

بررسی تأثیر استفاده از جوانسازهای پلیمری بر عملکرد مخلوط آسفالت بازیافتی

حسن زیاری (مسئول مکاتبات)، استاد گروه راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

Email: h.ziari@iust.ac.ir

مهند البیاتی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

یوسف امجدیان، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

چکیده

بسیاری از محققان نشان داده اند که استفاده هم زمان از جوانساز و قیر پلیمری می‌تواند عملکرد ترک خوردگی، خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی را بهبود بخشد. با این حال تحقیقات محدودی بر روی جوانسازهای اصلاح شده با پلیمر صورت گرفته و ابهامت زیادی در خصوص عملکرد این جوانسازها بر روی رفتار مخلوط آسفالت بازیافتی وجود دارد. بنابراین در این تحقیق به بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی حاوی ۰، ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت و جوانسازهای پلیمری مانند نانوپلی، جوانساز پلیمری تیس و روغن خوراکی بازیافتی حاوی پودر لاستیکی پرداخته شده و نتایج به دست آمده با جوانساز غیر پلیمری رایج و کیوم باتوم مقایسه شدند. برای این کار پس از یافتن درصد بهینه هر جوانساز و انجام آزمایشات طرح اختلاط، آزمایشات خزش دینامیکی، حساسیت رطوبتی و شکست نمونه SCB بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اصلاح جوانسازها با پلیمر تا حد قابل قبولی مقاومت در برابر شیار شدگی را بهبود می‌بخشد. طبق نتایج به دست آمده، مخلوط‌های حاوی جوانسازهای پلیمری نانوپلی و تیس علی‌رغم این که عملکرد ضعیف‌تری در برابر شروع ترک دارند، در برابر رشد ترک عملکرد بهتری داشته و ترک در آنها دیرتر رشد می‌کند. مخلوط‌های حاوی جوانساز تیس و نانوپلی در برابر حساسیت رطوبتی هم عملکرد مناسبی از خود نشان دادند. مخلوط‌های حاوی جوانساز روغن خوراکی پودر لاستیکی عملکرد مناسبی در برابر ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی نداشتند.

واژه‌های کلیدی: آسفالت بازیافتی، جوانساز، روغن خوراکی بازیافتی، پودر لاستیک، جوانساز پلیمری

۱. مقدمه

و یا به آسفالتن تبدیل شده‌اند توسط جوانساز بازگردانده می‌شوند. همچنین ترکیبات آروماتیک موجود در جوانسازها موجب می‌شود تا مالتن موجود در جوانساز و آسفالتن موجود در قیر با یکدیگر سازگار شوند این موضوع باعث می‌شود تا عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی بهبود پیدا کند و امکان استفاده از درصد‌های بالای تراشه آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی فراهم شود. [Shen et al. 2007, Zaumanis et al. 2013, Im et al. 2014, Mohajeri 2015].

بهبود عملکرد مخلوط‌های مخلوط تراشه آسفالت با استفاده از جوانسازهای مختلف مورد تأیید محققین قرار گرفته است. همچنین محققین مختلف سعی بر آن داشته‌اند تا امکان استفاده از روغن‌های گیاهی، روغن‌های بازیافتی و دورریز را به عنوان جوانساز در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی تراشه آسفالت را مورد بررسی قرار دهند. به‌عنوان مثال ال‌کاشفی^۱ و همکارانش تأثیر جوانسازهای به‌دست‌آمده از روغن سویا را بر خصوصیات رئولوژیکی قیرهای استخراج شده از دیوهای مختلف تراشه آسفالت بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تأثیر جوانسازها ممکن است بر روی قیرهای مختلف عملکردهای متفاوتی داشته باشند [Elkashef et al. 2018]. کسیر^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ مطالعه‌ای بر روی بسط دهنده‌های آروماتیکی^۳ و روغن تال انجام دادند [Kaseer et al. 2017]. نتایج نشان داد که استفاده از روغن تال می‌تواند نرمی قیرها را تا حد زیادی بالا ببرد. این موضوع در فرکانس‌های پایین یا دماهای بالا بسیار محسوس‌تر است. در دماهای پایین و یا فرکانس‌های بالا رفتار قیرها تفاوت بسیار کمی با یکدیگر دارد. زائومانیس^۴ و همکارانش نیز به مقایسه ۶ نوع جوانساز مختلف پرداختند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از روغن خوراکی بازیافتی بهترین عملکرد را در میان انواع روغن‌های بازیافتی و روغن‌های گیاهی و نفتی دارد [Zaumanis et al. 2014]. همچنین تأثیر مثبت استفاده از روغن خوراکی بازیافتی در خصوصیات عملکردی مخلوط‌های تراشه آسفالت در تحقیقات و مقالات فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال شانزدهم / شماره اول (۶۲) / پاییز ۱۴۰۳

با توجه به قیمت بالای قیر و نیز کمبود مصالح سنگی خصوصاً در قسمت‌های جنوبی کشور ایران، استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در سال‌های گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تمرکز بسیاری از محققین در حوزه راه و ترابری به توسعه مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی با درصد‌های بالای تراشه آسفالت منعطف شده است [Tarsi et al. 2020, Ziari et al. 2021]. با این وجود چالش‌های فراوانی بر سر راه بازیافت آسفالت وجود دارد که یکی از آن‌ها سختی بالای قیر پیر شده موجود در تراشه‌های آسفالت بوده که باعث افزایش سختی در مخلوط تراشه آسفالت و کاهش مقاومت در برابر خستگی و ترک خوردگی می‌شود [Ziari, Abdelaziz et al. 2021, et al. 2020]. بنابراین محققین در تلاش برای پیدا کردن راهکاری بوده‌اند تا پدیده پیر شدگی در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی را جبران کند [Ma et al. 2020].

یکی از راهکارهایی که برای جبران پدیده پیرشدگی در سال‌های گذشته توسط محققین پیشنهاد شده استفاده از جوانسازها است. جوانسازها روغن‌هایی از جنس مالتن هستند که برای بهبود خواص قیر پیر شده و افزایش مقاومت آن در برابر خستگی و ترک‌خوردگی کاربرد دارند. با این وجود تمام روغن‌ها نمی‌توانند به‌عنوان جوانساز مورد استفاده قرار بگیرند و ساختار شیمیایی و تأثیر آن روغن در عملکرد مخلوط‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است [Hu et al. 2021, Jain and 2022].

تحقیقات پیشین نشان داده که در فرایند پیر شدگی، میزان آسفالتن موجود در قیر افزایش و میزان رزین و آروماتیکی‌ها کاهش می‌یابند. در نتیجه در طی این فرایند، قیر سخت‌تر شده و عملکرد آن مانند مقاومت در برابر خستگی و ترک خوردگی تضعیف می‌شود [Daryae et al. 2021, Molamohamadi and hesami 2022]. با این حال با اضافه کردن جوانساز، مالتن‌هایی که در قیر پیر شده تبخیر شده

استفاده از جوانسازهای پلیمری امکان بهره بردن از هر دو تکنولوژی جوانسازها و پلیمرها در مخلوطهای آسفالتی بازیافتی وجود دارد و از طرف دیگر برخی از شرکت‌های تجاری در سدد برآمده اند تا جوانساز اصلاح شده با پلیمر را در سبد محصولات خود قرار دهند و این ماده را تجاری سازی کنند. لذا نیاز است تا عملکرد مخلوطهای آسفالتی بازیافتی حاوی جوانسازهای اصلاح شده با پلیمر مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین در این تحقیق به بررسی رفتار شیار شدگی و ترک خوردگی سه نوع جوانساز پلیمری مختلف شامل روغن خوراکی بازیافتی اصلاح شده با پودر لاستیک و دو نوع جوانساز پلیمری تجاری با نام‌های تجاری تیس و نانوپلی پرداخته شده است.

۲. مواد و مصالح

مواد و مصالح مصرفی در این تحقیق شامل تراشه آسفالت، قیر، مصالح سنگی و جوانساز می‌باشد که مشخصات آن‌ها به شرح زیر ارائه می‌گردد.

۲-۱ تراشه آسفالت

در این تحقیق تراشه‌های آسفالت حاصل از تراشیدن آسفالت موجود در محور فیروزکوه تهیه شده است. درصد قیر تراشه‌ها برابر ۵٫۲٪ وزنی کل تراشه‌ها بدست آمد. دانه‌بندی تراشه آسفالت مورد استفاده از نوع ۰-۱۹ میلی‌متر بوده و در محدوده دانه‌بندی شماره ۴ جدول ۹-۲ نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه قرار می‌گیرد. در این تحقیق از مخلوطهای آسفالتی حاوی ۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تراشه آسفالت برای بررسی عملکرد جوانسازهای مختلف استفاده شده است.

۲-۲ قیر

قیر مورد استفاده از در این پژوهش از نوع PG 64-16 بوده که از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده است. خواص فیزیکی این قیر در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی قیر مورد استفاده در این تحقیق

متعدد دیگری هم مورد تأیید قرار گرفته است [Ahmed and Hossain 2020, Zahoor et al. 2021].

برخی دیگر از محققین به بررسی استفاده از پلیمرها برای بهبود خواص عملکردی مخلوطهای آسفالتی بازیافتی پرداخته‌اند. به عنوان مثال ژائو^۶ و همکارانش با استفاده از پلیمر لاتکس و دو نوع جوانساز مختلف سعی بر بهبود رفتار مخلوطهای آسفالتی حاوی ۵۰٪ تراشه آسفالت داشتند. آن‌ها با انجام آزمایشات شکست توسط نمونه SCB در دمای ۱۲- و نیز خستگی توسط نمونه SCB در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد رفتار این مخلوطها را بررسی کردند. نتایج آزمایشات حاکی از بهبود رفتار مخلوطهای بازیافتی در برابر خستگی و شکست بود [Zhou et al. 2016]. همچنین در تحقیق دیگری گیوستوزی^۶ و همکارانش به بررسی رفتار مخلوطهای آسفالتی گرم حاوی ۴۰ درصد تراشه آسفالت و امکان اصلاح آن با استفاده از افزودنی‌های مختلف شامل الیاف ترکیبی، الیاف سلولزی، پلیمر SBS، جوانساز و افزودنی ضد عریان شدگی پرداختند. آن‌ها برای این کار تأثیر اصلاح‌کننده‌های فوق را بر رفتار ویسکو-الاستیک مخلوط و نیز عملکرد خستگی و شیار شدگی آن مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از الیاف ترکیبی و سلولزی تأثیر مثبت بر رفتار خستگی و شیار شدگی مخلوطها دارد. باین حال زمانی که این الیاف‌ها با پلیمر SBS ترکیب می‌شوند تأثیر مثبت آن‌ها افزایش می‌یابد [Giustozzi et al. 2015]. سایر محققین هم تأثیر مثبت استفاده از پلیمرها بر خواص عملکردی مخلوطهای آسفالتی بازیافتی را تأیید کردند [Bonicelli et al. 2017, Daryae et al. 2020, Hong et al. 2020, Daryae et al. 2021].

همان طور که ملاحظه می‌شود تأثیر مثبت استفاد از پلیمرها و جوانسازها در مخلوطهای آسفالتی بازیافتی به تأیید محققین زیادی در نقاط مختلف جهان رسیده است. با این حال اصلاح جوانسازها با پلیمر و استفاده از آن‌ها در مخلوطهای آسفالتی بازیافتی کم‌تر مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. در واقع با

شرح جدول ۳ می‌باشد. برای اختلاط روغن سوخته خوراکی با پودر لاستیک، ابتدا پودر لاستیک از الک نمره ۴۰ عبور داده شده و سپس ۲۰ درصد پودر لاستیک با استفاده از مخلوط‌کن دور بالا با دور rpm ۲۰۰۰ به مدت ۶۰ دقیقه با روغن خوراکی در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد مخلوط شدند.

جدول ۳. خواص فیزیکی جوانسازهای پلیمری مورد استفاده در

این تحقیق

کندروانی	درجه	وزن مخصوص در ۲۵°C (g/cm ³)	جوانساز
(cSt)	(°C)		
۶۸	۲۸۶	۱/۰۳	نانوپلی
۴۲	۲۹۷	۰/۹۹۲	تیس لایف
۳۰	۳۲۰	۰/۹۸۱	روغن خوراکی پودر لاستیکی
۲۸	۲۶۰	۰/۹۹۸	وکیوم باتوم

۳. روش پژوهش

این تحقیق شامل ۳ مرحله اصلی است. مرحله اول تعیین جوانساز بهینه و طرح اختلاط، مرحله دوم ساخت نمونه و مرحله سوم انجام آزمایشات عملکردی.

۳-۱ تعیین جوانساز بهینه

جهت یافتن درصد بهینه ابتدا قیر تراشه‌ها در حلال‌تری کلر اتیلن توسط روش تجزیه مخلوط آسفالتی با توجه به استاندارد ASTM D2172 حل می‌شوند و سپس قیر از محلول به‌دست‌آمده با استفاده از روش اِسون مطابق با استاندارد ASTM D1856 جدا می‌شود. قیر بازیابی شده با درصد‌های مختلف جوانساز و قیر جدید ترکیب شده و سپس آزمایشات درجه نفوذ و نقطه نرمی بر روی آن‌ها انجام می‌شود تا درصد بهینه جوانساز تعیین شود. در واقع درصد جوانسازی که درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر را به قیر طبیعی برساند درصد بهینه جوانساز است. در این تحقیق درصد بهینه جوانساز نانوپلی ۶ درصد، تیس لایف ۸ درصد، روغن خوراکی پودر لاستیکی ۱۲

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال شانزدهم / شماره اول (۶۲) / پاییز ۱۴۰۳

آزمایش قیر	استاندارد	نتایج
درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)	ASTM D5	۶۱
خاصیت انگمی (متر)	ASTM D113	>۱
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D36	۴۹
نقطه اشتعال (°C)	ASTM D92	۳۱۰
چگالی (g/cm ³)	ASTM D70	۱/۰۲
وسیکوزیته (سانتی استوکس)	ASTM D2170	۳۵۴

۳-۲ مصالح سنگی

سنگدانه‌های استفاده شده برای ساخت آسفالت از معدن اسپچران در شمال شرق تهران استفاده شده است. نتایج آزمایشات مرغوبیت مصالح سنگی به شرح جدول ۲ است. دانه بندی مورد استفاده در این تحقیق مطابق با دانه بندی شماره ۴ جدول ۹-۲ نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر انتخاب شده است.

جدول ۲. خواص فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در این

تحقیق

خصوصیات فیزیکی	استاندارد	مصالح سنگی
وزن مخصوص مصالح ریزدانه	ASTM C127	۲/۶۳
جذب آب (%)	ASTM C127	۰/۹
وزن مخصوص مصالح درشت‌دانه	ASTM C128	۲/۶۲
سایش لس‌آنجلس (%)	ASTM C131	۲۲/۵
شکستگی در دو سمت (%)	ASTM D5821	۹۸
شکستگی در یک سمت (%)	ASTM D5821	۱۰۰
ارزش ماسه‌ای (%)	ASTM D2419	۶۰

۳-۲ جوانساز

در این تحقیق به بررسی عملکرد سه جوانساز پلیمری و مقایسه آن با وکیوم باتوم به عنوان یک جوانساز غیر پلیمری پرداخته شده است. جوانسازهای پلیمری شامل نانوپلی، محصول دانش بنیان شرکت سیویل ابنیه جهان آباد، تیس لایف، محصول دانش بنیان شرکت تیس و روغن خوراکی بازیافتی اصلاح شده با پودر لاستیک می‌باشد. مشخصات فیزیکی این جوانسازها به

بررسی تأثیر استفاده از جوانسازهای پلیمری بر عملکرد مخلوط آسفالت بازیافتی

کردن نمونه قطعه موردنظر برای آزمایش خمش سه نقطه‌ای تهیه گردید.

طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالت بازیافتی به کمک روش مارشال و بر اساس استاندارد AASHTO T245 انجام شده است. در فرآیند طرح اختلاط مقدار قیر متناظر با درصد فضای خالی ۴ درصد به عنوان قیر بهینه انتخاب شد و قیر بهینه برای مخلوط‌های شاهد و مخلوط حاوی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تراشه آسفالت به ترتیب ۵/۴٪، ۳/۹۳٪، ۲/۵۵٪ و ۱/۲۳٪ می‌باشد.

۳-۳ برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی در این تحقیق شامل آزمایشات خزش دینامیکی، حساسیت رطوبتی و شکست نمونه SCB می‌باشد. جزئیات آزمایشات به شرح زیر ارائه شده است.

۳-۳-۱ آزمایش خزش دینامیکی

آزمایش خزش دینامیکی یکی از آزمایش‌های مناسب برای بررسی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار در دمای بالا بوده که بر اساس استاندارد US.NCHRP 9-19 انجام می‌شود. در این آزمایش مدت زمان اعمال بار برابر ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت برابر ۰/۹ ثانیه است. در این آزمایش تعداد سیکل بارگذاری که در آن تغییر شکل‌های ماندگار به طور ناگهانی شروع به افزایش می‌کند به عنوان عدد روانی تعریف می‌شود. عدد روانی شاخصی برای مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار شدگی است به صورتی که هر چه عدد روانی بزرگتر باشد مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی بیشتر است.

شکل ۲ خروجی آزمایش خزش دینامیکی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود منحنی کرنش تجمعی به ۳ ناحیه تقسیم می‌شوند. در ناحیه اول تغییر مکان‌های دایم بطور ناگهانی روی هم انگاشته می‌شوند، در ناحیه دوم افزایش شیب تغییر مکان دایم کاهش می‌یابد تا به مقدار ثابتی برسد و در ناحیه سوم شیب تغییر مکان دایم دوباره افزایش می‌یابد و مقدار تغییر مکان دایم به شدت روی هم

درصد و وکیوم باتوم ۲۰ درصد از وزن قیر تراشه‌ها شده بدست آمد. همچنین جوانساز نانوپلی از نظر میزان تأثیر بهتر از سایر جوانسازها بوده و تنها ۶ درصد از این جوانساز برای بهبود خصوصیات فیزیکی قیر پیر شده در این تحقیق کافی بوده است.



شکل ۱. بازیابی قیر به روش ایسون

۳-۳-۲ ساخت نمونه و طرح اختلاط

در این مخلوط نمونه‌های آسفالتی حاوی ۲۵٪، ۵۰٪، و ۷۵٪ تراشه آسفالت ساخته شدند. برای ساخت نمونه ابتدا مطابق با استاندارد AASHTO T312 مصالح سنگی طبیعی به مدت ۱۸ ساعت در دمای ۱۷۰ درجه قرار گرفته و تراشه‌های آسفالت با توجه به این‌که در دمای بالا ممکن است به قیر آن‌ها آسیب برسد به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۷۰ درجه قرار گرفتند. سپس جوانساز به تراشه‌های آسفالت اضافه و در قدم بعد با قیر و مصالح سنگی جدید مطابق طرح اختلاط مخلوط شدند. در انتها مخلوط آسفالت بازیافتی حاوی جوانساز، به منظور عمل‌آوری به مدت دو ساعت در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. پس از آن نمونه‌ها در قالب استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر ریخته شده و توسط متراکم کننده ژیراتوری تا رسیدن به فضای خالی ۷ درصد متراکم شدند.

برای تهیه نمونه‌های SCB، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای بزرگ با وزن مصالح سنگی ۴۷۰۰ گرم تهیه شد و سپس این نمونه‌ها به دیسک‌ها با ضخامت ۳۰ میلی‌متر برش داده شدند که با نصف کردن آن‌ها قطعات نیم دیسک حاصل شد و در انتها با ترک‌دار

است. آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده و پارامتر مقدار بحرانی انتگرال جی (J_c)^۸ به عنوان شاخص مقاومت در برابر ترک‌خوردگی تعریف شده است. انتگرال جی بیان‌کننده میزان تغییرات انرژی با گسترش ترک می‌باشد و با استفاده از رابطه شماره ۲ محاسبه می‌شود. شکل ۳ دستگاه و نمونه آزمایش SCB را نشان می‌دهد.

$$J_c = -\frac{1}{b} \frac{dU}{da} \quad (2)$$

در رابطه فوق U برابر با میزان انرژی بر حسب ژول و a برابر با طول ترک بر حسب متر می‌باشد.

پارامترهای انرژی شکست قبل و بعد از بار بیشینه هم با محاسبه سطح زیر نمودار بار-جابجایی قبل و بعد از بار بیشینه محاسبه شدند. این دو پارامتر به ترتیب بیانگر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شروع و گسترش ترک می‌باشد [Ziari et al. 2020].



شکل ۳. تنظیمات و نحوه قرارگیری نمونه SCB در آزمایش

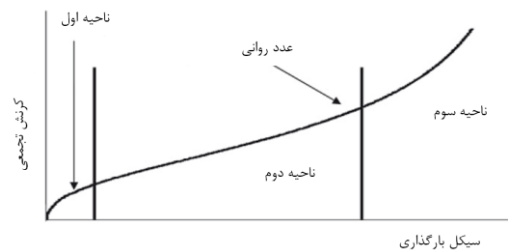
شکست

۴. بحث و بررسی نتایج

۴-۱- آزمایش خزش دینامیکی

نتایج آزمایش خزش دینامیکی به شرح شکل شماره ۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش درصد تراشه آسفالت، مقاومت مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی در برابر شیارشدگی به طور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند. این موضوع به علت افزایش سختی مخلوط ناشی از اضافه کردن تراشه‌های با قیر پیر شده و سخت در آن می‌باشد. این موضوع در

انگاشته می‌شود. تعداد سیکل در شروع ناحیه سوم به عنوان عدد روانی شناخته می‌شود [Goh and You 2009].



شکل ۲. تصویر شماتیک از خروجی آزمایش خزش دینامیکی

۳-۳-۲- آزمایش حساسیت رطوبتی

در این تحقیق حساسیت رطوبتی توسط آزمایش لاتمن^۷ اصلاح شده بر اساس استاندارد AASHTO T283 انجام شده است. در این آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (TSR) نمونه‌های آسفالتی بر روی ۳ نمونه خشک و ۳ نمونه اشباع انجام می‌شود. با تقسیم مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های تر به نمونه‌های خشک، مقدار TSR تعیین می‌شود. به منظور اشباع کردن نمونه‌ها، ابتدا هر یک از آن‌ها تحت مکش ۷۶ کیلوپاسکال قرار گرفته، سپس به مدت ۲۴ ساعت در فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در نهایت این نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. برای محاسبه مقاومت کششی غیر مستقیم از رابطه ۱ استفاده می‌شوند.

$$St = (2P / (\pi t D)) \quad (1)$$

در رابطه فوق P نیروی بیشینه بر حسب نیوتون، S مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب مگا پاسکال، t و D هم به ترتیب ضخامت و قطر نمونه بر حسب میلی‌متر می‌باشند.

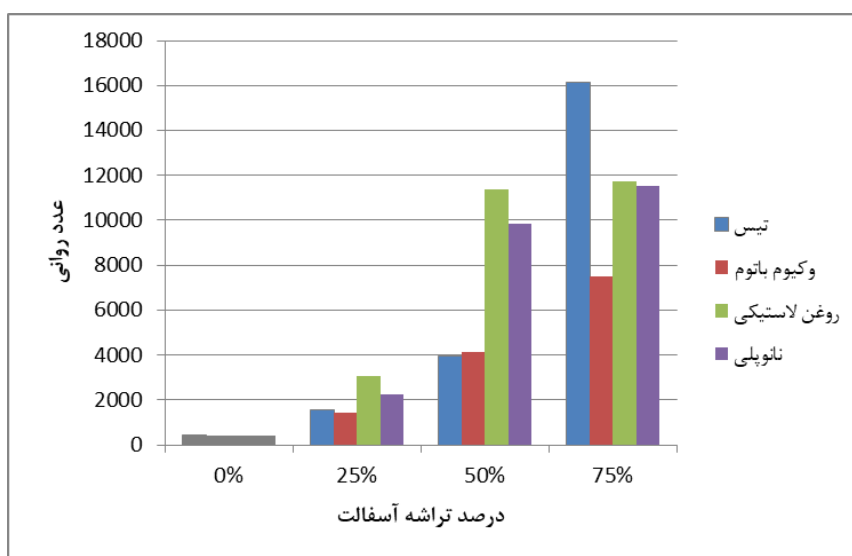
۳-۳-۳- آزمایش شکست نمونه SCB

آزمایش شکست نمونه SCB برای سنجش مقاومت مخلوط-های آسفالتی در برابر ترک خوردگی کاربرد دارد. در این تحقیق آزمایش شکست نمونه SCB در شرایط مود یک طبق استاندارد ASTM D8044 انجام شد. طی این فرآیند از یک دستگاه بارگذاری نیروی یکنواخت با قدرت ۱۵ کیلو نیوتن استفاده شد. فاصله بین تکیه‌گاه‌ها در این آزمایش ۱۲۷ میلی‌متر

بررسی تأثیر استفاده از جوانسازهای پلیمری بر عملکرد مخلوط آسفالت بازیافتی

باشد. علت این موضوع افزایش سختی مخلوط در اثر اضافه کردن پلیمر به مخلوط می‌باشد. در مطالعات گذشته نیز نشان داده شده است که زمانی که پلیمر به مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی حاوی جوانساز اضافه می‌شود، پلیمر در قیر جدید مشارکت می‌کند و باعث بالا رفتن مدول مختلط قیر می‌شود. این موضوع نهایتاً به بهبود عملکرد شیارشدگی مخلوط منجر می‌شود [Daryaee et al. 2020, Daryaee et al. 2021].

پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است [Vargas- Nordbeck and Timm 2012, Ziari et al. 2019, Taherkhani, Noorian and Bayat 2021, مقایسه میان عدد روانی مخلوط‌های حاوی جوانسازهای پلیمری با عدد روانی مخلوط‌های حاوی وکیوم باتوم نشان می‌دهد که استفاده از جوانسازهای پلیمری تأثیر بسزایی در افزایش مقاومت مخلوط‌های بازیافتی در برابر شیارشدگی دارد و عدد روانی مخلوط‌های حاوی وکیوم باتوم تا حد زیادی پایین‌تر از عدد روانی مخلوط‌های حاوی جوانساز پلیمری می‌-



شکل ۴. نتایج آزمایشات خزش دینامیکی

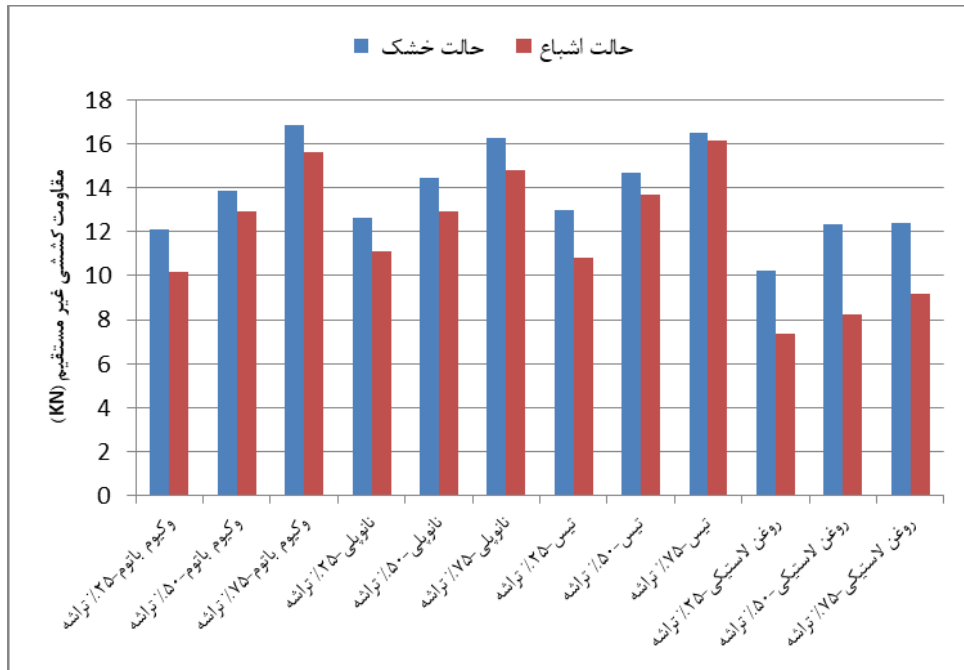
تیس تقریباً مشابه با یکدیگر می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که علی‌رغم این که روغن‌های سوخته خوراکی جوانسازهای مناسبی هستند، اصلاح آن‌ها با پودر لاستیک نمی‌تواند عملکرد مناسبی را در پی داشته باشد. این موضوع می‌تواند به علت جذب مالتهای موجود در جوانساز توسط پودر لاستیک اتفاق افتاده باشد. در واقع زمانی که پودر لاستیک به روغن سوخته اضافه می‌شود، مقداری از مالتهای موجود در روغن جذب پودر لاستیک می‌شود [Dong et al. 2012]. در نتیجه مالتهای کمتری در فرآیند جوانسازی قیر شرکت می‌کند و این موضوع باعث می‌شود تا قیرهای پیر شده حاوی جوانساز پودر لاستیکی عملکرد مناسبی نداشته باشند. همچنین نتایج TSR برای

۴-۲ آزمایش حساسیت رطوبتی

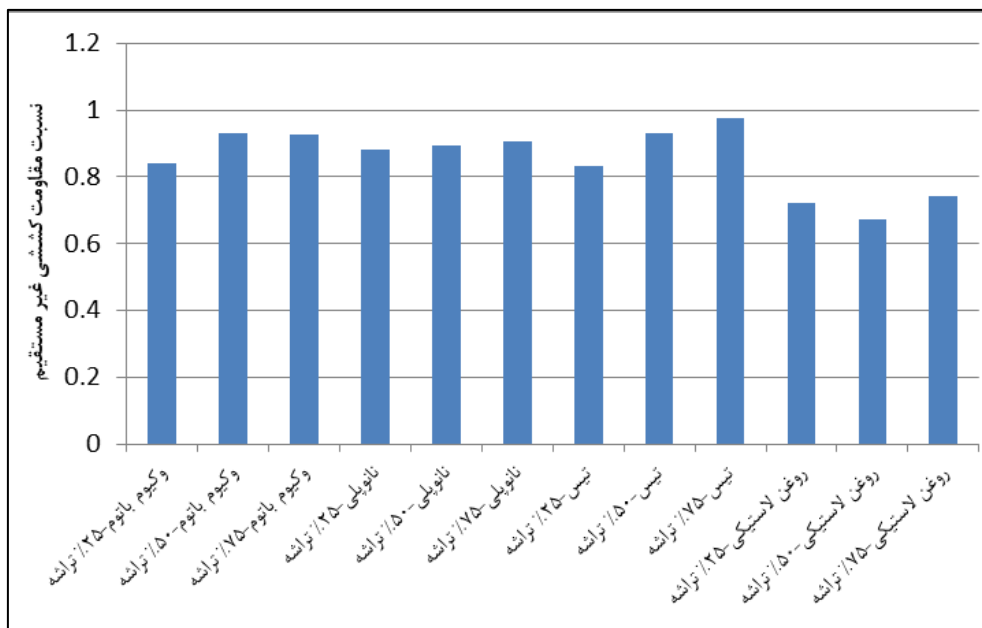
نتایج آزمایشات مقاومت کششی غیرمستقیم برای نمونه‌های اشباع و خشک به شرح شکل شماره ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با اضافه شدن درصد تراشه آسفالت، مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌ها افزایش پیدا می‌کند. این موضوع به علت افزایش سختی در مخلوط‌های آسفالتی و افزایش حداکثر بار واردشده به نمونه‌ها می‌باشد. مقایسه میان جوانسازها نشان می‌دهد که روغن خوراکی اصلاح‌شده با پودر لاستیک در برابر نیروهای کششی بسیار ضعیف‌تر و حساس‌تر از نمونه‌های حاوی جوانساز پلیمری هستند. همچنین عملکرد جوانسازهای وکیوم باتوم، نانوپلی و

اسفالتی بازیافتی ایجاد نمی‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که استفاده از تراشه آسفالت باعث بهبود حساسیت رطوبتی در مخلوط آسفالتی می‌گردد. علت این امر وجود یک‌لایه قیر چسبیده به مصالح سنگی و به اصلاح تشکیل سنگدانه سیاه است که مانع از نفوذ رطوبت به سطح سنگدانه می‌شود [Ziari et al. 2019, Ziari et al. 2019].

نمونه‌های مختلف به شرح شکل (۶) است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد این پارامتر برای تمام نمونه‌های حاوی جوانسازهای پلیمری و غیر پلیمری بالاتر از ۰/۸ است. این موضوع بیانگر آن است که مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی مشکلی در برابر حساسیت رطوبتی ندارند و همچنین استفاده از جوانساز پلیمری مشکلی برای حساسیت رطوبتی مخلوط‌های



شکل ۵. مقاومت کششی نمونه‌های اشباع و خشک مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی حاوی جوانسازهای مختلف پلیمری

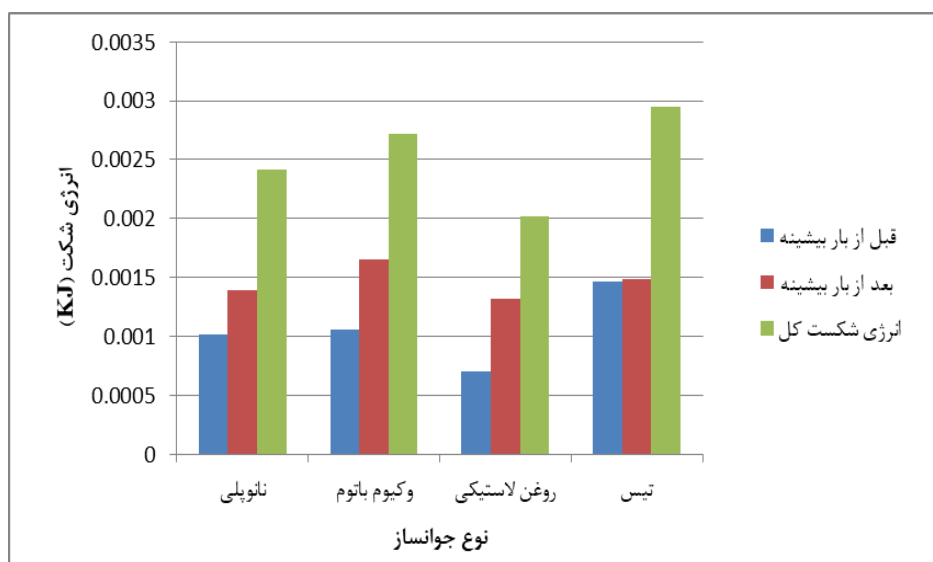


شکل ۶. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های حاوی جوانسازهای پلیمری

۴-۳ آزمایش شکست نمونه SCB

نتایج مربوط به انرژی شکست قبل و بعد از بار بیشینه در نمونه‌های آسفالتی بازیافتی به شرح شکل‌های ۷ تا ۹ می‌باشد. در مرحله اول مقایسه بین ۳ نمودار نشان می‌دهد که افزایش درصد تراشه آسفالت موجب کاهش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک خوردگی می‌شود. این موضوع به علت ترد و شکننده بودن قیر پیر شده در تراشه‌های آسفالت اتفاق افتاده است [Moniri et al. 2020, Pirmohammad, Sobhi, Yusefi 2020]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود انرژی شکست قبل از بار بیشینه (مقاومت در برابر شروع ترک) برای نمونه‌های حاوی جوانساز پلیمری کمتر از جوانساز وکیوم باتوم است. اختلاف این پارامتر بین جوانسازها با اضافه کردن ۷۵ درصد تراشه آسفالت بسیار زیاد می‌شود. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که مقاومت در برابر گسترش ترک برای جوانسازهای پلیمری مانند نانوپلی و جوانساز تیس بیشتر از وکیوم باتوم است. بنابراین این طور می‌توان استنباط کرد که نمونه‌های حاوی جوانساز پلیمری دارای مقاومت کمتر در برابر شروع ترک و مقاومت بیشتر در برابر گسترش ترک هستند و به

عبارت دیگر نمونه‌های حاوی جوانسازهای پلیمری زودتر ترک می‌خورند اما ترک در آن‌ها دیرتر رشد می‌کند. نتایج مربوط به مقدار (Jc) در مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت با انواع مختلف جوانساز مطابق شکل ۱۰ می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار بحرانی انتگرال جی برای جوانسازهای نانوپلی و روغن خوراکی بازیافتی کم‌تر از جوانساز وکیوم باتوم است. روغن خوراکی اصلاح‌شده با پودر لاستیک ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. در واقع اختلاط جوانساز با پودر لاستیک و عملکرد پودر لاستیک در آن چندان مطلوب نمی‌باشد. علت این امر می‌تواند جذب مالتن موجود در روغن سوخته خوراکی توسط ذرات پودر لاستیک باشد [Dong et al. 2012]. این امر موجب می‌شود تا قدرت جوانسازی روغن بازیافتی پایین بیاید و در نتیجه مقاومت ترک خوردگی مخلوط‌های حاوی روغن بازیافتی خوراکی پودر لاستیکی کاهش بیابد. در بین جوانسازهای پلیمری عملکرد جوانساز تیس در مخلوط‌های حاوی ۵۰ و ۷۵ درصد تراشه آسفالت بهتر بوده است.



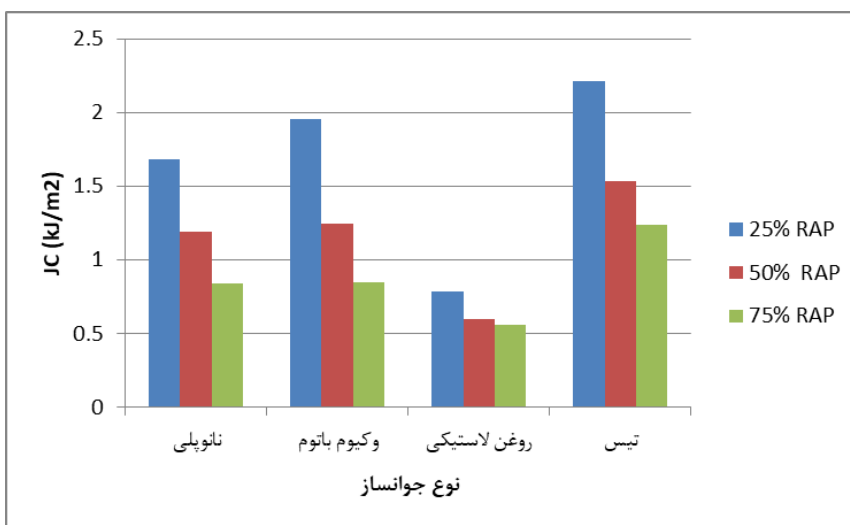
شکل ۷. انرژی شکست قبل و بعد از بار بیشینه برای مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالت



شکل ۸. انرژی شکست قبل و بعد از بار بیشینه برای مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت



شکل ۹. انرژی شکست قبل و بعد از بار بیشینه برای مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی حاوی ۷۵ درصد تراشه آسفالت



شکل ۱۰. مقدار بحرانی انرژی جی

۵. نتیجه گیری

اصلاح شده با پودر لاستیک ضعیف ترین عملکرد را داشته است.

- نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان می دهد که با اضافه شدن درصد تراشه آسفالت، مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوطها افزایش پیدا می کند. همچنین نشان می دهد که نمونه های حاوی جوانساز پلیمری مانند تیس و نانوپلی در برابر نیروهای کششی عملکرد بهتری از روغن خوراکی اصلاح شده با پودر لاستیک دارد.

- عملکرد جوانسازهای وکیوم باتوم، تیس و نانوپلی در برابر حساسیت رطوبتی تقریباً مشابه با یکدیگر می باشد. همچنین مشاهده شده است که جوانساز روغن خوراکی پودر لاستیکی عملکرد ضعیفی در برابر حساسیت رطوبتی دارد.

۶. پی نوشت ها

1. Elkashefi
2. Kaseer
3. Aromatic Extracts
4. Zaumanis
5. Zhou
6. Giustozzi
7. Lotman
8. Critical value of J integral (Jc)

۷. مراجع

- ملامحمدی عمران، اصغر & حسامی، سعید (۱۴۰۱). ارتباط شاخص های شیمیایی قیر با عملکرد خستگی و ترمیم مخلوط آسفالتی بازیافتی با استفاده از روغن ضایعاتی و پلیمر. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل. doi: 10.22075/jtie.2022.24629.1557

- زیاری، حسن، منیری، علی & دیوانداری، حسن (۱۳۹۹). بررسی عملکرد مخلوط آسفالت بازیافتی اصلاح شده با جوانساز و الیاف. فصلنامه مهندسی حمل و نقل-12(1), 85, 100.

doi: 10.22119/jte.2020.88172

در این تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از جوانسازهای پلیمری نانوپلی، تیس لایف و روغن خوراکی پودر لاستیکی و مقایسه آن ها با جوانساز غیر پلیمری وکیوم باتوم پرداخته شده است. برای این منظور پس از پیدا کردن درصد بهینه هر جوانساز و انجام آزمایشات طرح اختلاط، آزمایشات خزش دینامیکی، مقاومت کششی غیر مستقیم، حساسیت رطوبتی و شکست نمونه SCB برای بررسی مقاومت این مخلوطها در برابر شیارشدگی، خرابی رطوبتی و ترک خوردگی انجام شد. خلاصه نتایج به شرح زیر است.

- عدد روانی در آزمایش خزش دینامیکی با اضافه کردن جوانساز پلیمری تا حد زیادی افزایش می یابد.

- جوانساز روغن خوراکی پودر لاستیکی در درصدهای پایین و میانی تراشه آسفالت تأثیر مطلوبی بر عملکرد شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی بازیافتی دارند اما در درصدهای بالا تأثیر این جوانسازها کم تر می شود.

- نتایج آزمایشات شکست نمونه SCB نشان داد که انرژی شکست مخلوطهای آسفالتی بازیافتی حاوی وکیوم باتوم بیشتر از انرژی شکست مخلوطهای حاوی جوانساز پلیمری است. همچنین عملکرد جوانسازهای تیس و نانوپلی بسیار بهتر از جوانساز روغن خوراکی پودر لاستیکی بوده است و این جوانساز عملکرد بسیار ضعیفی در مقاومت در برابر شروع ترک از خود نشان داده است.

- نتایج انرژی شکست بعد از بار بیشینه نشان می دهد که مقاومت در برابر گسترش ترک برای جوانسازهای پلیمری مانند نانوپلی و جوانساز تیس بیشتر از وکیوم باتوم است. لذا می توان این طور نتیجه گیری کرد که جوانسازهای پلیمری راحت تر ترک می خورند اما ترکها در آن ها دیرتر رشد می کنند.

- مقدار بحرانی انتگرال جی برای جوانسازهای پلیمری کم تر از جوانساز وکیوم باتوم است. همچنین روغن گیاهی

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال شانزدهم / شماره اول (۶۲) / پاییز ۱۴۰۳

- Infrared analysis". Road Materials and Pavement Design, Vol.19, No. 8, pp. 1750-1770.
- Giustozzi, F., M. Crispino, E. Toraldo and E. Mariani. (2015) "Mix design of polymer-modified and fiber-reinforced warm-mix asphalts with high amount of reclaimed asphalt pavement: Achieving sustainable and high-performing pavements". Transportation Research Record, Vol.2523, No. 1, pp. 3-10.
- Goh, S. W. and Z. You. (2009) "A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test". Construction and Building Materials, Vol.23, No. 11, pp. 3398-3405.
- Hong, W., L. Mo, C. Pan, M. Riara, M. Wei and J. Zhang. (2020) "Investigation of rejuvenation and modification of aged asphalt binders by using aromatic oil-SBS polymer blend". Construction and Building Materials, Vol.231, No. pp. 117154.
- Hu, D., X. Gu, Q. Dong, L. Lyu, B. Cui and J. Pei. (2021) "Investigating the bio-rejuvenator effects on aged asphalt through exploring molecular evolution and chemical transformation of asphalt components during oxidative aging and regeneration". Journal of Cleaner Production, Vol.329, No. pp. 129711.
- Im, S., F. Zhou, R. Lee and T. Scullion. (2014) "Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials". Construction and Building Materials, Vol.53, No. pp. 596-603.
- Jain, S. and A. K. Chandrappa. (2022) "Rheological and chemical investigation on asphalt binder incorporating high recycled asphalt with waste cooking oil as rejuvenator".
- Abdelaziz, A., E. Masad, A. Epps Martin, E. A. Mercado and A. Bajaj. (2021) "Multiscale characterization of aging and rejuvenation in asphalt binder blends with high RAP contents". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.33, No. 10, pp. 04021287.
- Ahmed, R. B. and K. Hossain. (2020) "Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: A state-of-the-art review". Construction and building materials, Vol.230, No. pp. 116985.
- Bonicelli, A., P. Calvi, G. Martinez-Arguelles, L. Fuentes and F. Giustozzi (2017) "Experimental study on the use of rejuvenators and plastomeric polymers for improving durability of high RAP content asphalt mixtures". Construction and Building Materials, Vol.155, No. pp. 37-44.
- Daryaei, D., M. Ameri and A. Mansourkhaki. (2020) "Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures". Construction and Building Materials, Vol.235, No. pp. 117516.
- Daryaei, D., M. Habibpour, S. Gulzar and B. S. Underwood. (2021) "Combined effect of waste polymer and rejuvenator on performance properties of reclaimed asphalt binder". Construction and Building Materials, Vol.268, No. pp. 121059.
- Dong, D., X. Huang, X. Li and L. Zhang. (2012) "Swelling process of rubber in asphalt and its effect on the structure and properties of rubber and asphalt". Construction and Building Materials, Vol.29, No. pp. 316-322.
- Elkashef, M., J. Podolsky, R. C. Williams and E. W. Cochran. (2018) "Introducing a soybean oil-derived material as a potential rejuvenator of asphalt through rheology, mix characterisation and Fourier Transform

- Tarsi, G., P. Tataranni and C. Sangiorgi. (2020) "The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review". *Materials*, Vol.13, No. 18, pp. 4052.
- Vargas-Nordbeck, A. and D. H. Timm (2012). "Rutting characterization of warm mix asphalt and high RAP mixtures". *Road Materials and Pavement Design*, Vol.13, No. sup1, pp. 1-20.
- Zahoor, M., S. Nizamuddin, S. Madapusi and F. Giustozzi (2021). "Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review". *Journal of Cleaner Production*, Vol.278, No. pp. 123304.
- Zaumanis, M., R. B. Mallick and R. Frank (2013). "Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed Asphalt pavement mixtures". *Transportation research record*, Vol.2370, No. 1, pp. 17-25.
- Zaumanis, M., R. B. Mallick, L. Poulikakos and R. Frank (2014). "Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures". *Construction and Building Materials*, Vol.71, No. pp. 538-550.
- Zhou, Z., X. Gu, Q. Li, F. Ni and R. Yuan (2016). "Use of Rejuvenator, Styrene-Butadiene Rubber Latex, and Warm-Mix Asphalt Technology to Achieve Conventional Mixture Performance with 50% Reclaimed Asphalt Pavement". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2575, pp. 160-167.
- Ziari, H., M. R. M. Aliha, A. Moniri and Y. Saghafi (2020). "Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber". *Innovative Infrastructure Solutions*, Vol.7, No. 4, pp. 1-19.
- Kaseer, F., F. Yin, E. Arámbula-Mercado and A. Epps Martin. (2017) "Stiffness characterization of asphalt mixtures with high recycled material content and recycling agents". *Transportation Research Record*, Vol.2633, No. 1, pp. 58-68.
- Ma, Y., W. Hu, P. A. Polaczyk, B. Han, R. Xiao, M. Zhang and B. Huang. (2020) "Rheological and aging characteristics of the recycled asphalt binders with different rejuvenator incorporation methods". *Journal of Cleaner Production*, Vol.262, No. pp. 121249.
- Mohajeri, M. (2015). "Hot Mix Asphalt Recycling: Practices and Principles." No.
- Moniri, A., H. Ziari, A. Amini and M. Hajiloo. (2020) "Investigating the ANN model for cracking of HMA in terms of temperature, RAP and fibre content". *International Journal of Pavement Engineering*, No. pp. 1-13.
- Shen, J., S. Amirhanian and B. Tang. (2007) "Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures". *Construction and Building Materials*, Vol.21, No. 5, pp. 958-964.
- S. Pirmohammad, S. Sobhi, A. Yousefi. (2022) "Study on the effect of reclaimed asphalt pavement and rejuvenator on fracture behavior of WMA". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) 969-972.
- Taherkhani, H., Noorian, F., & Bayat, H. (2021) "Investigating the Volumetric, Stability and Creep Properties of Asphalt Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Waste Engine Oil". *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 12(3), 561-585. doi: 10.22119/jte.2021.87204

Construction and Building Materials, Vol.230, No. pp. 117015.

- Ziari, H., A. Amini, A. Moniri and M. Habibpour (2021). "Using the GMDH and ANFIS methods for predicting the crack resistance of fibre reinforced high RAP asphalt mixtures". Road Materials and Pavement Design, Vol.22, No. 10, pp. 2248-2266.

- Ziari, H., A. Moniri, P. Bahri and Y. Saghafi (2019). "The effect of rejuvenators on the aging resistance of recycled asphalt mixtures". Construction and Building Materials, Vol.224, No. pp. 89-98.

- Ziari, H., A. Moniri, P. Bahri and Y. Saghafi (2019). "Evaluation of performance properties of 50% recycled asphalt mixtures using three types of rejuvenators". Petroleum Science and Technology, Vol.37, No. 23, pp. 2355-2361.

- Ziari, H., A. Moniri and N. Norouzi (2019). "The effect of nanoclay as bitumen modifier on rutting performance of asphalt mixtures containing high content of rejuvenated reclaimed asphalt pavement". Petroleum Science and Technology, Vol.37, No. 17, pp. 1946-1951 .