

ارزیابی خصوصیات شکست و پتانسیل خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده در بارگذاری‌های مکرر

مقاله علمی - پژوهشی

شاهین شعبانی*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
احمد منصوریان، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
حسین زرین جوئی، دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shabani@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

صفحه ۲۲۲-۲۰۷

چکیده

یکی از ویژگی‌های ذاتی مخلوط‌های آسفالتی که مرتبط با خصوصیات ویسکوالاستیک قیر موجود در آن است خودترمیمی نام دارد. در اثر خاصیت خودترمیمی، آسیب‌های جزئی ایجاد شده در مخلوط آسفالتی طی فرایند بارگذاری تکرار شونده می‌تواند در دوره استراحت ترمیم شده و میزانی از ویژگی‌های نخست مخلوط بازیابی گردد. از این روی در پژوهش حاضر ابتدا خصوصیات شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمرهای استارین بوتادین استارین (SBS)، استارین بوتادین رابر (SBR) و پلی آلفا الفین غیربلوری (APO) تحت بار ثابت مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس با استفاده از آزمایش خستگی روی نمونه‌های نیم دایره‌ای شیار دار تحت زمان بارگذاری ۰/۲ ثانیه و زمان‌های استراحت ۰/۸ و ۲/۵ ثانیه پتانسیل خودترمیمی مخلوط‌های مورد بررسی در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که مقاومت شکست و انرژی شکست در مخلوط‌های آسفالتی پلیمری اصلاح شده به میزان قابل توجهی بیشتر از نمونه شاهد (بدون اصلاح کننده) است. از سوی دیگر بررسی رفتار خستگی و پدیده خودترمیمی در مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که افزایش زمان استراحت از ۰/۸ ثانیه به ۲/۵ منجر به افزایش عمر خستگی مخلوط‌ها شده است که این امر پتانسیل خودترمیمی در مخلوط‌های آسفالتی را نمایان می‌سازد. علاوه بر این، در بین مخلوط‌های مورد آزمایش، مخلوط اصلاح شده با پلیمر APO بهترین عملکرد خستگی و رفتار خودترمیمی را نشان داده است و پس از آن مخلوط‌های حاوی پلیمر SBR و SBS عملکرد بهتری در مقایسه با مخلوط شاهد نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: مقاومت شکست، خودترمیمی، خستگی، زمان استراحت، مخلوط آسفالتی اصلاح شده

۱-مقدمه

طرح، عملکرد قابل قبولی را چه از نظر سازه‌ای و چه بهره‌برداری ارائه دهد [Xiao, Zhao and Amir Khanian, 2009].
روسازی از زمان احداث و با شروع بهره‌برداری همواره تحت تاثیر دو عامل بارترافیکی و شرایط آب و هوایی در معرض

روسازی یکی از اجزای اساسی راه‌ها است که با هدف تحمل بارهای ترافیکی و تغییرات آب و هوایی و همچنین ارائه یک سطح صاف و هموار، که تأمین کننده ایمنی و راحتی تردد وسایل نقلیه باشد، طراحی می‌گردد. روسازی راه بایستی بتواند در دوره

بر انجام آزمایش خستگی تحت بارگذاری پیوسته تمرکز داشته و خاصیت خود ترمیمی مخلوط‌های آسفالتی را در نظر نمی‌گیرد. درحالی‌که آسفالت، به‌علت خاصیت ویسکوالاستیک قیر، ماده‌ای خود ترمیم بوده و می‌تواند در زمان استراحت (یعنی فاصله دو بارگذاری)، مقداری از تغییر شکل‌های ایجاد شده را بازیابی کند. موضوع خودترمیمی در آسفالت به حدود دهه ۷۰-۱۹۶۰ بر می‌گردد، زمانی که محققین متوجه شدند که برای یک مخلوط آسفالتی تحت چرخه بارگذاری با زمان استراحت و بدون زمان استراحت تفاوت عمر خدمت‌دهی وجود دارد. پس از آن در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی تحقیقات آزمایشگاهی گسترده‌ای در مورد تأثیر زمان استراحت بر خستگی صورت گرفت [Bonnaure, Huibers and Boonders, 1982].

در آن زمان بسیاری از محققین با ایجاد زمان استراحت بین دفعات بارگذاری، تأثیر عوامل متعددی نظیر دما و زمان استراحت را بر ترمیم مورد مطالعه قرار دادند که نتایج به دست آمده نشان داد ترمیم، تأثیر قابل‌توجهی بر روند خستگی مخلوط آسفالتی دارد و می‌تواند عمرخستگی را تا ۱۰ برابر افزایش دهد [Castro and Sánchez, 2006]. با این‌حال مطالعات انجام گرفته نشان داده است که مکانیزم اصلی خودترمیمی در قیر و مخلوط آسفالتی همچنان ناشناخته است و تا به حال تعریف، معیار و روش آزمایش استاندارد که مورد توافق همگان باشد، مطرح نشده است [Varma, Balieu and Kringos, 2021]. بر اساس مطالعات انجام‌گرفته در حال حاضر، انواع مختلفی از آزمایش‌های خستگی آزمایشگاهی نظیر آزمایش کشش مستقیم، آزمایش کشش غیرمستقیم، آزمایش خمش تیرچه چهار نقطه‌ای و آزمایش خمش نمونه نیم‌دایره به‌منظور سنجش خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی وجود دارد [Haggag, Mogawer and Bonaquist, 2011]. با این وجود اگرچه نمونه‌ها برای آزمایش کشش مستقیم می‌توانند اشکال مختلفی داشته باشند، اما حالت تنش کشش مستقیم با شرایط تنش واقعی روسازی متفاوت است؛ همچنین آماده‌سازی نمونه برای این آزمایش آسان نیست و تکرارپذیری آزمایش پایین است. در مقابل اگرچه آزمایش کشش غیرمستقیم نسبتاً آسان است، با این‌حال وضعیت تنش نمونه در طول فرآیند بارگذاری پیچیده بوده و حالت تنش کششی غیرمستقیم با سازه‌های روسازی واقعی متفاوت است. الگوی تنش مشابه با روسازی واقعی را می‌توان در آزمایش خمش تیرچه چهار نقطه‌ای به دست آورد، با این‌حال این آزمایش نیز نمی‌تواند عملکرد روسازی را

خرابی و فرسودگی است. ترک خوردگی، تغییرشکل‌های ماندگار (نظیر شیافانداگی)، و آسیب‌های ناشی از رطوبت از خرابی‌های عمده روسازی است که هم بر عملکرد سازه‌ای و هم عملکرد بهره‌برداری آن اثر منفی دارد. ترک خوردگی روسازی می‌تواند در اثر تکرار بارگذاری ترافیکی (ترک خستگی) و یا ناشی از تنش‌های دمایی (ترک‌های دمای پایین و ترک‌های بلوکی) ایجاد شود. نفوذ آب به سازه روسازی از محل ترک‌های ایجاد شده در نهایت می‌تواند منجر به ایجاد آسیب‌های جدی سازه‌ای گردد که کاهش ظرفیت سازه‌ای روسازی را در پی دارد [Kim and Koh, 2012]. علاوه بر این، کیفیت و ایمنی تردد روسازی در اثر ترک خوردگی به طور محسوسی کاهش می‌یابد. براین اساس، کاهش امکان و شدت ترک خوردگی در روسازی‌های آسفالتی همواره مورد توجه متولیان راه‌ها و متخصصین حوزه روسازی بوده است. ترک خستگی در طول عمر روسازی، به‌دلیل جمع شدن کرنش‌های کوچک غیرقابل برگشت ناشی از عبور مکرر بارهای ترافیکی، ایجاد می‌گردد [Kavussi and Modarres, 2010]. این ترک‌ها در روسازی می‌تواند به دو شکل رشد از پایین به بالا و رشد از بالا به پایین ایجاد گردد. در ترک‌های با رشد پایین به بالا، عمر خستگی (یعنی تعداد دفعات بارگذاری تا رخداد ترک) را می‌توان به کرنش‌های کششی ایجاد شده در انتهای لایه آسفالتی و محل تماس با لایه اساس مرتبط دانست. درحالی‌که ترک‌های با رشد بالا به پایین را می‌توان به تنش‌های کششی در سطح روسازی و یا تنش‌های برشی ایجاد شده در لبه تماس چرخ وسیله نقلیه مرتبط دانست [Kavussi and Modarres, 2010].

۲- پیشینه تحقیق

بر اساس مطالعات صورت گرفته عوامل مؤثر بر عمر خستگی روسازی عبارت‌اند از نوع قیر به‌کار رفته در طرح اختلاط آسفالت، میزان و نوع بار ترافیکی اعمالی بر مسیر و شرایط محیطی نظیر دما و چرخه‌های یخبندان-ذوب بوده که اندرکنش این عوامل با یکدیگر، منجر به ایجاد کرنش‌های پلاستیک در مخلوط آسفالتی و به‌تبع آن ایجاد ترک خوردگی می‌شود. [Daryae, Ameri and Mansourkhaki, 2020] و [Bala and Napiah, 2020]. مطالعات گسترده‌ای در زمینه روش‌های سنجش خستگی مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته است اما اغلب این مطالعات

[Bahia et al., 1999]. در همین راستا در تحقیقی دیگر نشان داده شده که نرخ ترمیم قیر اصلاح شده‌ای که رده عملکردی آن در حدود قیر PG70-22 است به‌طور موثری بهتر از قیری خالص با رده عملکردی PG64-22 است [Carpenter and Shen, 1970]. هدف از این پژوهش بررسی اثر اصلاح‌کننده‌های پلیمری SBR، SBS و APAO بر خصوصیات شکست مخلوط آسفالتی در دمای میانی و سنجش عمر خستگی با در نظر گرفتن پتانسیل خود ترمیمی در دو سناریوهای مختلف بارگذاری شامل اعمال دو زمان استراحت بین دفعات بارگذاری است. در ارزیابی خستگی، پتانسیل خود ترمیمی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمرهای ذکر شده با مخلوط شاهد مقایسه شد.

۳- مصالح

۳-۱- قیر

قیر در مخلوط آسفالتی به عنوان یک عامل چسباننده عمل کرده و مصالح سنگی را به صورت یک حجم پیوسته با یکدیگر پیوند می‌دهد. این ماده دارای رفتار ویسکوالاستیک بوده و خصوصیات رفتاری آن وابسته به دما است. از این روی با توجه به شرایط آب و هوایی، قیر مورد استفاده در پژوهش حاضر قیر با درجه عملکردی PG64-22، تهیه شده از پالایشگاه حصار مهران است که خصوصیات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

۳-۲- مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از معدن آهکی - کوهی اسب چران واقع در شمال شرق تهران تهیه شده است. جدول ۲ نتایج آزمایش مرغوبیت مصالح سنگی و جدول ۳ دانه‌بندی مصالح سنگی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در جدول ۲ منظور از ریز دانه و درشت دانه به ترتیب مصالح عبوری و مانده روی الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلیمتر) است.

۳-۳- افزودنی‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

در پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر افزودنی‌های پلیمری بر خصوصیات خود ترمیمی مخلوط‌های آسفالتی از افزودنی‌های SBR، SBS و APAO استفاده گردید که در ادامه به شرح مختصری از هر افزودنی ارائه می‌شود.

به‌طور مؤثر ارزیابی کند زیرا نمونه‌های تیرچه به‌راحتی ساخته نمی‌شوند، آزمون تکرارپذیری پایینی داشته و امکان استفاده از نمونه مغزه‌گیری شده فراهم نیست

[Daryae, Ameri and Mansourkhaki, 2020].

در مقابل آزمون خمش نمونه نیم دایره‌ای (SCB) به دلیل آماده‌سازی و فرآیند آزمایش ساده‌تر، نسبت به دیگر روش‌های سنجش خستگی برتری دارد. در این آزمایش نمونه‌ها به صورت نیم دیسک از نمونه استوانه‌ای شکل استخراج شده و در طی فرایند آزمایش، نمونه هم‌زمان فشرده و کشیده می‌شود. از این رو در طی آزمایش SCB حالت تنش نمونه مشابه روسازی واقعی است. همچنین، استفاده از نمونه‌های مغزه‌گیری شده از روسازی نیز در این آزمایش فراهم است [Bala and Napiah, 2020]. استفاده از مواد افزودنی یکی از راهکارهای موثر جهت بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک خوردگی است. اثر مثبت کاربرد برخی پلیمرها نظیر استایرن بوتادین استایرن (SBS) بر بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی هم در نتایج آزمایشگاهی و هم مشاهدات میدانی به اثبات رسیده است. این مهم در آزمایش خستگی با در نظر گرفتن خاصیت خود ترمیمی نیز نمود پیدا می‌کند. در تحقیقی از آزمایش خستگی به روش SCB با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و دوره استراحت ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ ثانیه به منظور سنجش خود ترمیمی مخلوط آسفالتی حاوی SBS استفاده شد. بر اساس نتایج بدست آمده، افزایش زمان استراحت و اضافه کردن SBS منجر به بهبود عمر خستگی مخلوط آسفالتی می‌گردد [Jiang et al., 2019]. تحقیقاتی دیگر با استفاده از آزمایش خستگی تیرچه خمشی روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با MCR^۳، SB^۴، SBR^۵ و SBS و مقادیری از MSBS^۶ انجام گرفت. بر اساس نتایج حاصل شده از این تحقیق، کاربرد پلیمرهای اصلاح کننده شامل SBR، SB و MSBS، در سطوح بالای بارگذاری (بارهای محوری سنگین) منجر به افزایش قابل توجه مقاومت مخلوط در برابر خستگی نسبت به نمونه شاهد می‌گردد [Newman, 2004]. مطالعات انجام شده در مورد بررسی خصوصیات خود ترمیمی دو نوع قیر خالص، دو نوع قیر اصلاح شده با پلاستومر، دو نوع قیر اصلاح شده با الاستومر و دو قیر پیر شده نشان داد که قیر اصلاح شده پتانسیل ترمیم بهتری را نسبت به قیر اصلی نشان می‌دهد. علاوه بر این نتایج نشان داد که نوع قیر و تکنولوژی اصلاح قیر رابطه مستقیمی با خاصیت خود ترمیمی دارد.

۳-۳-۱- پلیمر SBS

از این رو، در پژوهش حاضر از ۳/۵ درصد SBR به منظور ساخت مخلوط آسفالتی اصلاح شده با SBR استفاده شد [Alavi and Sadeghi, 2022].

پلیمر استایرن-بوتادی-ان-استایرن از خانواده الاستومرهای ترموپلاستیک ساخته شده بر پایه استایرن بوده و دارای نقطه ذوبی بین ۱۶۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس است. انتخاب غلظت ایده آل برای میزان SBS موجود در قیرهای اصلاح شده به منظور بهبود خواص فیزیکی، مورفولوژیکی و رئولوژیکی حائز اهمیت بسیار است. غلظت‌های پایین SBS ممکن است منجر به عدم دستیابی به ویژگی‌های مورد نیاز مهندسی شود و در مقابل غلظت‌های بالا SBS مشکلاتی از قبیل جداسازی فازی، عدم پایداری مناسب به هنگام ذخیره سازی و مشکلاتی به هنگام پمپاژ قیر در مرحله اجرا (به علت بالارفتن غیرمعمول ویسکوزیته قیر) به وجود می‌آورد. بر اساس مطالعات انجام شده فرایند اختلاط قیر و SBS، به منظور ساخت قیر اصلاح شده، در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس با سرعت برش ۳۰۰۰-۴۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۳۰ تا ۴۵ دقیقه انجام شد. علاوه بر این غلظت بهینه SBS در قیر بین ۴/۵ تا ۵/۵ درصد وزنی از قیر توصیه شده است [علوی و صادقی، ۱۴۰۱]. از این رو، در پژوهش حاضر از ۵ درصد SBS به منظور ساخت مخلوط آسفالتی اصلاح شده با SBS استفاده شد [Alavi and Sadeghi, 2022].

۳-۳-۳- پلیمر APAO

پلیمر APAO ترکیبی از پلیمر SBS و اتکتیک پلی پروپیلن (APP) است که بر اساس مستندات موجود در کاتالوگ این افزودنی، فرایند اختلاط آن با قیر در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس با سرعت برش ۵۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۱ ساعت انجام گرفت. علاوه بر این مقدار پیشنهادی ۵ درصد وزنی از قیر جهت کاربرد افزودنی APAO مورد استفاده قرار گرفت.

ساخت نمونه‌های آسفالتی

طرح اختلاط مخلوط آسفالتی

قیر و مصالح سنگی مورد استفاده در پژوهش حاضر در کارخانه شرکت کندوان پارس مورد استفاده قرار گرفته است. از این روی مخلوط‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر بر اساس مندرجات دفترچه طرح اختلاط کارخانه آسفالت شرکت کندوان پارس با اضافه کردن ۴/۷ درصد قیر ساخته شدند. در طی فرایند طرح اختلاط، ابتدا مصالح سنگی دانه‌بندی شده و قیر در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس با یکدیگر مخلوط شده و سپس در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس با اعمال ۷۵ ضربه توسط چکش مارشال استاندارد متراکم گردید. جدول شماره ۴ خلاصه نتایج آزمایش مارشال مخلوط شاهد را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است به منظور سنجش تاثیر افزودنی بر خصوصیات مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی، مقدار قیر بهینه برای مخلوط‌های حاوی افزودنی نیز برابر با ۴/۷ درصد وزنی از کل مخلوط در نظر گرفته شد.

۳-۳-۲- پلیمر SBR

لاستیک استایرن بوتادی-ان (SBR) کوپلیمری ساخته شده از استایرن و بوتادی-ان، با چگالی در حدود ۱/۵۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و قابل حل در آب است که عضوی از خانواده لاستیک‌های مصنوعی بوده و به دو صورت شیره لاتکس و پودری در دسترس است. بر اساس مطالعات انجام گرفته برای ساخت قیر اصلاح شده با SBR، قیر و افزودنی در دمای ۱۶۵ درجه سانتیگراد با سرعت ۴۰۰۰-۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۴۰-۵۰ دقیقه با یکدیگر مخلوط شد. علاوه بر این درصد بهینه SBR در قیر در حدود ۳ تا ۴ درصد وزنی قیر توصیه شده است.

جدول ۱. خصوصیات قیر PG 64-22 مصرفی

آزمایش	استاندارد	حداقل	حداکثر	مقدار به دست آمده
دمای نقطه اشتعال	ASTM D92	۲۳۰ C°	-	۳۰۰ C°
کندروانی در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس (RV)	ASTM D4402	-	۳ Pa.s	۰/۴۰۹ Pa.s
برش دینامیکی G*/sinδ (DSR)	ASTM D7175	۱ Kpa	-	۱/۰۳۰ Kpa
تغییر جرم قیر پس از RTFO	ASTM D2872	-	٪۱	٪۰/۱
برش دینامیکی پس از RTFO G*/sinδ (DSR)	ASTM D7175	۲/۲ Kpa	-	۲/۳ Kpa
برش دینامیکی پس از PAV G*×sinδ (DSR)	ASTM D7175	-	۵۰۰۰ Kpa	۱۶۸۸ Kpa
سفتی خزشی S (BBR)	ASTM D6648	-	۳۰۰MPa	۱۴۴MPa
مقدار (BBR) m-Value	ASTM D6648	۰/۳	-	۰/۳۳۵

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

نوع مصالح سنگی	آزمایش	استاندارد	حدود مجاز	نتیجه آزمایش
درشت دانه	سایش لوس آنجلس (٪)	ASTM C131	حداکثر ۳۰	۲۲
	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (٪)	ASTM C88	حداکثر ۸	۱/۶
	شکستگی مصالح سنگی در یک جبهه (٪)	ASTM D5821	حداقل ۹۵	۱۰۰
	شکستگی مصالح سنگی در دو جبهه (٪)	ASTM D5821	حداقل ۹۰	۱۰۰
	سنگدانه‌های پهن و دراز	ASTM D4791	حداکثر ۱۵	۰/۳
	وزن مخصوص	ASTM D127		۲/۶۱۸
ریز دانه	ارزش ماسه‌ای (٪)	ASTM D2419	حداقل ۵۰	۸۷
	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (٪)	ASTM C88	حداکثر ۱۲	۵/۲
	وزن مخصوص	ASTM D128		۲/۵۹۹

جدول ۳. دانه بندی مصالح مورد استفاده

شماره الک (اندازه الک)	اندازه الک	درصد عبوری
۱ اینچ	۱ اینچ	۱۰۰
۱/۲ اینچ	۱/۲ اینچ	۹۵
۴	۴/۷۵ (میلی متر)	۵۸
۸	۲/۳۶ (میلی متر)	۳۵
۵۰	۰/۳ (میلی متر)	۱۰
۲۰۰	۰/۰۷۵ (میلی متر)	۵

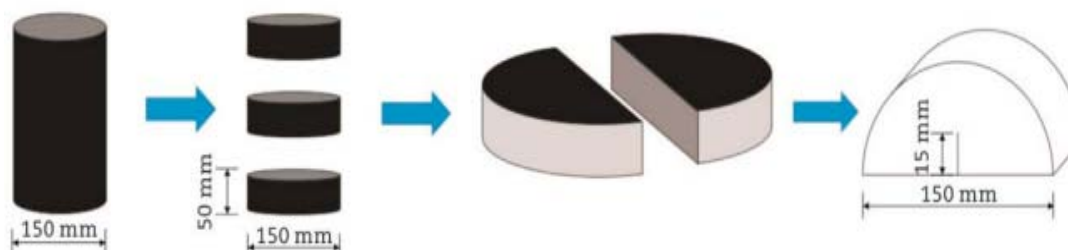
جدول ۴. خلاصه طرح اختلاط بهینه مخلوط شاهد

مقدار	مشخصات
۴/۷	قیر بهینه، %
۲/۴۵۲	حداکثر وزن مخصوص تئوری (G _{mm})
۴/۰	فضای خالی مخلوط آسفالتی متراکم (V _a)، %
۱۴/۳	فضای خالی مخلوط مصالح سنگی (VMA)، %
۴/۴	قیر مؤثر، %
۱/۱	نسبت فیلر به قیر مؤثر
۱۲۷۰	استحکام مارشال، کیلوگرم
۲/۳	روانی، (میلی‌متر)

برشکاری شده و نمونه‌های نیم‌دایره به قطر ۱۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۵۰ میلی‌متر و ترک مصنوعی (شیار) به عمق ۱۵ میلی‌متر تهیه گردید. شکل ۱ شماتیک تهیه نمونه نیم دیسک از نمونه استوانه‌ای شکل را نشان می‌دهد [Barzegari, Yousefi and Zeynali, 2004].

ساخت نمونه‌های SCB

نمونه‌های SCB مورد استفاده در پژوهش حاضر به روش تراکم چرخشی مطابق با استاندارد ASTM D6925 با قطر و ارتفاع به ترتیب، ۱۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و فضای خالی ۴ درصد ساخته و متراکم شدند. سپس نمونه‌های متراکم با استفاده از اره



شکل ۱. شماتیک تهیه نمونه نیم دیسک از نمونه استوانه‌ای شکل

۴- خصوصیات مکانیک شکست

۴-۱- مقاومت شکست

مقاومت شکست متناظر با حداکثر باری است که نمونه قبل از شروع رشد ترک از محل ترک مصنوعی نشان می‌دهد. از این رو با توجه به نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصله از آزمایش SCB، قله‌ی نمودار بیانگر مقاومت شکست نمونه نیم دایره‌ای شکل است. آزمایش شکست نمونه نیم‌دایره در بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای برای نمونه‌های این پژوهش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس با نرخ بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت.

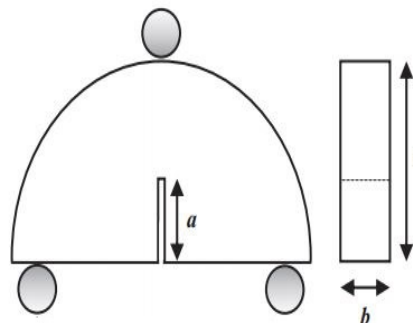
۴-۲- انرژی شکست (GF)

مقدار انرژی شکست از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (1)$$

$$A_{lig} = (r - a) * b$$

در این رابطه W_f بیانگر مقدار کار لازم برای شکست نمونه و متناظر با مساحت زیر سطح نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصله از آزمایش SCB بوده و A_{lig} بیانگر مساحت پیوند (سطح مقطع شکست) است. در رابطه مساحت پیوند مقدار شعاع نمونه برابر با r ، مقدار عمق برش برابر با a و مقدار ضخامت نمونه برابر با b است. شکل ۲ پارامترهای هندسی نمونه نیم دایره‌ای شکل مورد استفاده جهت محاسبه سطح مقطع شکست (A_{lig}) را نشان می‌دهد.



شکل ۲. پارامترهای هندسی نمونه نیم دایره‌ای شکل

۴-۳- شاخص انعطاف‌پذیری (FI)

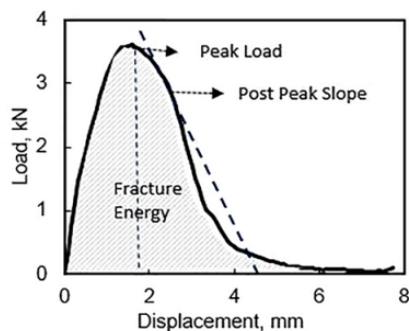
برای بررسی دقیق‌تر، نمودار بار-جابجایی در دمای میانی (۲۵ درجه سلسیوس)، مقدار حداکثر بار و مساحت زیر نمودار، بیان‌کننده‌ی مشخصات دقیق و کامل مخلوط نخواهد بود. از این رو برای بررسی بهتر نمودار از شاخص انعطاف‌پذیری استفاده می‌شود. این شاخص بیانگر نحوه گسترش و رشد ترک در مخلوط است به طوری‌که هرچه مقدار آن بالاتر باشد، تُردی مخلوط در حین گسترش ترک کمتر است. شاخص انعطاف‌پذیری از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$FI = 0.01 * \frac{G_f}{|m|} \quad (2)$$

در این رابطه G_f بیانگر انرژی شکست و m مقدار شیب موجود در نقطه عطف نمودار پس از رخ دادن بار حداکثر است. هر چه شاخص انعطاف‌پذیری کمتر باشد، مخلوط شکننده‌تر است.

۴-۴- شیب سمت چپ و راست منحنی

شیب سمت چپ منحنی بار - جابه‌جایی بیانگر سختی مخلوط است. به طوری‌که مقادیر بالاتر شیب بیانگر سختی بیشتر مخلوط آسفالتی است. از سوی دیگر شیب سمت راست نمودار بیانگر روند گسترش ترک است و هرچه مقدار این شیب بالاتر باشد گسترش ترک پس از وقوع با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. شکل ۳ پارامترهای مکانیک شکست را روی منحنی بار- جابه‌جایی نشان می‌دهد.



شکل ۳. پارامترهای مکانیک شکست روی منحنی بار- جابه‌جایی

خصوصیات خودترمیمی مخلوط آسفالتی

هر فرآیندی که توسط خود ماده باعث بهبود عملکرد ماده پس از آسیب قبلی شود، خود ترمیمی نام دارد [Jiang et al., 2019]. مخلوط آسفالتی به علت خاصیت ویسکوالاستیک خود می‌تواند آسیب‌های ناشی از بار ترافیکی یا تغییرات دمایی را در طول دوره استراحت خود را ترمیم کند. براین اساس، می‌توان ادعا داشت که مخلوط آسفالتی ماده‌ای خودترمیم است [Newman, 2004]. سنجش خودترمیمی در مخلوط آسفالتی با تعریف دوره زمان استراحت در دو حالت مختلف تعریف می‌گردد. خودترمیمی در حالت اول به نمونه اجازه می‌دهد تا پس از رسیدن به سطح معینی از خرابی، برای مدت معینی استراحت کند. به‌منظور سنجش میزان خودترمیمی مخلوط در این حالت می‌توان از آزمایش خودترمیمی ذخیره‌سازی شده (storage healing test) استفاده نمود [Bahia et al., 1999]. خودترمیمی در حالت دوم با تنظیم زمان استراحت در هر بار افزایش بار در آزمون خستگی انجام می‌گیرد که می‌تواند با یک آزمون خودترمیمی متناوب تعریف شود. بر اساس مطالعات انجام‌گرفته، به علت وجود یک دوره استراحت بین بارگذاری محورها در یک وسیله نقلیه و همچنین زمان استراحت بین عبور وسایل نقلیه متوالی، الگوی بارگذاری در خودترمیم حالت دوم با بارگذاری در واقعیت همخوانی بیشتری دارد [Carpenter and Shen, 1970]. سنجش خودترمیمی متناوب عمدتاً با آزمایش خستگی همراه است از این‌رو با توجه به مزایا و معایب ذکرشده در خصوص انواع روش‌های سنجش خستگی از آزمایش بارگذاری خستگی روی نمونه SCB با تعریف فاصله زمانی‌های معین و مقدار بار مناسب به‌منظور سنجش خاصیت خود ترمیمی در مخلوط آسفالتی گردید [Barzegari, Yousefi and Zeynali, 2004].

در همین راستا محققان دیگر به‌منظور سنجش خستگی مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی‌های متفاوت، عمر خستگی در سطوح تنش بین ۸ تا ۵۵ درصد مقاومت کششی غیر مستقیم ارا مورد بررسی قرار دارد [Lv et al., 2023]. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، حد بارگذاری ۵۰ درصد (۵۰ درصد مقاومت شکست نمونه SCB) برای سنجش خودترمیمی مخلوط‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت. در خصوص زمان استراحت بایستی به این نکته توجه داشت که زمان‌های استراحت خیلی کوتاه، فرصت کافی را به مخلوط جهت شروع و تکمیل فرایند خودترمیم را نمی‌دهد و از طرفی زمان‌های بارگذاری خیلی طولانی ممکن است در شرایطی منجر به تغییر شکل‌های ناخواسته در نمونه گردند. این امر به‌طور خاص در زمان‌های استراحت خیلی طولانی در دماهای بالا می‌تواند رخ دهد [González et al., 2018]. بر اساس مطالعه انجام‌شده توسط ژیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹، اثر زمان‌های استراحت ۰/۴ ثانیه تا ۱/۲ ثانیه در رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت که بر اساس یافته‌های این پژوهش، زمان استراحت معادل ۰/۸ ثانیه جهت ترمیم در مخلوط مناسب تشخیص داده شد [Jiang et al., 2019]. در مطالعه دیگر زمان‌های استراحت ۰/۱۸ ثانیه، ۰/۵۷ ثانیه و ۲/۵ ثانیه به‌منظور بررسی روند ایجاد خرابی‌های ماندگار در مخلوط آسفالتی تحت بارگذاری‌های تکرار شونده پیشنهاد شد [Ayar, Moreno-Navarro and Rubio-Gómez, 2016]. بر اساس نتایج مطالعات صورت گرفته، در این پژوهش زمان بارگذاری ۰/۲ ثانیه و زمان استراحت ۰/۸ و ۲/۵ ثانیه به‌منظور اعمال زمان استراحت در سنجش خود ترمیمی مخلوط‌های مورد بررسی، استفاده گردید.

نتایج

آزمایش SCB با نرخ بارگذاری ثابت

مقاومت شکست

شکل ۴ مقادیر بار حداکثر (مقاومت شکست) نمونه‌های آزمایش شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از شکل ۴ اضافه کردن مخلوط ساخته شده با افزودنی APAO بیشترین مقاومت شکست را نسبت به سایر مخلوط‌های مورد بررسی داشته است. به‌طوری که حداکثر نیروی شکست تحمل شده در مخلوط حاوی APAO، ۲۴ درصد بیشتر از مخلوط شاهد است. علاوه بر این نتایج نشان داد اضافه کردن افزودنی‌های SBS و SBR نیز منجر به افزایش مقاومت شکست در مخلوط آسفالتی نسبت به نمونه شاهد می‌شود که مقدار افزایش مقاومت شکست نسبت به نمونه شاهد برای مخلوط‌های حاوی افزودنی‌های SBS و SBR به‌ترتیب برابر ۱۵ و ۲۰ درصد بدست آمد.

انتخاب سطح تنش و زمان استراحت

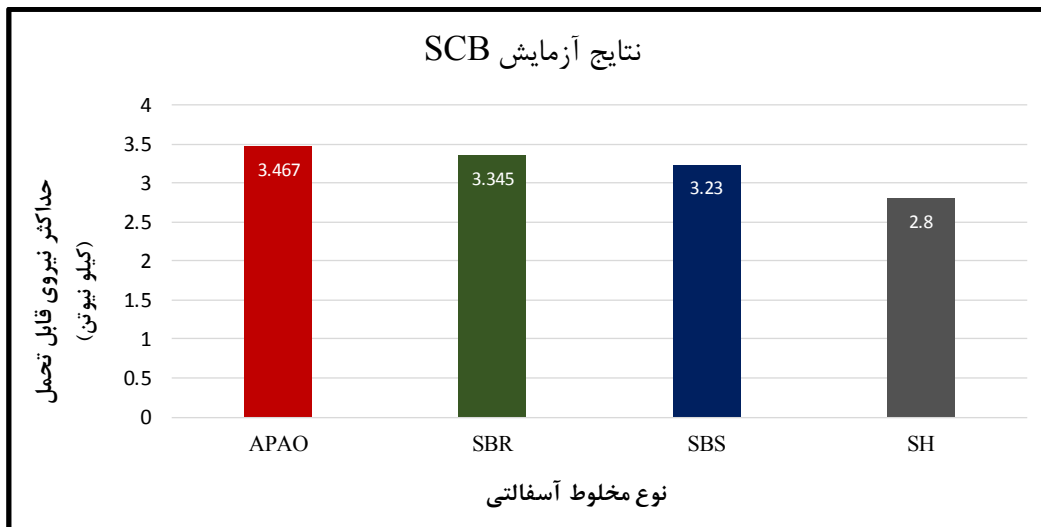
سطح تنش اعمالی و طول زمان استراحت از عوامل مؤثر در ارزیابی رفتار ترمیم در مخلوط‌های آسفالتی هستند. سطح تنش اعمالی بایستی به‌اندازه‌ای باشد که در هر چرخه بارگذاری بتواند خرابی‌های جزئی (ریزترک) در مخلوط ایجاد کند تا در نهایت اثر تجمع این خرابی‌ها، نمونه مورد آزمایش دچار افت در مقاومت و یا سختی گردد. بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط ژیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹، مقدار حداکثر ۱۳ درصد و حداکثر ۴۰ درصد بار شکست، برای اعمال بارگذاری خستگی در نظر گرفته شد [Jiang et al., 2019].

در مطالعه دیگر دان و همکاران مقادیر ۰/۲ تا ۰/۶ مقاومت کششی غیر مستقیم را به‌منظور اعمال بارگذاری سیکلیک در آزمایش خستگی نمونه در نظر گرفتند [Dan et al., 2021].

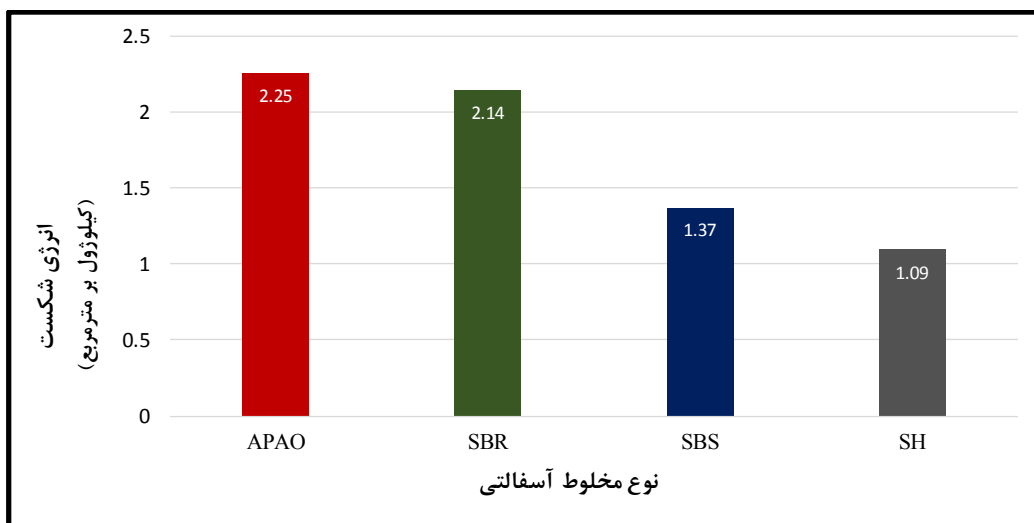
انرژی شکست

۹۶ و ۲۵ درصدی در انرژی شکست مخلوط‌های حاوی افزودنی نسبت به نمونه شاهد را به‌دنبال دارد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که اضافه کردن افزودنی‌های APAO و SBR در افزایش انرژی شکست مخلوط آسفالتی، در مقایسه با انرژی شکست مخلوط شاهد، حداقل چهار برابر موثرتر از افزودنی SBS عمل کرده‌اند.

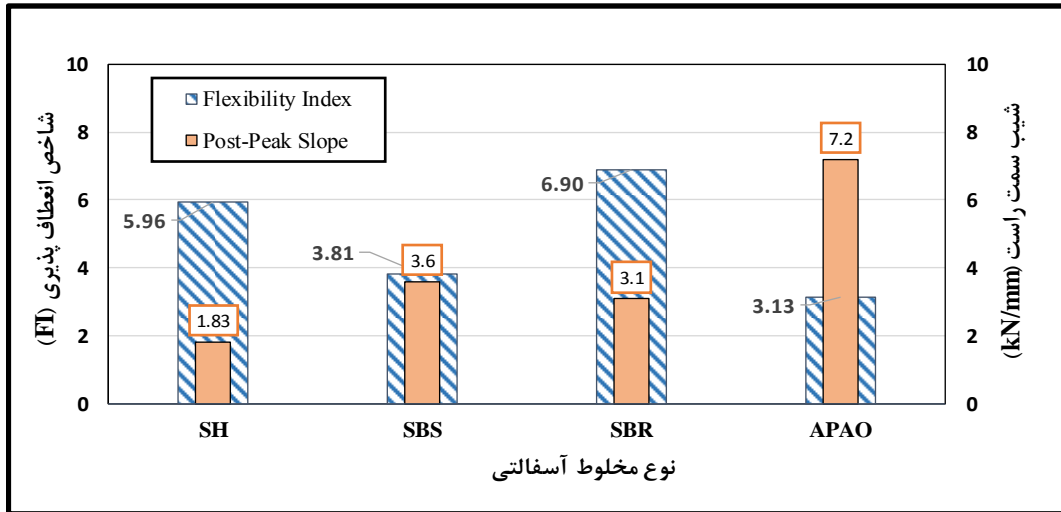
شکل ۵ انرژی شکست مخلوط‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل شده از این نمودار، استفاده از افزودنی APAO در مخلوط‌های آسفالتی منجر به افزایش ۱۰۶ درصدی انرژی شکست مخلوط نسبت به نمونه شاهد می‌گردد. علاوه بر این نتایج نشان داد استفاده از افزودنی‌های SBR و SBS در مخلوط آسفالتی به‌ترتیب افزایش



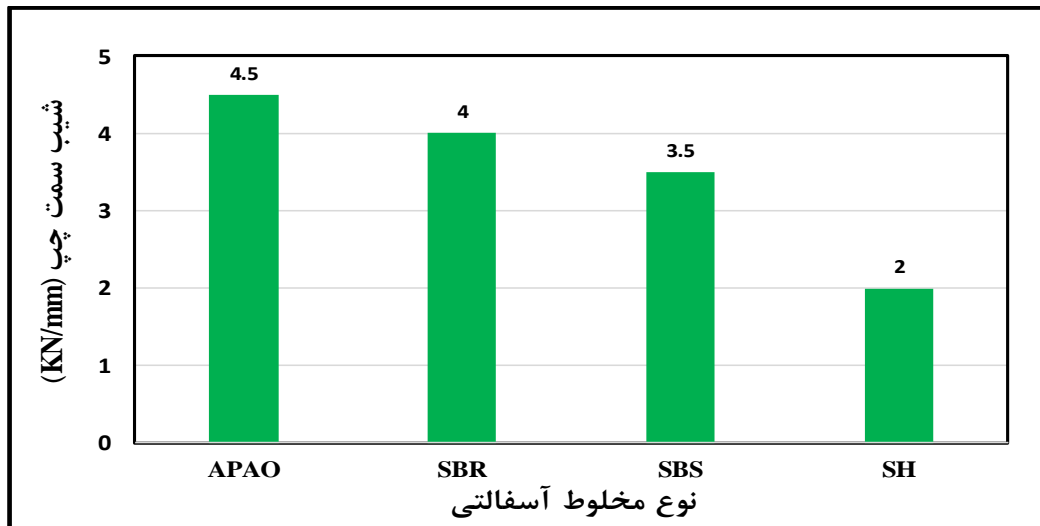
شکل ۴: مقادیر بار حداکثر (مقاومت شکست)



شکل ۵: مقادیر انرژی شکست



شکل ۶. مقادیر شاخص انعطاف پذیری و شیب سمت راست نمودار بار-جابجایی



شکل ۷. مقادیر شیب سمت چپ نمودار بار-جابجایی

شاخص انعطاف پذیری و شیب نمودار بار جابجایی

پلیمرهای SBS و SBR به ترتیب ۲ و ۱/۶ برابر بیشتر از نمونه شاهد است. از این روی می‌توان اذعان داشت که گسترش ترک در نمونه حاوی APAO با سرعت قابل توجهی رخ می‌دهد. در حالی که سرعت رشد ترک در نمونه حاوی SBR نسبت به سایر مخلوط‌های حاوی افزودنی کمتر است. از سوی دیگر نتایج به‌دست آمده از شکل ۶ نشان می‌دهد که نسبت شاخص انعطاف پذیری مخلوط حاوی SBR به مخلوط شاهد حدوداً ۱/۶ و نسبت شاخص انعطاف پذیری مخلوط‌های حاوی APAO و SBS به مخلوط شاهد به ترتیب تقریباً ۰/۵ تا ۰/۶ است. از این

شکل ۶ مقادیر شاخص انعطاف پذیری و شیب سمت راست نمودار بار-جابجایی را برای مخلوط‌های مورد ارزیابی در این پژوهش نشان می‌دهد. بر اساس نمودارهای ستونی نشان داده شده مقدار شیب سمت راست نمودار بار-جابجایی برای مخلوط حاوی پلیمر APAO به مراتب بزرگتر از دیگر مخلوط‌های مورد بررسی در این پژوهش است به طوری که شیب سمت راست در نمونه حاوی APAO نزدیک ۴ برابر بیشتر از شیب سمت راست نمونه‌های حاوی SBS و SBR است. علاوه بر این نتایج نشان داد که شیب سمت راست در نمونه‌های حاوی

نتایج به دست آمده از شکل ۷ نشان می‌دهد که سختی مخلوط حاوی APAO حدوداً ۲/۲۵ برابر سختی مخلوط شاهد و سختی مخلوط‌های حاوی SBR و SBS به ترتیب ۱/۷۵ و ۲ برابر مخلوط شاهد هست. از این روی می‌توان ادعان داشت که سختی مخلوط حاوی افزودنی APAO بیشتر از سایر مخلوط‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر است.

روی می‌توان ادعان داشت که شکل‌پذیری مخلوط حین گسترش ترک برای مخلوط حاوی SBR بیشتر از نمونه‌های حاوی افزودنی‌های دیگر و نمونه شاهد است. شیب سمت چپ منحنی بار - جابجایی معیاری برای سنجش سختی مخلوط است. به طوری که مقادیر بالاتر شیب بیانگر سختی بیشتر مخلوط آسفالتی است. شکل ۷ مقادیر شیب سمت چپ نمودار بار- جابجایی را برای مخلوط‌های مورد ارزیابی نشان می‌دهد.

آزمایش SCB با بار تکرار شونده

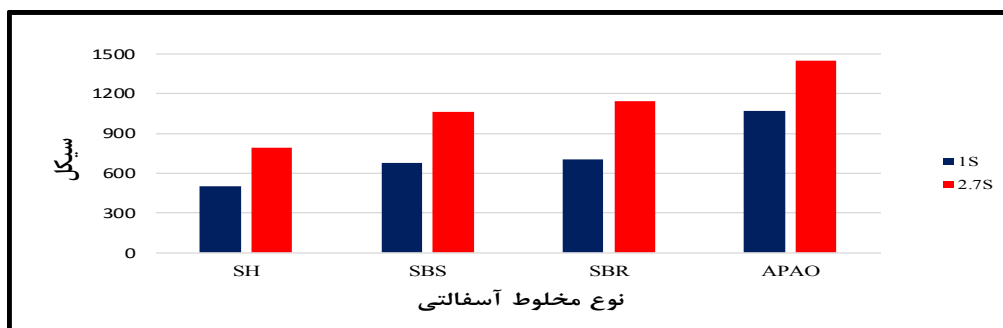
آزمایش SCB با بارگذاری تکرار شونده تحت بارگذاری نیم سینوسی و مدت زمان بارگذاری یک ثانیه (مدت زمان اعمال بار ۰/۲ ثانیه و مدت زمان استراحت برابر ۰/۸ ثانیه در هر چرخه بارگذاری) و ۲/۷ ثانیه (مدت زمان اعمال بار ۰/۲ ثانیه و مدت زمان استراحت برابر ۲/۵ ثانیه در هر چرخه بارگذاری) انجام گرفت. علاوه بر این نیروی لازم جهت شکست نمونه آسفالتی در آزمایش شکست ترک نمونه‌های نیم‌دایره با بارگذاری تکرار شونده معادل ۵۰ درصد حداکثر بار تحمل شده در آزمایش شکست SCB در نظر گرفته شد. جدول ۵ نیروی معادل ۵۰ درصد حداکثر بار تحمل شده در آزمایش شکست SCB با بار ثابت را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش SCB با بار تکرار شونده

شکل ۸ تاثیر خود ترمی بر مخلوط‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل شده از شکل ۸ در نظر گرفتن زمان خود ترمیمی در تمامی مخلوط‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر منجر به بهبود عمر خستگی مخلوط می‌گردد. بهبود خصوصیات خود ترمیمی برای مخلوط شاهد و مخلوط حاوی SBS برابر ۵۶ درصد، برای مخلوط حاوی SBR برابر ۶۲ درصد و برای مخلوط حاوی APAO برابر ۳۵ درصد است. از این روی می‌توان ادعان داشت که بیشترین تاثیر خود ترمیمی در مخلوط حاوی SBR حادث شده است.

جدول ۵. نیروی معادل ۵۰ درصد حداکثر بار تحمل شده در آزمایش SCB با بار ثابت

نوع مخلوط	SH	SBS	SBR	APAO
مقدار نیرو (کیلو نیوتن)	۱/۴	۱/۶۱۵	۱/۶۷۲	۱/۷۳۳



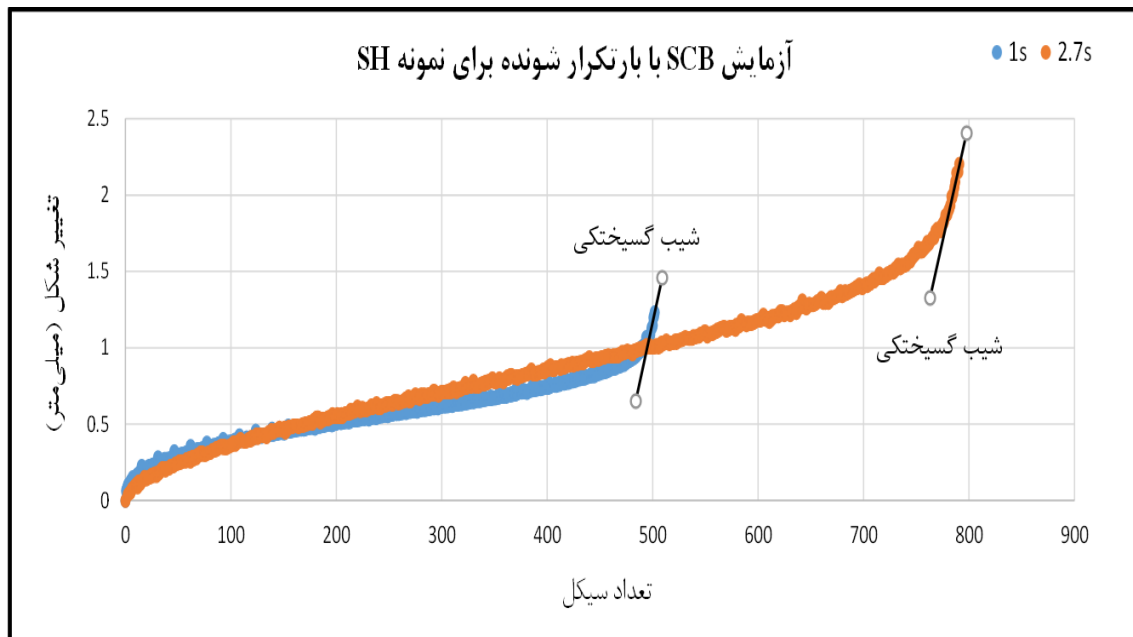
شکل ۸. تاثیر خود ترمی بر مخلوط‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر

بررسی اثر زمان استراحت بر خصوصیات خودترمیمی

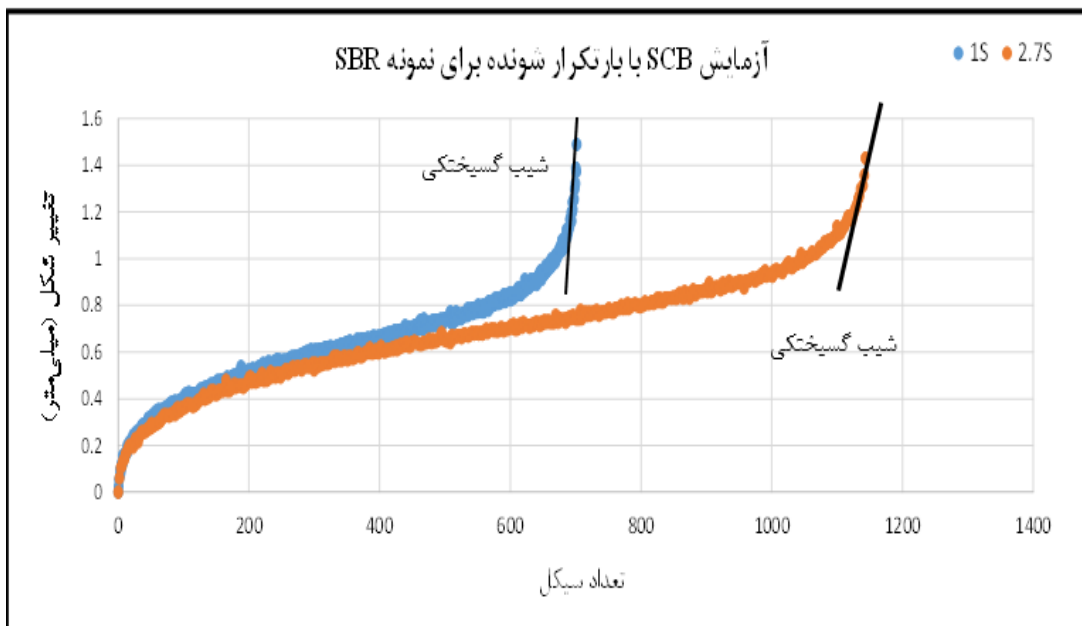
در مخلوط مقاوم است و با ترمیم برخی از آنها در زمان استراحت داده شده می‌تواند تاب آوری بیشتری داشته باشد به طوری که شکست نهایی در چرخه به مراتب بالاتری رخ دهد.

شکل ۱۰ تاثیر زمان استراحت بر میزان تغییر شکل‌های تجمعی در مخلوط حاوی پلیمر SBR را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۱۰ تغییر شکل‌های تجمعی تا ۴۰۰ چرخه بارگذاری چندان به زمان استراحت مرتبط نیست اما در چرخه‌های بارگذاری بیشتر از ۴۰۰، زمان استراحت ۲/۷ ثانیه با فراهم آوردن امکان ترمیم برخی ریزترک‌ها منجر به افزایش تاب آوری مخلوط در برابر شکست ناشی از بارگذاری خستگی می‌شود. شکل ۱۱ تاثیر زمان استراحت بر میزان تغییر شکل‌های تجمعی در مخلوط حاوی پلیمر SBS را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله از این شکل مشخص می‌شود که برای مخلوط حاوی پلیمر SBS تمایز بین نمودار تغییر شکل تجمعی-چرخه بارگذاری از چرخه‌های بیشتر از ۵۰ قابل مشاهده است به طوری که مقادیر تغییر شکل تجمعی در بارگذاری با زمان استراحت یک ثانیه به میزان قابل توجهی بیشتر از مقادیر تغییر شکل تجمعی در بارگذاری با زمان استراحت ۲/۷ ثانیه است.

جهت بررسی اثر زمان استراحت بر خصوصیات خود ترمیمی مخلوط‌های آسفالتی، نمودارهای تغییر شکل تجمعی به تعداد چرخه (سیکل)، برای هریک از مخلوط‌های آسفالتی در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نشان داده شده است. بر اساس نمودارهای نشان داده شده در شکل ۹، مشخص می‌شود که روند افزایش تغییر شکل‌های تجمعی در مخلوط شاهد در هر دو زمان استراحت ۱ و ۲/۷ ثانیه تا ۲۰۰ چرخه بارگذاری اولیه مشابه بوده و تمایز بین رفتار مخلوط ناشی از زمان استراحت بارگذاری در چرخه‌های بالاتر قابل مشاهده است. هرچند در چرخه‌های ۴۰۰ تا ۴۶۰ تغییر شکل تجمعی در بارگذاری با زمان استراحت یک ثانیه کمتر از تغییر شکل‌های تجمعی در بارگذاری با ۲/۷ ثانیه است. اما با نزدیک شدن به زمان شکست نمونه، میزان افزایش تغییر شکل‌های تجمعی به سرعت افزایش یافته و شکست در نمونه رخ می‌دهد. به عبارتی در چرخه‌های ۴۰۰ تا ۴۶۰ ریزترک‌های ایجاد شده در مخلوط در شرایط بارگذاری با زمان استراحت یک ثانیه قابلیت ترمیم کافی ندارند و با افزایش چرخه بارگذاری تعداد ترک‌ها و میزان بازشدگی آن‌ها افزایش می‌یابد تا جایی که در چرخه ۵۰۰ شکست در نمونه رخ می‌دهد. از طرفی، در زمان استراحت ۲/۷ ثانیه مخلوط هنوز در برابر ریزترک‌های ایجاد شده



شکل ۹. اثر زمان استراحت بر روند تغییر شکل تجمعی به چرخه بارگذاری برای مخلوط شاهد



شکل ۱۰. اثر زمان استراحت بر روند تغییر شکل تجمعی به چرخه بارگذاری برای مخلوط SBR



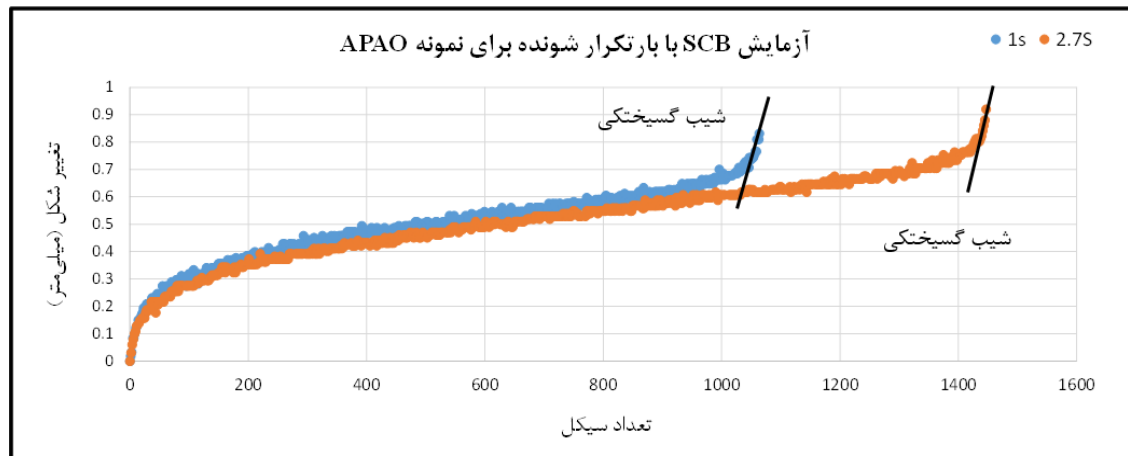
شکل ۱۱. اثر زمان استراحت بر روند تغییر شکل تجمعی به چرخه بارگذاری برای مخلوط SBS

پس از تعداد چرخه بیشتری نسبت به حالت بارگذاری با زمان استراحت یک ثانیه رخ دهد. به طوری که اختلاف بین تعداد چرخه بارگذاری در حالت بارگذاری با زمان استراحت ۲/۷ ثانیه، ۴۰۰ چرخه بیشتر از حالت بارگذاری با زمان استراحت یک ثانیه است. از سوی دیگر بررسی شیب گسیختگی (شیب انتهای نمودار تغییر شکل تجمعی به تعداد چرخه بارگذاری) در سناریوهای مختلف انجام آزمایش روی نمونه‌های مورد

رفتار مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر APAO قابل توجه است. مطابق شکل ۱۲، تا حدود ۱۰۰۰ چرخه بارگذاری تفاوت قابل توجهی در میزان تغییر شکل‌های تجمعی در بارگذاری‌های با زمان استراحت یک و ۲/۷ ثانیه دیده نمی‌شود. اما پس از آن در بارگذاری با زمان استراحت ۲/۷ ثانیه، فرصت نسبی به مخلوط جهت ترمیم برخی ریزترک‌های ایجاد شده داده می‌شود که در نهایت منجر می‌گردد تا شکست نهایی در این شرایط بارگذاری

در حالت آزمایش با زمان استراحت ۲/۵ ثانیه گسیختگی نهایی نمونه با سرعت کمتری نسبت به حالت زمان استراحت ۰/۸ ثانیه رخ می دهد.

ارزیابی نشان می دهد که روند رسیدن به گسیختگی کامل در نمونه شاهد و نمونه حاوی پلیمر APAO مستقل از زمان استراحت است. اما در نمونه حاوی پلیمر SBR و پلیمر SBS



شکل ۱۲. اثر زمان استراحت بر روند تغییر شکل تجمعی به چرخه بارگذاری برای مخلوط APAO

۵- نتیجه گیری

افزایش مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی شده اند (به دلیل داشتن مقاومت و انرژی شکست بالاتر) اما در صورت وقوع ترک، رشد آن با روند تدری دنبال می شود.

بررسی خصوصیات مقاومت خستگی مخلوط های آسفالتی نشان دهنده اثر مثبت پلیمرهای اصلاح کننده بر افزایش عمر خستگی مخلوط آسفالتی است. بیشترین اثر در استفاده از پلیمر APAO دیده شد و رفتار خستگی مخلوط های اصلاح شده با پلیمرهای SBS و SBR یکسان است.

افزایش زمان استراحت بین دفعات بارگذاری از ۰/۸ ثانیه به ۲/۵ ثانیه موجب افزایش عمر خستگی نمونه های مخلوط های آسفالتی شاهد و اصلاح شده گشت که ناشی از پدیده خودترمیمی در مخلوط آسفالتی است.

خودترمیمی مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با نمونه شاهد متفاوت است و بیشترین میزان اثر برای مخلوط حاوی پلیمر SBR دیده می شود.

روند گسیختگی نهایی در مخلوط های حاوی پلیمر SBR وابسته به زمان استراحت بین دفعات بارگذاری است و با توجه به مقدار کمتر شیب گسیختگی در حالت زمان استراحت ۲/۵ ثانیه به ۰/۸ ثانیه می توان نتیجه گرفت در این حالت گسیختگی نهایی نمونه با روند ملایم تری نسبت به سایر نمونه های مورد بررسی در پژوهش حاضر رخ می دهد.

در این پژوهش رفتار شکست و خودترمیمی حین بارگذاری های تکرارشونده برای مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با سه نوع پلیمر SBS، SBR و APAO با انجام آزمایش شکست نمونه نیم دایره ای مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور شاخص های مقاومت شکست، انرژی شکست و شاخص انعطاف جهت بررسی رفتار شکست تحت بارگذاری ثابت و با در نظر گرفتن سطح بار معادل ۵۰ درصد بار تحمل شده در آزمایش SCB با سرعت ثابت و زمان استراحت ۱ و ۲/۷ ثانیه، پدیده خود ترمیمی مخلوط های مورد بررسی در پژوهش حاضر ارزیابی شد. خلاصه یافته های حاصل از این پژوهش بدین شرح است.

استفاده از هر سه نوع افزودنی پلیمری موجب افزایش مقاومت شکست گردید. بیشترین مقاومت شکست برای نمونه اصلاح شده با APAO به دست آمد.

بررسی انرژی شکست نمونه های مختلف نشان از مقاومت بالاتر نمونه های اصلاح شده به ترک خوردگی در مقایسه با نمونه شاهد است. برای نمونه حاوی پلیمر APAO بیشترین انرژی شکست حاصل گشت.

بررسی شاخص انعطاف پذیری نمونه های مختلف ارزیابی شده نشان داد که گسترش ترک در نمونه حاوی پلیمر SBR با رفتار شکل پذیرتری نسبت به مخلوط های دیگر رخ می دهد.

مقدار شاخص انعطاف پذیری برای نمونه های اصلاح شده با پلیمرهای SBS و APAO حتی از نمونه شاهد هم کمتر بوده است. این نتیجه بیانگر این است که هرچند این دو پلیمر موجب

damage. *Construction and Building Materials*, 303, 124525.

-Daryaei, D., Ameri, M., & Mansourkhaki, A. (2020). Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures. *Construction and Building Materials*, 235, 117516.

-González, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., & Schlangen, E. (2018). Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: An approach through microwave radiation heating. *Journal of Environmental Management*, 214, 242-251.

-Haggag, M. M., Mogawer, W. S., & Bonaquist, R. (2011). Fatigue evaluation of warm-mix asphalt mixtures: Use of uniaxial, cyclic, direct tension compression test. *Transportation Research Record*, 2208(1), 26-32.

-Jiang, J., Ni, F., Wu, F., Sadek, H., & Lv, Q. (2019). Evaluation of the healing potential of asphalt mixtures based on a modified semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*, 196, 284-294.

-Kavussi, A., & Modarres, A. (2010). Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement. *Construction and building materials*, 24(10), 1920-1927.

-Kim, J., & Koh, C. (2012). Development of a predictive system for estimating fatigue life of asphalt mixtures using the indirect tensile test. *Journal of Transportation Engineering*, 138(12), 1530-1540.

-Lv, S., Wang, Z., Zhu, X., Yuan, J., & Peng, X. (2023). Research on strength and fatigue properties of asphalt mixture with different gradation curves. *Construction and Building Materials*. 364, 129872

-Newman, K. (2004, April). Polymer-modified asphalt mixtures for heavy-duty pavements: fatigue characteristics as measured by flexural beam testing. In *FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic city, NJ, USA.

-Varma, R., Balieu, R., & Kringos, N. (2021). A state-of-the-art review on self-healing in asphalt materials: Mechanical testing and analysis approaches. *Construction and Building Materials*, 310(125197), 125197.

-Xiao, F., Zhao, P. W., & Amirhanian, S. N. (2009). Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3144-3151.

- 1- Semi-Circular Bending
- 2- Styrene-Butadiene-Styrene
- 3- Metal-Catalyzed Multicomponent Reactions
- 4- Styrene-Butadiene
- 5- Styrene-Butadiene Rubber
- 6- Modified Sbs

۷-مراجع

-Alavi, Seyyed Mohammad Zia and Sadeghi, Khashayar (1401). Rubber and polymer modifiers of bitumen and asphalt mixture. Tehran. *Academic Jihad Publications Organization of Tehran University*. (In Persian)

-Ayar, P., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review. *Journal of Cleaner Production*, 113, 28-40.

-Bahia, H. U., Zhai, H., Onnetti, K., & Kose, S. (1999). Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 68.

-Bala, N., & Napiyah, M. (2020). Fatigue life and rutting performance modelling of nanosilica/polymer composite modified asphalt mixtures using Weibull distribution. *International Journal of Pavement Engineering*. 21(4), 497-506.

-Barzegari, M. R., Yousefi, A. A., & Zeynali, M. E. (2022). Bitumen modification via PS/PB Blend.

-Bonnaure, F. P., Huibers, A. H. J. J., & Boonders, A. (1982). A laboratory investigation of the influence of rest periods on the fatigue characteristics of bituminous mixes (with discussion). In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, Vol. 51.

-Carpenter, S. H., & Shen, S. (2006). Dissipated energy approach to study hot-mix asphalt healing in fatigue. *Transportation Research Record*, 1970(1), 178-185.

-Castro, M., & Sánchez, J. A. (2006). Fatigue and healing of asphalt mixtures: discriminate analysis of fatigue curves. *Journal of Transportation Engineering*, 132(2), 168-174.

-Dan, H. C., Wang, Z., Cao, W., & Liu, J. (2021). Fatigue characterization of porous asphalt mixture complicated with moisture

Evaluation of Failure Characteristics and Self-Healing Potential of Modified Asphalt Mixtures under Repeated Loading

Shahin Shabani, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.

Ahmad Mansourian, Associate Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran.

Hossien Zarin Jouei, Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.

E-mail: shabani@pnu.ac.ir

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

One of the inherent characteristics of asphalt mixtures, related to the viscoelastic properties of bitumen, is called self-healing. Due to the self-healing property, minor damages caused in the asphalt mixture during a loading process can be repaired to some extent during the rest period, and some of the original properties of the mixture can be restored. This study aimed to evaluate the factors affecting the failure characteristics and the self-healing phenomenon in modified asphalt mixtures by conducting tests on semicircular samples (SCB). The results obtained in this research showed that the fracture resistance and fracture energy in modified polymer asphalt mixtures are significantly higher than in the control sample (without modifier). Among the investigated additives, APAO polymer was more effective in increasing strength and failure energy, while SBS polymer showed the least increase in these properties. However, the flexibility index in the sample modified with APAO was lower than in the other investigated mixtures. Investigation of the fatigue behavior and self-healing phenomenon in asphalt mixtures showed that increasing the rest time from 0.8 seconds to 2.5 seconds increased the number of loading cycles until sample failure, indicating the self-healing characteristic of asphalt mixtures. Moreover, among the tested mixtures, the mixture modified with APAO polymer showed the best fatigue performance and self-healing behavior, followed by the mixtures containing SBR and SBS polymers, which performed better than the control mixture.

Keyword: Fracture Resistance, Self-Healing, Fatigue, Relaxation Time, Modified Asphalt Mixture