مخلوط آسفالتی می‌شود.

سالانه مقدار زیادی روغن پخت و پز دور ریخته می‌شود. این روغن‌های ضایعاتی اثر سوء بر محیط‌زیست داشته و استفاده از آن‌ها در کنار قیر و مخلوط بازیافتی می‌تواند گامی بلند در جهت حفاظت از محیط‌زیست باشد. وِن و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی، به بررسی تأثیر روغن خوراکی ضایعاتی[1] بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از روغن، مقدار مدول سفتی مخلوط آسفالتی و مدول برشی مختلط قیر را کاهش داده و در نتیجه باعث بهبود مقاومت در برابر ترک‌خوردگی خستگی می‌شود. گنگ و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر حاوی روغن خوراکی ضایعاتی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، ابتدا درصد بهینه با استفاده از آزمایش‌های سنتی مانند درجه نفوذ، نقطه نرمی و نقطه

[1]- Waste cooking oil

اشتعال تعیین شد. سپس، آزمایش‌های رئولوژیک قیر روی درصد بهینه انجام شد. نتایج این پژوهش به وضوح نشان داد که استفاده از روغن سبب نرم‌تر شدن قیر و افزایش مقاومت آن در برابر ترک‌خوردگی حرارتی می‌شود. همچنین، کارآیی قیر اصلاح‌شده با کاهش ویسکوزیته افزایش می‌یابد. دریایی و همکاران (۲۰۲۰) اثر مثبت پلیمر بازیافتی به همراه جوان‌ساز را بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی میزان زیاد مصالح بازیافتی گزارش کردند. بررسی‌های انجام شده در خصوص استفاده از روغن ضایعاتی خوراکی در مخلوط‌های آسفالتی با مخلوط بازیافتی زیاد نشان داده است که جوان‌کننده روغنی ضایعاتی باعث بهبود مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی، کاهش مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی، و افزایش مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی در دمای کم شده است (محمود ظهور و همکاران ، ۲۰۲۱).

در پژوهشی دیگر، چن و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی خصوصیات رئولوژیک قیرهای پیرشده در دمای زیاد با روغن‌های خوراکی ضایعاتی و روغن دانه کتان پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فاکتور مقاومت در برابر شیارشدگی و مدول برشی مختلط قیرهای جوان‌شده در نتیجه اضافه کردن مواد جوان‌ساز کاهش می‌یابد. قیرهای پیرشده حاوی مقادیر کم روغن، به راحتی می‌توانند به مقاومت مورد نیاز در برابر شیارشدگی دست یابند. در این زمینه، اخیراً مطالعاتی صورت گرفته و نتایج تحقیق صالح فرد و همکاران (۲۰۲۱) حاکی از ارتباط معنی‌دار میان عمر خستگی تست جاروب دامنه خطی و شاخص کلوئیدی می‌باشد. با این حال، در آن پژوهش، محققین، پیشنهاد بررسی بیشتر را ارائه دادند.

شاخص آسفالتین به‌صورت نسبتی از رزین و آسفالتین به آروماتیک و اشباع‌کننده تعریف می‌شود. بر اساس تحقیقات، شاخص آسفالتین ارتباط معنی‌داری با پارامترهای شیارشدگی قیر در دمای زیاد دارد (منصورخاکی و همکاران، ۲۰۲۰). مطالعات انجام شده در خصوص تأثیر کیفیت روغن بر پتانسیل جوان‌سازی قیر نشان داده است که هرچه مقدار اسید و آب روغن کمتر باشد، کیفیت روغن بهتر بوده و در نتیجه عملکرد رئولوژیک و شیمیایی جوان‌ساز افزایش می‌یابد (محمود ظهور و همکاران ، ۲۰۲۱).

تحقیقات انجام شده در خصوص بهبود خصوصیات قیر اصلاح شده با پلیمر استایرن بوتادین استایرن، پلی-اتیلن و روغن ضایعاتی بیانگر بهبود خصوصیات دمایی زیاد، تغییرشکل‌پذیری کمتر، مقاومت شیارشدگی بیشتر و ریکاوری بهتر می‌باشد (ویهوا لوو، ۲۰۱۷). استفاده از اصلاح‌کننده‌های روغنی تصفیه شده و روغن زیستی نظیر روغن آروماتیک در قیر پایه، هرچند علاوه بر بهبود مقاومت خستگی در سطوح مختلف کرنش باعث کاهش سفتی قیر در همه دماها شد، که می‌تواند در دمای سرویس کم مفید باشد، اما باعث ایجاد کرنش دائمی بزرگ‌تر و در نتیجه حساسیت بیشتر به شیارشدگی شده است.

استفاده از روغن ماهوا[1] که از نوعی درخت در کشور هند تهیه می‌شود، باعث بهبود خصوصیات رئولوژیک و شیمیایی بیندر پیرشده گردیده است. نتایج آزمایش‌های MSCR و LAS نشان داده که استفاده از ۴٪ روغن برای برآورده کردن معیارهای شیارشدگی و خستگی مناسب بوده است. همچنین، نتایج FTIR نشان‌دهنده کاهش شاخص‌های کربنیل و سولفیکسید و در نتیجه بیانگر احیای ویژگی‌های اولیه بیندر بوده است (سوجیت کومار، ۲۰۲۲). استفاده از پلیمر و روغن در بازیابی خصوصیات رئولوژیک قیر و مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی بیانگر اینست که استفاده از پلیمر اگرچه در افزایش مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای زیاد مؤثر است، اما در ترمیم‌شوندگی مخلوط‌های آسفالتی تأثیر

1- Mahua

کمتری نسبت به روغن دارد (حسامی و همکاران، ۲۰۲۲). ون تونگ و همکاران (۲۰۲۱) خصوصیات رئولوژیک قیر جوان‌شده با جوان‌سازهای قیر نرم، سورفکتانت مخلوط گرم و جوان‌ساز زیستی را با استفاده از آزمایش‌های DSR و FTIR مورد ارزیابی قرار دادند. ترکیب درصد مناسبی از قیر پیرشده با روغن‌های جوان‌ساز، بهبود مقاومت در برابر خستگی قیر جوان‌سازی شده را نشان داد. همچنین، تغییرات شاخص‌های گروه‌های عاملی بیانگر اثر بازسازی جوان‌سازها بوده و شاخص سولفیکسید FTIR می‌تواند به‌عنوان شاخص قابل اعتماد برای پیش‌بینی خواص رئولوژیک قیر جوان‌شده استفاده شود. همچنین، همه روغن‌ها روی عملکرد دمایی زیاد بیندر پایه نقش منفی داشته‌اند.

این مطالعه، به منظور برطرف کردن کمبود مطالعات در زمینه تأثیر همزمان ماده جوان‌ساز روغن ضایعاتی خوراکی و پلیمر استایرن بوتادین استایرن بر اصلاح خصوصیات خستگی و ترمیم‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی و همچنین ارتباط شاخص‌های شیمیایی حاصل از آزمایش کروماتوگرافی در قیر با عملکرد خستگی و ترمیم مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی انجام شده است. از آنجایی که بیشترین خرابی روسازی مربوط به خستگی آسفالت است، لذا خستگی و ترمیم مخلوط آسفالتی در دمای میانی مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، در این پژوهش، از جوان‌ساز حاوی روغن گیاهی ضایعاتی و پلیمر در احیاء و بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی بازیافتی استفاده شد. لذا، اهداف تحقیق حاضر به شرح زیر می‌باشد:

الف– تأثیر روغن گیاهی ضایعاتی و پلیمر SBS بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی ضایعاتی جوان شده با روغن ضایعاتی و پلیمر

ب– ارتباط شاخص‌های شیمیایی تست SARA با عملکرد رئولوژیک مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی جوان شده

ج– ارزیابی نرخ ترمیم در دوره استراحت علاوه بر رفتار خستگی در مخلوط‌های حاوی مقادیر زیاد خرده آسفالت حاوی پلیمر و روغن ضایعاتی و بررسی ارتباط بین شاخص‌های شیمیایی و میزان ترمیم‌شوندگی.

۳. روش تحقیق و برنامه آزمایشگاهی

۳-۱. مواد و مصالح

۳-۱-۱. قیر و جوان‌ساز

در این پژوهش، قیر موجود در مصالح خرده آسفالت بازیافتی بر طبق استاندارد استخراج و بازیابی شده و پس از بازیابی کامل، جهت تعیین خصوصیات فیزیکی این قیر آزمایش‌های مختلفی انجام شد. مشخصات اولیه قیر استفاده شده بر طبق گزارش اداره مربوطه، مطابق با قیر با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ بوده است (ASTM D5404، ۲۰۱۷). در این پژوهش، از یک نوع روغن گیاهی ضایعاتی متشکل از چندین دانه روغنی، دارای وزن مخصوص ۰/۹۲ gr/cm^3 و نقطه اشتعال ۲۲۰ درجه سلسیوس، استفاده شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی، مقدار بهینه روغن ضایعاتی ۴٪ وزنی قیر بازیافتی به‌دست آمد. ضمن اینکه مطالعات انجام شده در خصوص روغن خوراکی ضایعاتی نیز مقدار بهینه را ۴٪ تعیین نموده است (ازاهار و همکاران، ۲۰۱۶). به منظور دستیابی به درصد روغن بهینه، ابتدا قیر بازیافتی با درصدهای وزنی مختلف روغن (۲، ۴ و ۶ درصد وزنی قیر) تحت آزمایش‌های عملکردی قرار گرفت. درصدی از روغن که توانسته باشد درجه عملکردی قیر را با قیر پایه PG 64-22 مورد استفاده در این تحقیق یکی نماید به عنوان درصد بهینه انتخاب

گردیده است. درجه عملکردی قیر بازیافتی جوان‌شده با ۴٪ جوان‌ساز معادل قیر پایه گردیده است.

۳-۱-۲. مصالح سنگی و پلیمر

در این تحقیق، دو نوع مصالح سنگی مورد استفاده قرار گرفت. مصالح سنگی جدید که از نوع سنگدانه‌های آهکی و از معدن اسب چران استان تهران در ایران تهیه گردید. همچنین، مخلوط آسفالتی بازیافتی مورد نیاز از جاده هراز در استان مازندران، شمال ایران برداشت شد. دانه‌بندی مصالح سنگی جدید نیز حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ استاندارد نشریه ۲۳۴ (آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران) انتخاب گردید. مصالح سنگی جدید دارای درصد جذب آب۱/۹-۱/۶، سایش لس آنجلس ۲۲٪ و وزن مخصوص kg/m^3 ۲۶۰۰ بوده است. همچنین، مخلوط آسفالتی بازیافتی دارای قیر ۷/۸ درصد، شکست ۹۹٪ و دانسیته غوطه‌وری kg/m^3 ۲۳۶۰ بوده است.

پلیمر استایرن بوتادین استایرن استفاده شده به نام Sol T6302 از نوع کوپلیمر خطی دارای۳۰٪ استایرن و ۷۰٪ بوتادین می‌باشد. پلیمر فوق دارای وزن مخصوص g/cm^3 ۰/۷۹۲، مقاومت کششی Mpa ۲۰ و ویسکوزیته بروکفیلد Pa.s ۴ می‌باشد.

۳-۲. ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق، چهار نوع قیر مورد بررسی قرار گرفته است. نخست، قیر کنترل یا پایه و دوم قیر بازیافتی است. در حالت سوم، قیر بازیافتی حدود ۲۰ دقیقه در دمای حدود ۱۴۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شده و سپس روغن ضایعاتی به مدت ۱۰ دقیقه با قیر بازیافتی ترکیب شد. در حالت چهارم، نیمی از قیر متشکل از قیر پایه با ۴٪ پلیمر بوده و در نیمی دیگر قیر بازیافتی اصلاح شده با روغن جایگزین می‌گردد. برای ساختن این نوع قیر، ابتدا قیر شاهد با ۴٪ پلیمر توسط یک مخلوط‌کن با برش زیاد در ۴۵۰۰ دور در دقیقه در ۱۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شد. سپس قیر اصلاح شده با پلیمر با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه با قیر جوان‌سازی شده مخلوط شد. نمادهای BA، RA، RAO و همچنین RAO+SBS به‌ترتیب نشان‌دهنده قیر پایه، قیر بازیافتی، قیر بازیافتی حاوی روغن، و قیر بازیافتی اصلاح شده با روغن و پلیمر می‌باشند. چهار نوع مخلوط آسفالتی در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت. نخست مخلوط آسفالتی تازه بوده که از اختلاط مصالح سنگی تازه با ۴/۹ درصد قیر تازه تهیه شد. دوم، مخلوط آسفالت ضایعاتی بدون جوان‌ساز، حالت سوم مخلوط آسفالتی که در آن ۱۰۰٪ مخلوط آسفالتی بازیافتی با ۴٪ وزنی روغن جوان‌سازی شده است. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا مخلوط آسفالتی بازیافتی در دمای ۱۵۳ درجه سلسیوس به مدت دو ساعت گرم و مخلوط شد. سپس، درصد بهینه جوان‌ساز افزوده شد. برای اطمینان از جوان‌سازی کامل، تمامی نمونه‌های جوان‌سازی شده به مدت دو ساعت در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند (منیری و همکاران، ۲۰۱۹). حالت چهارم نیز مخلوطی است که ۵۰٪ آن مصالح سنگی جدید و قیر جدید اصلاح شده با پلیمر بوده و ۵۰٪ دیگر آن مخلوط آسفالتی بازیافتی می‌باشد. سنگدانه‌های جدید که دو ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس قرار داشتند با مخلوط آسفالتی بازیافتی ترکیب و پس از آن قیر پلیمری به مخلوط اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه اختلاط انجام گرفت. در مخلوط‌های حاوی جوان‌کننده، عامل جوان‌ساز به طور مستقیم به قیر جدید اضافه شد. سپس نمونه‌های دال با دستگاه تراکم غلتکی با فضای خالی ۳-۵ درصد ساخته شد و تیرچه‌هایی به ابعاد استاندارد از شش جهت برش داده شد. نمادهای BM، RM، RMO و همچنین RMO+SBS به‌ترتیب معرف مخلوط آسفالتی تازه، مخلوط آسفالتی بازیافتی، مخلوط بازیافتی

جوان‌شده با روعن، و مخلوط آسفالت بازیافتی حوان‌شده با روغن و پلیمر می‌باشد.

۳-۳. تست SARA

قیر یک سیستم کلوئیدی شامل مالتین (رزین، آروماتیک و اشباع‌کننده) و آسفالتین‌هاست. مهمترین جزء سیستم کلوئیدی قیر، آسفالتین است که مقدار و واکنش آن با مالتین، خصوصیات رئولوژیک قیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور تعیین واکنش بین اجزای مختلف قیر و بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن، از شاخص کلوئیدی Ic[1] استفاده می‌شود که برابر است با نسبت مجموع آسفالتین به‌اضافه اشباع‌کننده، تقسیم بر مجموع رزین به‌اضافه آروماتیک در قیر. الزامات شاخص مربوطه در جدول ۱ آورده شده است (اولیور، ۲۰۰۹). همچنین، مقدار As + R (مجموع آسفالتین به‌اضافه رزین) و نسبت اشباع‌کننده به آروماتیک، یعنی S/Ar نیز در توصیف ترمیم‌شوندگی قیر و مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱ . الزامات شاخص کلوئیدی Ic

Ic	۰/۰–۵/۲۲	Ic > ۰/۵	Ic < ۰/۲۲
وضعیت قیر	سیستم کلوئیدی پایدار	قیر سفت تر	قیر نرمتر

۳-۴. تست خستگی و ترمیم مخلوط آسفالتی

آزمایش تیر خستگی مطابق با استانداردهای توصیف شده تحت بارگذاری در شرایط کرنش ثابت و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس انجام گردید (AASHTO T321، ۲۰۱۷). به طور کلی، این آزمایش در دو حالت تنش ثابت و کرنش ثابت صورت می‌گیرد. در حالت کرنش ثابت، خرابی در نقطه‌ای که سفتی به یک مقدار از پیش تعیین‌شده برسد، تعریف می‌شود که معمولاً برابر ۵۰٪ در نظر گرفته می‌شود. بارگذاری نیز به روش خمش ساده در یک‌سوم دهانه صورت می‌گیرد. یک بار مکرر با فرکانس ۱۰ هرتز بدون وقفه به نمونه اعمال گردید. تکرار بار متناظر با کاهش ۵۰٪ سفتی به عنوان معیار سنتی شکست خستگی در این بررسی به‌کار گرفته شده است. فرکانس بارگذاری در آزمایش خستگی، شبیه‌سازی سرعت ترافیک عبوری در جاده را نشان می‌دهد. بر طبق استاندارد، فرکانس بین ۵ تا ۱۰ هرتز و اغلب مقدار ۱۰ هرتز که معادل با سرعت ۹۸ کیلومتر بر ساعت می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد (مملوک و همکاران، ۲۰۱۲).

۴. نتایج و بحث

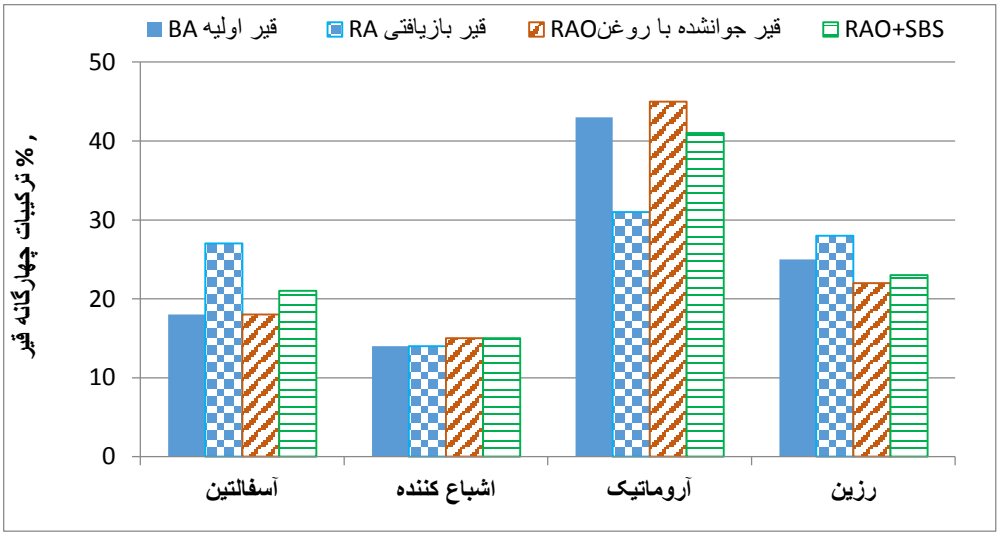
۴-۱. نتایج تست SARA

پیرشدگی و احیای قیر با تغییر در اجزای شیمیایی آن همراه است. آسفالتین و رزین مواد جامد سیاه رنگ هستند. در حالی که مواد روغنی اشباع بی‌رنگ و معطرها مواد روغنی زردرنگ می‌باشند. ترکیب و نسبت اجزای چهارگانه قیر نقش مهمی در عملکرد آن دارند. مواد معطر باعث چسبندگی بین قیر و سنگدانه می‌شوند، در حالی که ویسکوزیته و سفتی قیر تابع رزین و آسفالتین می‌باشد. مطابق طبیعت کلوئیدی قیر، قیرها به سه حالت سل، ژل و سل- ژل تقسیم می‌شوند. در عمل، قیری که در روسازی استفاده می‌شود به‌صورت قیر سل—ژل می‌باشد. هر نوع تغییر در کمیت یا کیفیت بخش رزین می‌تواند مستقیماً خصوصیات قیر خالص را تحت تأثیر قرار دهد. به‌عنوان مثال، اگر مقدار رزین به اندازه کافی با آروماتیک-ها همراه باشد، آسفالتین‌ها بهتر لخته‌زدایی شده و قابلیت

[1]- Gaestel Index

حرکت خوبی را در داخل آسفالت به‌دست می‌آورند. به این حالت، قیر سل می‌گویند. در مقابل، اگر مقدار رزین ناکافی بوده و آروماتیک کمتری را شامل باشد، آسفالتین-ها تحرک کمتری داشته و به یکدیگر متصل می‌شوند. وضعیت فوق می‌تواند ساختار بسته‌بندی باز نامنظم میسل را به‌وجود آورد. این حالت را قیر ژل می‌نامند (کنگ و همکاران، ۲۰۱۶).

طی پیرشدگی آسفالت، اکسیژن به داخل سیستم نفوذ کرده و باعث تبدیل رزین به مولکول‌های بسیار قطبی به نام آسفالتین می‌شود. در نتیجه، مقدار آسفالتین در قیر پیرشده افزایش یافته و ساختار کلوئیدی آسفالت از حالت طبیعی سل – ژل به حالت ژل تغییر می‌یابد (کنگ و همکاران، ۲۰۱۶). به جهت تحلیل دقیق رفتار نمونه‌های آسفالت بازیافتی و آسفالت جوان‌شده، با انجام آنالیز شیمیایی قیرها بر اساس آزمایش کروماتوگرافی گازی، اجزای چهارگانه (آروماتیک، اشباع‌کننده، رزین و آسفالتین) و مقادیر شاخص‌های کلوئیدی نمونه‌های مختلف بیندر آسفالتی مطابق شکل ۱ و جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. تغییرات اجزای چهارگانه نمونه‌های آسفالتی حاصل از کروماتوگرافی

جدول ۲. ترکیبات چهارگانه و شاخص‌های شیمیایی و کلوئیدی نمونه‌های مختلف بیندر آسفالتی

نمونه آسفالت	آسفالتین	اشباع‌کننده	آروماتیک	رزین	Ic	As+ R	S/Ar
BA	18	14	43	25	0.471	43	0.326
RA	27	14	31	28	0.695	55	0.452
RAO	18	15	45	22	0.493	40	0.333
RAO+SBS	21	15	41	23	0.563	44	0.366

مطابق شکل ۱، با پیرشدگی قیر، مقادیر آسفالتین و رزین افزایش می‌یابد که درصد افزایش مقدار آسفالتین به مراتب بیشتر از درصد افزایش مقدار رزین بوده است. علت آن، اکسیداسیون و پیرشدگی و تراکم چندگانه[1] قیر

[1]- Polycondensated

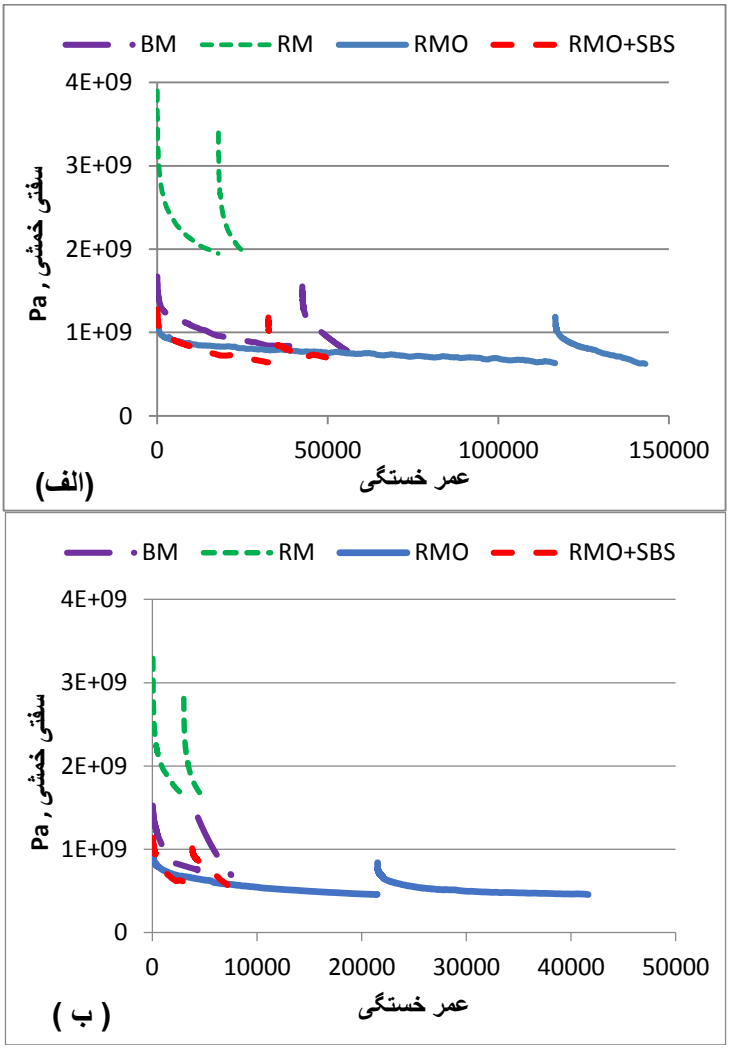
می‌باشد و می‌تواند پتانسیل قیر برای مقابله با خستگی را تا حد قابل توجهی کاهش دهد. همچنین، با پیرشدگی قیر، از مقدار آروماتیک به‌علت فرار بودن به شدت کاسته شده ولی مقدار اشباع‌کننده‌ها تغییر چندانی نکرده است. افزودن روغن جوان‌ساز به قیر بازیافتی باعث افزایش زیاد مقدار آروماتیک و کاهش محسوس آسفالتین و رزین شده است. اما تأثیر چندانی بر مقدار اشباع‌کننده‌ها نداشته است. هرچه شاخص کلوئیدی Ic بزرگتر شود، ساختار کلوئیدی آسفالت به ساختار ژل نزدیک‌تر شده و قیر سفت‌تر می‌شود. هرچه شاخص کلوئیدی کوچک‌تر شود، به احتمال زیاد، آسفالت ماده‌ای از نوع سل است و ساختار کلوئیدی آن پایدارتر است که می‌تواند تا حدودی به افزایش توانایی ترمیم کمک کند.

همانگونه که در جدول ۲ نشان داده شده است، شاخص کلوئیدی قیر پایه و قیر بازیافتی به‌ترتیب برابر ۰/۴۷۱ و ۰/۶۹۵ می‌باشد که نشان می‌دهد ساختار کلوئیدی قیر پیرشده سخت‌تر از ساختار کلوئیدی قیر پایه می‌باشد. با افزودن ۴٪ جوان‌کننده روغنی به قیر بازیافتی، شاخص کلوئیدی قیر جوان‌شده RAO به مقدار ۰/۴۹۳ کاهش یافته است، که نشان می‌دهد جوان‌کننده روغنی توانسته است ساختار کلوئیدی قیر بازیافتی را متعادل کند. کاهش شاخص کلوئیدی در قیر جوان‌شده RAO به واسطه جوان‌ساز روغنی است که با دارا بودن مقادیر زیاد اجزای سبک شامل اشباع‌کننده و آروماتیک باعث کاهش شاخص کلوئیدی شده است. کاهش شاخص کلوئیدی بیانگر تغییر ساختار قیر از حالت ژل به حالت سل بوده و در نتیجه قیر به یک ماده کلوئیدی پایدار تبدیل شده است. در نتیجه، قیر نرم‌تر شده و عملکرد آن برای دمای کم و متوسط بهتر می‌شود.

با اضافه شدن پلیمر SBS به قیر بازیافتی جوان‌شده با روغن، شاخص کلوئیدی قیر بازیافتی از ۰/۶۹۵ به ۰/۵۶۳ کاهش یافته است. لذا مشاهده می‌شود که شاخص کلوئیدی نمونه RAO+SBS بیشتر از نمونه RAO بوده و بیانگر اینست که پلیمر SBS تأثیر کمتری بر اجزای شیمیایی قیر دارد. در این خصوص، عملکرد پلیمر در کاهش مقدار آسفالتین که نقش بسیار زیادی در پایداری کلوئیدی قیر ایفا می‌کند، نسبت به عملکرد روغن ضایعاتی به مراتب کمتر بوده است. به‌طوری که مقدار آسفالتین نمونه RAO+SBS بیشتر از نمونه RAO می‌باشد. آسفالتین یکی از اجزای اصلی قیر بوده که در سخت‌شدگی و مقاومت در برابر تغییرشکل نقش اساسی ایفا می‌کند.

۴-۲. عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی بازیافتی

آزمون خستگی تیرچه خمشی در فرکانس ۱۰ هرتز، در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و در دو سطح کرنش ۴۰۰ و ۶۰۰ میکرواسترین روی نمونه‌ها انجام شده است. سطح کرنش ۴۰۰ میکرواسترین، سطح پایین کرنش در آزمایش خستگی بوده و معیار بهتری از عمر خستگی مخلوط‌ها را ارائه می‌دهد. سطح کرنش ۶۰۰ میکرواسترین به‌عنوان سطح متوسط کرنش در آزمون خستگی مخلوط آسفالتی در نظر گرفته شده و توصیف بهتری از ترمیم نمونه و میزان تغییرات عمر خستگی و درصد ترمیم دو سطح کرنش مختلف را نشان می‌دهد. شکل ۲، نتایج سفتی بر حسب عمر خستگی را نشان می‌دهد. بعد از بارگذاری اول به مدت ۲۴ ساعت، به نمونه‌ها استراحت داده شده و سپس تست مجدد انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از جوان‌ساز در مخلوط‌های آسفالتی حاوی مخلوط آسفالتی بازیافتی سبب بهبود رفتار خستگی گردیده است. شکل ۲، رفتار خستگی و ترمیم مخلوط‌های آسفالتی را در دو سطح کرنش ۴۰۰ و۶۰۰ میکرواسترین نشان می‌دهد.



شکل ۲. رفتار خستگی و ترمیم مخلوط‌های آسفالتی: الف) در کرنش ۴۰۰ و ب) در کرنش ۶۰۰ میکرواسترین

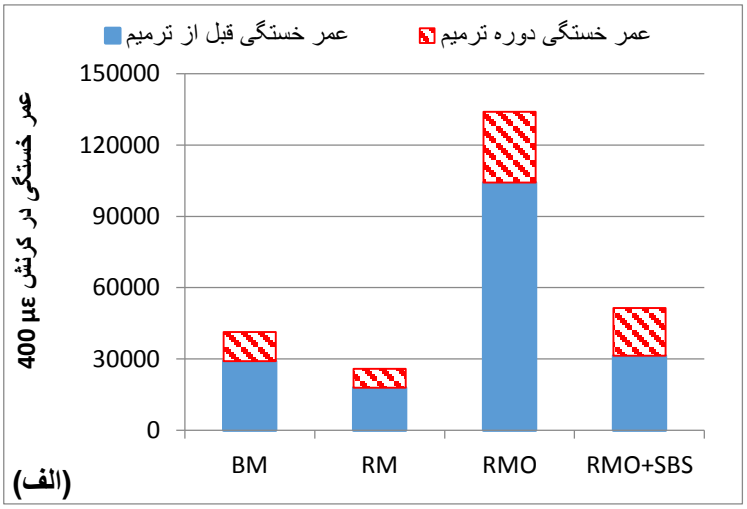
همانگونه که ملاحظه می‌شود، نمونه RMO عمر خستگی طولانی‌تری از خود بروز داده است. با اصلاح نمونه‌های آسفالتی، از میزان مدول سفتی آنها کاسته می‌شود و این امر منجر به افزایش عمر خستگی و بازیابی خصوصیات از دست رفته می‌گردد. همچنین، هنگامی که زمان لازم جهت خودترمیمی به نمونه داده شود، درصد قابل ملاحظه‌ای از مدول سفتی از دست رفته به حالت اول باز خواهد گشت. با مقایسه میزان درصد برگشت مدول سفتی که نرخی از ترمیم می‌باشد، در نمونه‌های مختلف تحت کرنش‌های ثابت ۴۰۰ و ۶۰۰ میکرواسترین ملاحظه می‌شود که در سطوح کرنش بالاتر، مقدار ترمیم به دلیل ایجاد آسیب بیشتر در نمونه، به شدت کاهش می‌یابد.

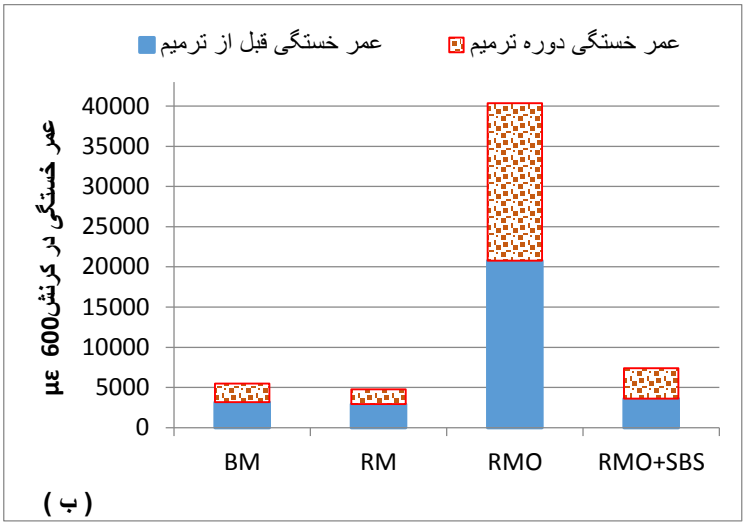
مخلوط آسفالتی بازیافتی به علت پیرشدگی دارای سفتی زیاد می‌باشد. با این حال، روغن ضایعاتی توانست با کاهش سفتی نمونه، منجر به اصلاح رفتار مخلوط آسفالتی و در نهایت بهبود عملکرد خستگی و افزایش عمر خستگی روسازی شود. کاهش شدیدتر شیب در نمودارهای مخلوط آسفالتی بازیافتی، RM، و مخلوط آسفالتی بازیافتی حاوی پلیمر در مقایسه با شیب کمتر و حرکت آرام‌تر نمودار سفتی در نمونه RMO حاکی از آسیب بیشتر نمونه‌ها نسبت به نمونه اصلاح شده با روغن ضایعاتی است. در واقع، شیب نمودار معیاری از آسیب

پیوسته در نمونه آسفالتی می‌باشد و شیب بیشتر نشانی از خرابی سریع‌تر است. لذا اگر بتوان به‌صورت همزمان از مصالح بازیافتی و جوان‌سازها با قابلیت ترمیم زیاد استفاده کرد، هزینه‌های ساخت، تعمیر و بازدیدهای دوره‌ای بسیار کاهش خواهد یافت.

شکل ۳، عمر خستگی نمونه‌های مختلف مخلوط آسفالتی را قبل و بعد از ترمیم‌شوندگی در سطوح کرنش ۴۰۰ و ۶۰۰ میکرواسترین نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از جوان‌ساز در مخلوط‌های آسفالتی حاوی مخلوط آسفالتی بازیافتی سبب بهبود رفتار خستگی گردیده است. همچنین، عمر خستگی نمونه‌ها در سطح کرنش ۶۰۰ میکرواسترین به‌طور متوسط ۱۵ الی ۲۵ درصد عمر خستگی نمونه‌ها در سطح کرنش ۴۰۰ میکرواسترین بوده است. همچنین، روند تغییرات عمر خستگی نمونه‌ها در سطح کرنش ۶۰۰ میکرواسترین مشابه روند تغییرات عمر خستگی نمونه‌ها در سطح کرنش ۴۰۰ میکرو استرین بوده است.

استفاده از جوان‌ساز می‌تواند مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی را به طور چشمگیری در مقایسه با سایر مخلوط‌ها افزایش دهد. مخلوط آسفالتی بازیافتی به علت پیرشدگی دارای سفتی زیاد می‌باشد. با این حال، روغن ضایعاتی توانسته با کاهش سفتی نمونه، منجر به اصلاح رفتار مخلوط آسفالتی شود. اعمال دوره استراحت تأثیر بسیار مهمی بر پتانسیل خودترمیمی و در نهایت بهبود عملکرد خستگی و افزایش عمر خستگی روسازی خواهد گذاشت. با اعمال دوره استراحت، روند خودترمیمی بهتر انجام گرفته و در نتیجه عمر خستگی افزایش می‌یابد. در حالت پیش از ترمیم، نتایج حاکی از افزایش عمر خستگی در نمونه‌های RMO می‌باشد. به‌طوری که عمر خستگی نمونه مخلوط آسفالتی بازیافتی جوان‌شده با روغن در سطح کرنش ۴۰۰ میکرواسترین بیش از ۶ برابر عمر خستگی مخلوط آسفالتی بازیافتی RM و ۴ برابر مخلوط آسفالتی اولیه BM شده است. همچنین، بعد از ریکاوری و ترمیم نیز میزان افزایش عمر خستگی مخلوط آسفالتی حاوی روغن به مراتب بیشتر از عمر خستگی سایر نمونه‌ها می‌باشد. در مخلوط آسفالتی حاوی روغن و پلیمر، اگرچه عمر خستگی نمونه قیل و بعد از ترمیم-شدگی به مراتب بیشتر از نمونه‌های مخلوط آسفالتی اولیه و پیر شده می‌باشد، ولیکن به‌علت وجود پلیمر در ترکیب نمونه، میزان عمر خستگی کمتر از نمونه مخلوط آسفالتی حاوی روغن می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان داده است که پلیمر SBS اگرچه در افزایش مدول گسیختگی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی مؤثر است، اما میزان افزایش عمر خستگی مخلوط‌ها اندک بوده است. نتایج فوق با مطالعات قبلی انجام شده در این خصوص مطابقت دارد (زیاری و همکاران ، ۱۳۸۷).

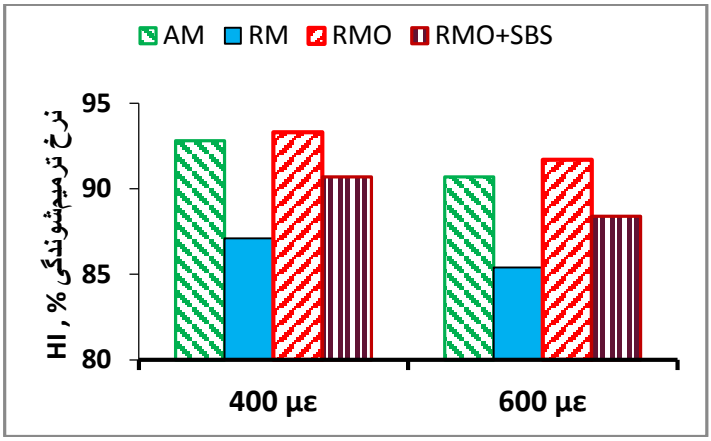




شکل ۳. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی: الف) در کرنش ۴۰۰ و ب) در کرنش ۶۰۰ میکرواسترین

۴-۳. ارزیابی شاخص ترمیم

شاخص ترمیم[1](HI) در این پژوهش بر مبنای بازگشت سفتی خمشی بوده و از تقسیم مدول سفتی خمشی در ابتدای سیکل خستگی بعد از دوره استراحت بر اولین سیکل در ابتدای تست به‌دست می‌آید. برای هر دو حالت، پنجاهمین سیکل به عنوان سیکل اول در نظر گرفته شد. نتایج شاخص ترمیم در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴. میزان ترمیم در نمونه‌های مخلوط بازیافتی بر مبنای بازگشت مدول سفتی خمشی

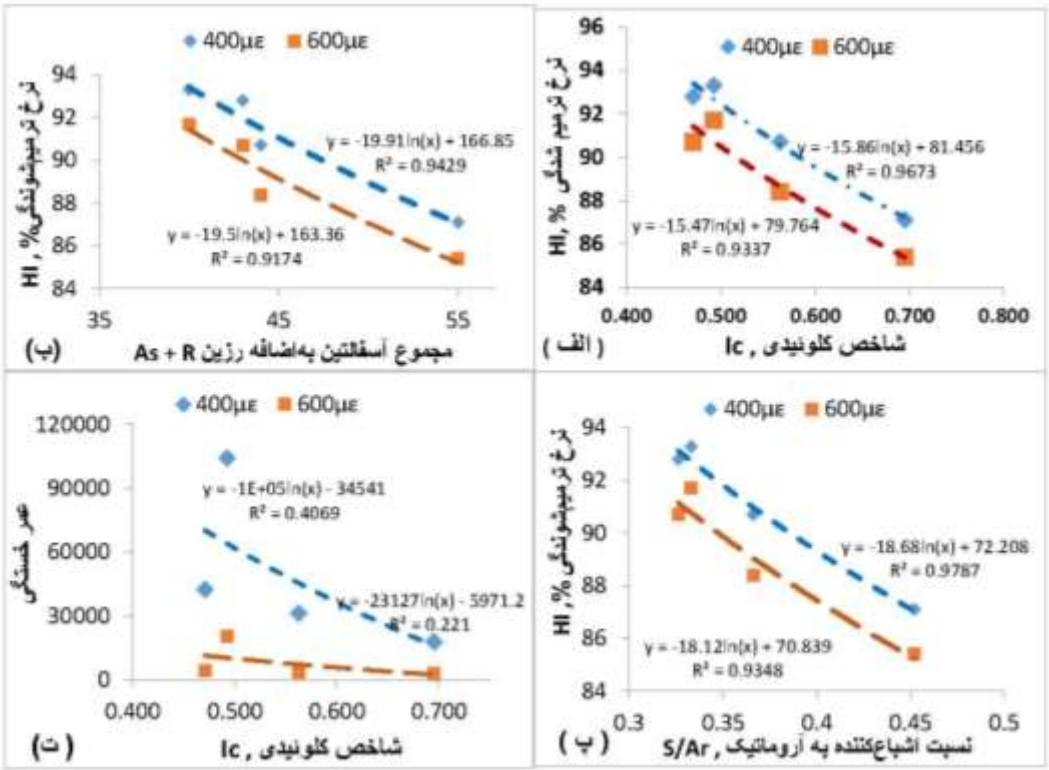
مکانیزم روی داده در فرآیند خودترمیمی برای مخلوط آسفالتی در سه مرحله رخ داده که منجر به بازیابی بخشی یا تمام خصوصیات ذاتی و مکانیکی چسبنده قیری در امتداد سطح شکست (ترک) می‌گردد. این سه مرحله در دو فاز رخ می‌دهد؛ فاز اوّل که همان خودترمیمی الاستیک بوده، مربوط به ایجاد و برقراری اتصال مجدد بین سطح سنگدانه‌ها و قیر می‌باشد. فاز دوّم، خودترمیمی ویسکوز است که وابسته به زمان بوده و مربوط به ایجاد پیوستگی در مواد قیری می‌باشد، که حتی اگر به آن فرصت کافی داده شود می‌تواند به طور کامل رخ داده و به بازیابی نسبتاً

[1]- Healing Index

کامل و یا ۱۰۰٪ خصوصیات مکانیکی از دست رفته منجر گردد. مواد قیری، صرف نظر از افزودن مواد افزودنی، خود به تنهایی نیز دارای خاصیت خودترمیمی بوده که با خاصیت ذاتی برگرداندن نسبی خرابی، مانند ترک‌های به وجود آمده در عمر سرویس‌دهی، می‌تواند سبب افزایش عمر سرویس‌دهی روسازی گردد. مواد آسفالتی در هنگام باربرداری، به‌خصوص در تعداد و زمان کم، مستعد بازگشت خصوصیات هستند. نتایج نشان داد که مخلوط بازیافتی، RM، به دلیل پیرشدگی و با وجود تحمل مقدار بار کم (به علت عمر خستگی کم) بازگشت کمتری را مشاهده کرده است و بیشترین نرخ ترمیم مربوط به نمونه RMO می‌باشد. مقدار ریکاوری در نمونه‌های حاوی SBS با کاهش روبرو بوده است، تا جایی که در کرنش‌های زیاد این کاهش مشهودتر بود. نتایج این تحقیق با نتایج محققان قبلی که بیان‌کننده عدم توانایی SBS در برابر پیرشدگی و همچنین عملکرد ضعیف در پیرشدگی بلندمدت بود، همخوانی دارد (صادقیان و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به نتایج این تحقیق، بهترین گزینه جهت اصلاح عملکرد RAP استفاده از جوان‌ساز با درصد مناسب می‌باشد. به طوری که در درصدهای بالا، عملکرد شیارشدگی تحت تأثیر قرار نگیرد و با حفظ عملکرد در رده قیر کنترل، عملکرد خستگی در دمای میانی، ترک‌خوردگی حرارتی در دمای کم و خودترمیمی نیز ارتقا یابد.

۴-۴. ارتباط میان شاخص تست SARA و ترمیم در مخلوط آسفالتی

با استفاده همزمان از آزمایش‌های شیمیایی و عملکردی، رفتار واقع‌بینانه‌تری از تأثیر مواد جوان‌ساز بر قیرهای مورد استفاده در این پژوهش می‌توان داشت. ارتباط پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ (الف، ب ، پ ، ت). ارتباط پارامترهای شیمیایی قیر با ترمیم و عمر خستگی مخلوط آسفالتی در سطوح مختلف کرنش

همانطور که در شکل ۵- الف نشان داده شده است، بین شاخص کلوئیدی Ic تست شیمیایی و مقدار ترمیم‌شوندگی مخلوط آسفالتی حاصل از آزمایش چهارنقطه‌ای ارتباط معنی‌داری وجود دارد. میزان این ارتباط در سطوح کرنش ۴۰۰ و ۶۰۰ میکرواسترین به‌ترتیب برابر ۰/۹۶۷۳ و ۰/۹۳۳۷ می‌باشد. می‌توان گفت که هرچه مقدار شاخص کلوئیدی کمتر شود، ساختار کلوئیدی آسفالت پایدارتر است، که می‌تواند تا حدودی به افزایش قابلیت خودترمیمی آسفالت کمک کند. در بین اجزای چهارگانه قیر، آروماتیک‌ها در ترمیم آسفالت نقش به‌سزایی دارند. قیری که دارای مقدار آروماتیک بیشتری است قابلیت ترمیم‌شوندگی بیشتری دارد.

مطابق شکل ۵- ب، بین مجموع آسفالتین به‌اضافه رزین، و درصد ترمیم‌شوندگی مخلوط‌های آسفالتی، ارتباط معنی‌داری وجود دارد. میزان همبستگی در سطح کرنش پایین‌تر- ۴۰۰ میکرواسترین- بیشتر است (R^2 0.9429 =). در این خصوص می‌توان گفت که درصدهای رزین و آسفالتین بیانگر میزان مولکول‌های بزرگ قیر می‌باشد. هرچه مقدار مولکول‌های بزرگ‌تر بیشتر باشد، متوسط وزن مولکولی آسفالت بیشتر می‌شود. در نتیجه، حرکت مولکولی آسفالت کندتر شده و توانایی خودترمیمی آسفالت ضعیف‌تر می‌شود. روند تغییرات مجموع رزین و آسفالتین با درصد ترمیم‌شوندگی نیز بیانگر همین موضوع است.

بر اساس شکل ۵- پ، همبستگی معنی‌داری بین نسبت اجزای سبک قیر، یعنی نسبت اشباع‌کننده به آروماتیک، و درصد ترمیم‌شوندگی وجود دارد. میزان همبستگی در سطوح کرنش ۴۰۰ و ۶۰۰ میکرواسترین به‌ترتیب برابر ۰/۹۷۸۷ و ۰/۹۳۴۸ می‌باشد. همچنین، هرچه نسبت S/Ar افزایش می‌یابد درصد ترمیم‌شوندگی نیز کاهش می‌یابد. در این خصوص، می‌توان گفت که ساختار مولکولی آسفالت با مقدار S/Ar بیشتر، تمایل به درازشدن و نازک‌تر شدن دارد؛ که اثر بازدارنده کمتری در انتشار یک مولکول و مولکول دیگر در هنگام انتشار دارد. به‌عبارتی، با مقدار نسبت S/Ar بزرگ‌تر، ترک‌های بیندر آسفالتی به سرعت ترمیم شده و آسفالت توانایی ترمیم‌شوندگی بیشتری از خود نشان می‌دهد. با افزایش مقدار آروماتیک، نسبت S/Ar کمتر شده و در نتیجه مطابق شکل ۵- پ، ترمیم‌شوندگی آسفالت افزایش یافته است. دلیل آن اینست که آروماتیک‌ها در بین اجزای چهارگانه قیر، کمترین وزن مولکولی را دارا بوده و بدیهی است که مولکول کوچک‌تر، آسفالت را قادر می‌سازد تا سریع‌تر التیام یابد. همچنین، مطابق شکل ۵- ت، هیچ ارتباط معنی‌داری بین شاخص کلوئیدی و عمر گسیختگی مخلوط آسفالتی وجود ندارد. به عبارتی، عمر گسیختگی مخلوط‌های آسفالتی مستقل از درصد اجزای شیمیایی چهارگانه قیر می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

این تحقیق، جهت ارزیابی تأثیر روغن خوراکی ضایعاتی به عنوان جوان‌ساز، و پلیمر SBS، بر رفتار خستگی و خودترمیمی مخلوط آسفالتی حاوی درصد زیاد خرده آسفالت و تأثیر جوان‌ساز بر شاخص تست SARA انجام شده است که نتایج تحقیق به‌شرح زیر می‌باشد:

- نتایج آزمایش‌های کروماتوگرافی بیانگر آنست که در مخلوط آسفالتی بازیافتی، سیستم کلوئیدی قیر ناپایدار است. با کاهش مقدار آروماتیک و اشباع‌کننده‌ها و افزایش مقدار آسفالتین، قیر سفت‌تر شده و پتانسیل قیر در برابر ترک‌خوردگی ناشی از خستگی افزایش می‌یابد. افزودن روغن به مخلوط بازیافتی باعث افزایش مقدار آروماتیک و کاهش آسفالتین و در نتیجه کاهش شاخص کلوئیدی قیر شده و در نتیجه قیر پایدارتر می‌شود.
- عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی، با افزودن روغن جوان‌ساز گیاهی ضایعاتی، به شدت افزایش یافته است.

- همانطور که از ساختار شیمیایی نمونه‌ها مشخص است، نمونه‌های دارای روغن نسبت به نمونه‌های دارای ترکیب روغن و پلیمر، دارای آروماتیک بیشتر و آسفالتین کمتر می‌باشند. آروماتیک‌ها و آسفالتین‌ها در سفتی آسفالت نقش اساسی دارند. به عبارتی، هر گونه افزایش در مقدار آروماتیک و یا کاهش در مقدار آسفالتین باعث کاهش شاخص کلوئیدی و سفتی و در نتیجه افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی شده است. به همین دلیل، نمونه RMO نسبت به سایر نمونه‌ها از عمر خستگی بیشتری برخوردار بوده است.
- نتایج نشان داد که بیشترین نرخ ترمیم مربوط به مخلوط آسفالتی جوان‌شده با روغن می‌باشد. مقدار ریکاوری در نمونه‌های حاوی پلیمر استایرن بوتادین استایرن با کاهش روبرو بوده است، تا جایی که در کرنش‌های زیاد این کاهش مشهودتر بود. با توجه به نتایج این تحقیق، بهترین گزینه جهت اصلاح عملکرد مخلوط بازیافتی استفاده از جوان‌ساز با درصد مناسب می‌باشد. به طوری که در درصدهای زیاد، عملکرد شیارشدگی تحت تأثیر قرار نگیرد و با حفظ عملکرد در رده قیر کنترل، عملکرد خستگی در دمای میانی، ترک‌خوردگی حرارتی در دمای کم و خودترمیمی نیز ارتقا یابد. اگرچه استفاده از پلیمر باعث افزایش عمر خستگی می‌شود، ولی بر قابلیت ترمیم اثر منفی گذاشته و با توجه به وجود دوره استراحت طولانی، استفاده از جوان‌ساز به تنهایی کارایی بهتری داشت.
- نتایج آنالیز همبستگی بیانگر آنست که بین شاخص کلوئیدی Ic تست شیمیایی و عملکرد رئولوژیک مخلوط آسفالتی حاصل از آزمایش چهارنقطه‌ای ارتباط معنی‌داری وجود دارد. میزان این ارتباط در سطوح کرنش ۴۰۰ و ۶۰۰ میکرواسترین به‌ترتیب برابر ۰/۹۷۷۴ و ۰/۹۵۵۳ می‌باشد. می‌توان گفت که هرچه مقدار شاخص کلوئیدی کمتر شود، ساختار کلوئیدی آسفالت پایدارتر است؛ که می‌تواند تا حدودی به افزایش قابلیت خودترمیمی آسفالت کمک کند. قیری که دارای مقدار آروماتیک بیشتری است، قابلیت ترمیم‌شوندگی بیشتری دارد. همچنین، هیچ ارتباط معنی‌داری بین شاخص کلوئیدی و عمر گسیختگی مخلوط آسفالتی وجود ندارد. به عبارتی، عمر کسیختگی مخلوط‌های آسفالتی مستقل از درصد اجزای شیمیایی چهارگانه قیر می‌باشد.
- جهت افزایش ترمیم‌شوندگی آسفالت، افزودن مواد جوان‌سازی که دارای وزن مولکولی کمتر و آروماتیک‌های بیشتری باشد مؤثرتر است. در این پژوهش، نقش روغن ضایعاتی در ترمیم مخلوط آسفالتی بسیار بیشتر از وجود پلیمر در ترکیب نمونه-های آسفالتی بوده است. پلیمر استایرن بوتادین استایرن دارای مولکول‌های بسیار بزرگتری نسبت به روغن ضایعاتی بوده که تحرک مولکولی آسفالت را جهت ترمیم کاهش می‌دهد. نقطه اطمینان استفاده از پلیمر در مخلوط‌های آسفالتی در دماهای زیاد و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد.

۶. مراجع

زیاری، ح.، ابطحی، س. م. و گلی، ا. ۱۳۸۷. "اثر پلیمر SBS بر خواص دینامیکی آسفالت". مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، ۲۱(۶): ۴۶۵-۴۷۰.

AASHTO T 321. 2017. “Standard method of test for determining the fatigue life of compacted asphalt mixtures subjected to repeated flexural bending”. American Association of State and Highway Transportation Officials.

ASTM D5404M-12. 2017. “Standard Practice For Recovery Of Asphalt From Solution Using The Rotary Evaporator”., West Conshohocken, PA: ASTM.

Azahar, W. N. A. W., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Bujang, M. Ngadi, N. 2016. “Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder”. Constr. Build. Mater., 126: 218-226. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.032

Chen, M., Xiao, F., Putman, B., Leng, B. and Wu, S. 2014. “High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils”. Constr. Build. Mater., 59: 10-16.

Cong, P., Hao, H., Zhang, Y., Luo, W. and Yao, D. 2016. “Investigation of diffusion of rejuvenator in aged asphalt”. Int. J. Pavement Res. Technol., 9: 280-288.

Daryaee, D., Ameri, M. and Mansourkhaki, A. 2020. “Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures”. Constr. Build. Mater., 235: 11751.

Gong, M., Yang, J., Zhang, J., Zhu, H. and Tong, T. 2016. “Physical–chemical properties of aged asphalt rejuvenated by bio-oil derived from biodiesel residue”. Constr. Build. Mater., 105: 35-45.

Hesami, S. and Mollamohammadi, A. 2022. “Evaluation of the effect of WCO/SBS-modified RAB and RAP and stiffness recovery procedure on fatigue performance of HMA”. J. Mater. Civ. Eng., accepted.

Huang, W., Guo, Y., Zheng, Y., Ding, Q., Sun, C., 2021. “Chemical and rheological characteristics of rejuvenated bitumen with typical rejuvenators”. Constr. Build. Mater., 273: 121525.

Huayang Yu b

Jose, N. C., Quantao, L., Lei, Z., Wu, S., Erkut, Y. and Alvaro, G. 2019. “Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures”. Mater. Struct., 52: 78.

Kaseer, F., Martin, A. E. and Arámbula-Mercado, E. 2019. “Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review”. Constr. Build. Mater., 211: 974-987.

Luo, W., Zhang, Y., Cong, P., 2017. “Investigation on physical and high temperature rheology properties of asphalt binder adding waste oil and polymers”. Constr. Buil. Mater., 144: 13-24

Mamlouk, M. S., Souliman, M. I., Zeiada, W. A. and Kaloush, K. E. 2012. “Refining conditions of fatigue testing of hot mix asphalt”. Adv. Civ. Eng. Mater., 1(1).

Mansourkhaki, A., Ameri, M., Habibpour, M. and Shane Underwood, B. 2020. “Chemical composition and rheological characteristics of binders containing RAP and rejuvenator”. J. Mater. Civ. Eng., 32: 04020026.

Mogawer, W. S., Austerman, A. J., Kluttz, R. and Puchalski, L. S. 2016. “Using polymer modification and rejuvenators to improve the performance of high reclaimed asphalt pavement mixtures”. Transport. Res. Record, 2575: 10-18.

Moniri, A., Ziari, H., Aliha, M. R. M., and Saghafi, Y. 2019. “Laboratory study of the effect of oil-based recycling agents on high RAP asphalt mixtures.” Int. J. Pavement Eng. 11: 1-12.

Muhammad, Z., Sabzoi, N., Srinivasan, M. and Filippo, G. 2021. “Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review”. J. Clean. Prod., 278: 123304.

Oliver, J. W. H. 2009. “Changes in the chemical composition of Australian bitumens”. Road Mater. Pavement Design, 10(3): 569-586.

Pradhan, S, K., Sahoo, U, C. (2022). “Use of Mahua oil for rejuvenation of the aged binder through aboratory investigations”. Internat. J. Transport. Sci. Tech. P14, Model 3G

Sadeghian, M., Latifi Namin, M. and Goli, H. 2019. “Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modifier”. Constr. Build. Mater., 226: 818-826.

Salehfard, R., Behbahani, H., Dalmazzo, D. and Santagata, E. 2021. “Effect of colloidal instability on the rheological and fatigue properties of asphalt binders”. Constr. Build. Mater., 281: 122563.

Taghavi, M., Hesami, S. and Hesami, E. 2018. “Modification of aged pavement by rejuvenators and investigation of the changes in its properties”. J. Transport. Infrastruct. Eng. (JTIE), 4(1): 59-70.

Wen, H., Bhusal, S. and Wen, B. 2012. “Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt”. Mater., 25(10): 1432-1437.

Zahour, M., Sabzoi Nizamuddin, S., Madapusi, S., Giustozzi, F., 2021. "Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review". J. Clean. Prod., 278: 123304.

Zaumanis, M., Mallik, R. B., Poulilkaos, M. and Frank, R. 2014. "Influence of six rejuvenators on the performance properties of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 71: 538-550. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073