

## تخمین عمق شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر گرم لاستیکی با استفاده از شبکه عصبی و مدل رگرسیون غیرخطی

مقاله علمی - پژوهشی

امیر امینی\*، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

فرزاد دادخواه تهرانی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی تیران، اصفهان، ایران  
مهدی فقهی نجف‌آبادی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور استان تهران، تهران، ایران  
احمد صفری محمدی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amini.amir68@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۹۳-۱۰۸

### چکیده

استفاده از قیرهای اصلاح‌شده موجب افزایش تعدد متغیرهای مؤثر بر مقاومت شیارشدگی روسازی شده است. بر همین اساس، بررسی رفتار شیارشدگی روسازی به‌عنوان یک رویکرد تأثیرپذیر از متغیرهای عملکردی و محیطی می‌تواند موجب بهبود شرایط اجرایی در زمان طراحی و نگهداری و کاهش هزینه‌های سنگین آزمایشگاهی شود. در این تحقیق تلاش می‌شود تا در مرحله اول رفتار شیارشدگی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی حاوی ترکیب هم‌زمان پودر لاستیک و ساسوبیت با استفاده از آزمایش‌های خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR) و خزش دینامیکی ارزیابی شود. سپس بر اساس کرنش‌های پلاستیک تجمعی رخ داده در روسازی، مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چندگانه تخمین زده شود تا در صورت تعیین مدل مناسب با دقت بالا و خطای کم از تولید آسفالت با پتانسیل بالای شیارشدگی در مرحله آزمایشگاهی و پیش از تولید کارخانه‌ای جلوگیری شود. نتایج بخش آزمایشگاهی حاکی از آن بود که باوجود تأثیر مثبت WMA و GTR بر مقاومت شیارشدگی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی در درصدها بالا، ولی با در نظر گرفتن هم‌زمان عملکرد فنی روسازی در دماهای بالا و پایین و شرایط اقتصادی قیر حاوی ۱۲٪ پودر لاستیک و ۲٪ ساسوبیت به‌عنوان ترکیب بهینه پیشنهاد می‌شود. همچنین، نتایج بخش مدل‌سازی نشان داد باوجود عملکرد مناسب مدل‌های رگرسیون و ANN در تخمین مقاومت شیارشدگی، ولی مدل ANN با ضریب همبستگی برابر ۰/۹۳۹ از نظر دقت و قدرت بهتر از مدل رگرسیون بود. بنابراین می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند و مناسب در کاهش زمان و هزینه و جلوگیری از تولید آسفالت با پتانسیل بالای شیارشدگی در مرحله آزمایشگاهی و پیش از تولید کارخانه‌ای پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: آسفالت لاستیکی، شیارشدگی، آزمایش خزش و بازگشت در چند سطح تنش، ساسوبیت، مدل‌های پیش بینی

### ۱-مقدمه

افزایش تنش همراه با تغییرات آب‌وهوایی باعث افزایش خرابی روسازی آسفالتی شده است که این موضوع موجب شده است لزوم اصلاح خواص قیرها با استفاده از مواد افزودنی بیش از

قیر یک ماده ویسکوالاستیک پیچیده است که نقش مهمی در تعیین خواص روسازی‌های آسفالتی در دماهای بالا و پایین دارد. امروزه رشد شدت بارهای ترافیکی، حجم تردد بیشتر و

مرحله اجرا به‌عنوان اصلی‌ترین مشکلات این تکنولوژی مطرح است. امروزه برای رفع این مشکلات و توسعه تکنولوژی آسفالت لاستیکی، آسفالت گرم به‌عنوان گزینه‌ای مناسب و اقتصادی در اصلاح خواص قیرهای لاستیکی مطرح شده است تا با کاهش دمای تولید موجب کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و صرفه‌جویی در مصرف انرژی شود. از دیگر مزایای قابل توجه استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم لاستیکی می‌توان به کاهش هزینه‌های تولید، امکان اجرا در آب‌وهوای سرد، کاهش زمان بازگشایی پس از اجرا روسازی و امکان استفاده در مسافت‌های طولانی‌تر اشاره کرد (Rodríguez-Alloza, Gallego, 2014; Wang, Dang, You, & Pérez, Bonati, & Giuliani, 2014; Cao, 2012). در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی عملکرد مواد افزودنی WMA توسط محققان انجام شده است. صابری و همکاران سال ۲۰۱۷ با بررسی تأثیر مواد آسفالت گرم در آسفالت‌های بازیافتی حاوی قیر لاستیکی نشان دادند که ساسوبیت نه تنها می‌تواند درجه حرارت تولید و تراکم مخلوط آسفالتی را کاهش دهد، بلکه عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی، ترک‌های خستگی و تغییر شکل‌های دائمی بهبود می‌بخشد (Saberi, K, Fakhri, & Azami, 2017). یانگ و همکاران (Yang et al., 2017) سال ۲۰۱۷ با بررسی نتایج عملکرد مخلوط‌های آسفالت لاستیکی گرم بر مبنای استحکام کششی و حساسیت به رطوبت، مقاومت در برابر شیارشدگی، عملکرد ضد عریان شدگی، عمر خستگی و مقاومت در برابر ترک‌های دمای پایین نشان دادند که مصرف مواد WMA علاوه بر کاهش انتشار مواد آلاینده و صرفه‌جویی ۱۳ درصد در مصرف سوخت موجب بهبود مقاومت شیارشدگی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی شده است. صبحی و همکاران (Sobhi, Yousefi, & Behnood, 2020) سال ۲۰۲۰ به ارزیابی دوام و عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی آسفالت گرم و گیلسونایت پرداختند. نتایج این تحقیق بر اساس آزمایش‌های خزش دینامیکی، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، استحکام مارشال و خمشی نیمه دایره‌ای نشان داد که با افزودن ساسوبیت، کارایی، خصوصیات ترمومکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد. درحالی‌که ساسوبیت بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تأثیر منفی می‌گذارد. افشاری و همکاران سال ۲۰۲۱ با بررسی تأثیر مواد مختلف آسفالت گرم بر عملکرد مخلوط‌های بازیافتی نشان دادند که مواد آسفالت گرم می‌تواند موجب افزایش مدول برجهندگی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی

گذشته احساس شود. هدف استفاده از مواد افزودنی در اصلاح قیرهای خالص، افزایش عمر خستگی، مقاومت شیارشدگی و کاهش شدت ترک‌خوردگی روسازی است (Che Amini, Ziari, Saadatjoo, Hashemifar, & Goli, 2021; et al., 2022).

خرابی‌های ناشی از شیارشدگی، خستگی و ترک‌های برودتی دمای پایین به‌عنوان اصلی‌ترین دلایل کاهش سطح کیفیت جاده و تضعیف عملکرد روسازی‌های آسفالتی می‌باشند. در بین این خرابی‌ها، شیارشدگی یکی از مهم‌ترین آسیب‌های رخ داده در روسازی‌های آسفالتی است که معمولاً در لایه‌های آسفالتی و لایه‌های غیرمحدود زیرین ایجاد می‌شود. این خرابی به شکل فورفتگی سطحی در مسیر چرخ‌ها و بر اثر تنش‌های برشی افقی ناشی از اصطکاک لاستیک در هنگام ترمزگیری مکرر خودروها و در قسمت‌های طولانی و شیب‌دار بزرگراه‌ها رخ می‌دهد (Amini, Ziari, Ameri, Mirzaiyan, & Amini, 2018; Goli, 2018).

به‌طورکلی شیارشدگی روسازی ناشی از سه عامل اصلی تخریب مواد و مصالح روسازی، تراکم لایه‌های آسفالتی و تغییر شکل‌های پلاستیکی جانبی لایه‌های زیرین روسازی می‌باشد. شیارهای ایجادشده در سطح روسازی به‌طورکلی باعث مشکلات جدی در کنترل و هدایت وسایل نقلیه و بروز تصادفات ناشی از عدم تعادل خودرو می‌شوند. این در حالی است که با وقوع بارندگی و جاری شدن آب در سطح جاده‌ها و پر شدن شیارهای روسازی، مشکلات ناشی از شیارشدگی تشدید شده و می‌تواند باعث جدا شدن چرخ و سیله نقلیه از سطح روسازی و بروز پدیده هیدروپلانیگ شود (Ali, Irfan, L. Li, Huang, Han, Dong, & Ahmed, & Ahmed, 2017; Zhu, 2015).

این در حال است که امروزه گسترش خرابی‌هایی نظیر شیارشدگی باعث شده است تا اصلاح خصوصیات قیرها و بهبود کیفیت و خدمت‌دهی روسازی‌های آسفالتی بیش از گذشته موردتوجه قرار گیرد. بطوری که لزوم حرکت به سمت آسفالت زیست‌محیطی با قیمت مناسب و عملکرد فنی مطلوب موجب شده است تا تکنولوژی آسفالت لاستیکی مطرح شود (Ziari, Goli, & Ziari, Divandari, Hajiloo, & Amini, 2019; Amini, 2016; Ziari, Nasiri, Amini, & Ferdosian, 2019). باوجود نتایج مثبت استفاده از پودر لاستیک در صنعت روسازی، ولی افزایش قابل توجه ویسکوزیته قیر و به تبع آن تأثیر منفی بر درصد فضای خالی آسفالت و عملیات تراکم در

مدلی مناسب جهت پیش‌بینی شیارشدگی آسفالت ارائه شد. آلاس و همکاران (Alas, Ali, Abdulhadi, & Abba, 2020) سال ۲۰۲۰ به ارزیابی تجربی و مدل‌سازی رفتار قیر اصلاح‌شده با نانو کامپوزیت پلیمری با استفاده از الگوریتم‌های ANN و ANFIS پرداختند. در این تحقیق شش ترکیب مختلف شامل قیر پایه، قیر اصلاح‌شده پلیمری، قیر اصلاح‌شده با ترکیب هم‌افزایی پلیمر و نانو کلسیم، و قیر پلیمری اصلاح‌شده با نانو مس در درصدهای ۳ و ۵ با استفاده از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی ارزیابی شد. نتایج این مطالعه بهبود رفتار رئولوژیکی قیر اصلاح‌شده را نشان داد. علاوه بر این، مدل‌های ANN و ANFIS برای پیش‌بینی نتایج آزمون DSR مدل‌های قابل‌اعتمادی را هم با مجموعه داده‌های آموزشی و هم آزمایشی ارائه می‌دهند. نتایج مدل نشان داد که هر دو مدل ANN و ANFIS قادر به پیش‌بینی  $G^*$  با دقت بالا بودند، با این‌حال مدل ANN از نظر عملکرد وضعیت بهتری را داشته است. عمرانیان و همکاران (Omranian et al., 2021) سال ۲۰۲۱ با اعتبار سنجی مدلی برای پیش‌بینی اثر پیرشدگی کوتاه‌مدت بر خواص رئولوژیکی قیرها نشان دادند که رویکرد ناشی از ANN می‌تواند برای تخمین افزایش رده عملکردی واقعی درجه حرارت بالا قیرها و در نتیجه پیرشدگی طولانی‌مدت استفاده شود که این امر در نهایت موجب کاهش زمان و هزینه‌های سنگین آزمایشگاهی می‌شود. ژو و همکاران سال ۲۰۲۳ (Xu, Zeng, Miao, Zhang, & Fu, 2023) یک مدل پیش‌بینی برای تعیین پیرشدگی میدانی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی و تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری ایجاد کردند که ویسکوزیته قیر پیرشده را به عنوان ویژگی پیش‌بینی‌کننده هدف در نظر گرفتند. در مجموع ۴۷۹ داده استخراج شده از پایگاه داده عملکرد بلندمدت روسازی برای آموزش، اعتبار سنجی و آزمایش مدل ANN استفاده شد. نتایج محاسبات نشان داد که مدل پیش‌بینی توسعه‌یافته با استفاده از رویکرد ANN دقت پیش‌بینی بالایی با مقدار  $R^2$  بیشتر از ۰/۹۰ ارائه می‌دهد. علاوه بر این، نتایج ثابتی بین مقادیر ویسکوزیته پیش‌بینی‌شده از مدل ANN و مقادیر برداشت شده به‌دست آمد، که نشان می‌دهد مدل پیرشدگی توسعه‌یافته توانایی توصیف دقیق تکامل پیرشدگی میدانی روسازی آسفالت را دارند.

با توجه به مطالب بیان شده، در این تحقیق تلاش می‌شود تا در مرحله اول رفتار شیارشدگی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی حاوی ترکیب هم‌زمان پودر لاستیک و ساسوبیت با استفاده از آزمایش‌های خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR) و

شوند (Yousefi, Behnood, Nowruzi, & Haghshenas, 2021).

با توجه به‌مرور ادبیات در خصوص مزایای قابل‌توجه آسفالت لاستیکی گرم، ولی استفاده از قیرهای اصلاح‌شده موجب افزایش تعدد متغیرهای مؤثر بر مقاومت شیارشدگی روسازی شده است. بر همین اساس، بررسی رفتار شیارشدگی روسازی به‌عنوان یک رویکرد تأثیرپذیر از متغیرهای عملکردی و محیطی می‌تواند موجب بهبود شرایط اجرایی در زمان طراحی و نگهداری و کاهش هزینه‌های سنگین آزمایشگاهی شود. در سال‌های اخیر، با افزایش علاقه به هوش مصنوعی، مدل‌های محاسباتی و الگوریتم‌های هوشمند توسعه‌یافته‌اند و به‌عنوان ابزاری قدرتمندی برای تجزیه و تحلیل داده‌های پیچیده و حل مسائل پیچیده غیرخطی پیشنهاد شده‌اند (Moniri, Ziari, Amini, & Hajiloo, 2022 & Ziaari, Amini, Goli, & Mirzaian, 2018). شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) یکی از موفق‌ترین و قدرتمندترین روش‌های پیشنهاد شده برای تخمین رفتار مواد مختلف است. روش ANN یک رویکرد مشابه جعبه سیاه در نظر گرفته می‌شود، زیرا ساختار داخلی آن هیچ بینشی در مورد روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ارائه نمی‌دهد.

پلاتی و همکاران (Plati, Georgiou, & Loizos, 2012) تلاش کردند از ANN به عنوان یک ابزار جدید جهت مدل‌سازی شرایط سازه‌ای روسازی در سیستم مدیریت روسازی استفاده کنند. آن‌ها معیار خستگی را بر اساس کرنش در نظر گرفتند و بر اساس داده‌های میدانی مدل خود را مورد آموزش قرار دادند. در این تحقیق داده‌های موجود در سه بزرگراه کشور یونان که سیستم روسازی آن‌ها به صورت انعطاف پذیر می‌باشد، برداشت شد و نتایج خروجی به عنوان داده‌های ورودی شبکه جهت آموزش انتخاب شده است و سپس با ارزیابی مقادیر کرنش‌های بدست آمده شرایط روسازی مورد تحلیل قرار داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، مقادیر کرنش کششی محاسبه شده و پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه عصبی در مرحله آموزش و آزمایش دارای ضریب همبستگی مناسب می‌باشد. شفافبخش و همکاران (Shafabakhsh, Ani, & Talebsafa, 2015) طی تحقیقی به بررسی شیارشدگی آسفالت گرم اصلاح شده با نانو و سرباره فولاد و ارائه مدل پیش‌بینی شیارشدگی آسفالت به کمک شبکه عصبی پرداختند. در این پژوهش به بررسی تاثیر پنج متغیر جنس مصالح سنگی، نوع افزودنی، درصد افزودنی، دمای آزمایش و تنش وارده بر نمونه بر شیارشدگی آسفالت پرداخته شده است و به کمک شبکه عصبی

خزش دینامیکی ارزیابی شود. سپس بر اساس کرنش‌های پلاستیک تجمعی رخ داده در روسازی، مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چندگانه تخمین زده شود تا در صورت تعیین مدل مناسب با دقت بالا و خطای کم از تولید آسفالت با پتانسیل بالای شیارشدگی در مرحله آزمایشگاهی و پیش از تولید کارخانه‌ای جلوگیری شود.

## ۲- روش تحقیق و مصالح آزمایشگاهی

### ۲-۱- قیر و مواد افزودنی

در این پژوهش از قیر ۷۰-۶۰ شرکت نفت جی، پودر لاستیک تولیدی شرکت پرشیا مک در استان اصفهان و ساسوییت تولیدی شرکت پلیمر پیشرفته دانا به‌عنوان افزودنی گرم و باهدف کاهش ویسکوزیته قیر لاستیکی و تسهیل در عملیات اجرا و تراکم استفاده شده است. با توجه به مطالعات گذشته (X. Li, Zhou, & Jamshidi, Hamzah, & You, 2013; You, 2016)، محدوده مناسب برای استفاده از ساسوییت در مخلوط آسفالتی، حدود ۱ تا ۳ درصد وزن قیر می‌باشد که در این تحقیق بر اساس ملاحظات فنی و اقتصادی مقدار ۲ و ۳ درصد وزنی از ساسوییت استفاده شده است.

با توجه به مطالعات گذشته (Ziari, Amini, & Goli, 2020)، برای تهیه قیرهای لاستیکی حاوی افزودنی گرم ابتدا قیر خالص تا حدود  $10 \pm 150$  درجه سانتی‌گراد گرم شد و سپس ساسوییت به قیر اضافه شد. در گام بعدی پودر لاستیک در مقادیر ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد به‌صورت تدریجی و در مقادیر از قبل تعیین شده به قیر اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از همزن مکانیکی با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه فرایند اختلاط انجام شد. در نهایت، با افزایش دمای قیر به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، عملیات نهایی اختلاط به مدت ۹۰ دقیقه با استفاده از همزن برش بالا با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شد تا مخلوط قیر لاستیکی کاملاً همگنی تولید شود.

### ۲-۲- طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی

برای تهیه و ساخت مخلوط‌های آسفالتی بر اساس استاندارد مارشال، ابتدا مصالح سنگی با دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ روسازی‌های ایران، به مدت ۱۲ ساعت در گرمخانه در دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. سپس مصالح سنگی با قیر گرم شده مخلوط شدند و تراکم مخلوط توسط چکش مارشال

### ۲-۳- برنامه آزمایشگاهی

#### خزش و بازگشت در چند سطح تش (MSCR)

آزمایش MSCR برای تعیین پتانسیل شیارشدگی قیرهای خالص و اصلاح‌شده و بر اساس کرنش‌های الاستیک و پلاستیک انجام می‌شود. این آزمایش توسط دستگاه رئومتر برش دینامیکی یا DSR و در دمای عملکردی بالای قیر بر روی نمونه‌های با پیرشدگی کوتاه‌مدت RTFO مطابق استاندارد AASHTO T240 انجام می‌شود. پس از اعمال پیرشدگی کوتاه‌مدت، نمونه‌ها تحت ۱ ثانیه بارگذاری و ۹ ثانیه زمان استراحت و در مجموع ۱۰ سیکل بارگذاری و باربرداری در هر سطح تش ۰،۱ و ۳،۲ کیلو پاسکال قرار گرفتند. در آزمایش MSCR از دو پارامتر درصد بازیابی (R) و انطباق خزش غیرقابل‌بازگشت ( $J_{nr}$ ) برای مشخص کردن خواص ویسکوالاستیسیته قیر استفاده می‌شود (D'Angelo, Kluttz, Dongre, Stephens, & Zanzotto, 2007).  $J_{nr}$  به‌عنوان شاخصی برای حساسیت به تغییر شکل دائمی وابستگی به تش قیر در نظر گرفته شده است. در این مطالعه آزمایش MSCR در بازه دمایی ۶۴ تا ۷۶ درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

#### خزش دینامیکی

آزمایش خزش دینامیکی یکی از روش‌های رایج و معتبر برای

می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش مقدار آسفالت گرم از ۰ به ۳ درصد در حدود ۶۴٪ به مقاومت شیارشدگی قیر حاوی GTR8 افزوده می‌شود. در نهایت بررسی هم‌افزایی GTR و WMA نشان می‌دهد که با افزایش مقدار GTR از ۸ به ۱۶ درصد و آسفالت گرم از ۰ به ۳ درصد مقدار  $J_{nr,3.2kPa}$  از ۸/۱۹ به ۱/۰۱ یافته است و مقاومت شیارشدگی در حدود ۸۸٪ بهبود یافته است. به طور خلاصه می‌توان بیان کرد بالاترین مقاومت شیارشدگی در برابر تغییر شکل‌های دائمی مربوط به نمونه حاوی هم‌افزایی GTR و WMA است.

مقایسه کلی عملکرد شیارشدگی قیرها نشان می‌دهد که به ترتیب قیرهای 16GTR\_3WMA، 16GTR\_2WMA و 12GTR\_3WMA دارای کمترین مقدار  $J_{nr}$  در طیف دمایی مورد بررسی می‌باشند و از نظر مقاومت در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک عملکرد بهتری را دارند. از دلایل این اتفاق می‌توان به جذب مواد روغنی و سبک قیر توسط ذرات لاستیک و افزایش درصد آسفالتین و ویسکوزیته قیر اشاره کرد که تعامل این فرآیندها باعث افزایش سختی و کاهش تغییر شکل‌های پلاستیک قیر می‌شود. همچنین، برهمکنش بین کریستال‌های موجود در ساسویت و ماتریس قیری موجب شده است تا ساسویت به‌عنوان اتصالات عرضی فیزیکی عمل کرده و موجب بهبود خواص رئولوژیکی قیر لاستیکی و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک شود (Qin, Farrar, Pauli, & Adams, 2014).

بررسی افزایش تنش و دما به‌عنوان دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت شیارشدگی نشان می‌دهد که افزایش تنش و دما تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار قیرها از نظر سختی و برگشت‌پذیری داشته است و رفتار قیر از حالت الاستیک به حالت پلاستیک تغییر می‌دهد. با این‌وجود ترکیب هم‌افزایی GTR و مخلوط آسفالت گرم این تأثیر منفی را کمتر کرده است و موجب بهبود عملکرد شیارشدگی قیر شده است.

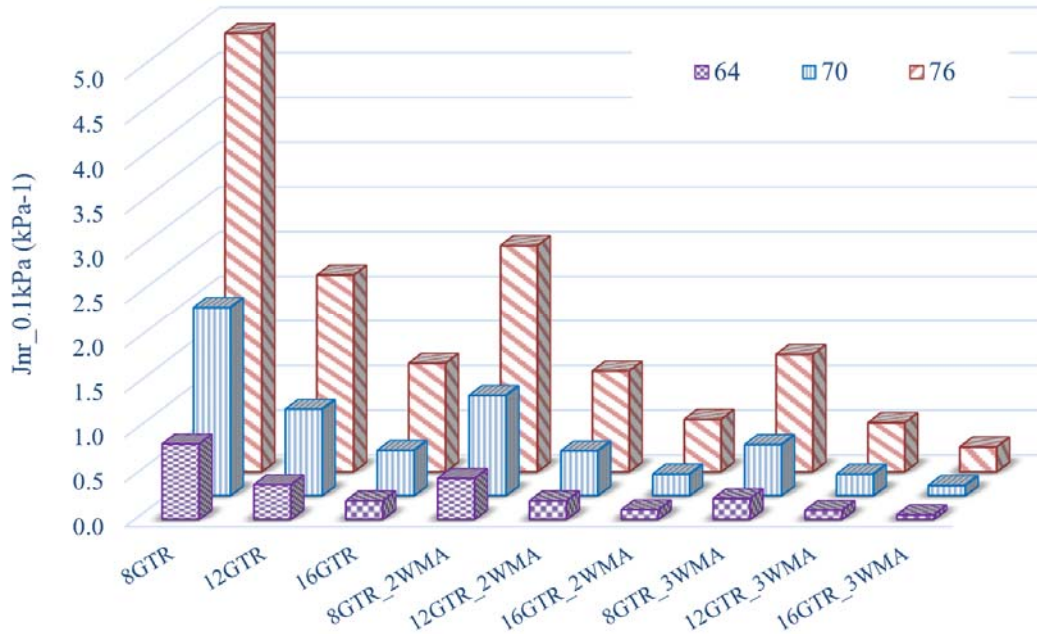
تعیین مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائمی است. خروجی این آزمایش بر اساس تحلیل کرنش جمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری می‌باشد. در این تحلیل نمودار خزش مخلوط آسفالتی به سه ناحیه تقسیم می‌شوند. ناحیه اول تغییر مکان‌های دائم به‌طور ناگهانی روی هم انگاشته می‌شوند، در ناحیه دوم افزایش شیب تغییر مکان دائم کاهش می‌یابد تا به مقدار ثابتی برسد و در ناحیه سوم شیب تغییر مکان دائم دوباره افزایش می‌یابد و مقدار تغییر مکان دائم به شدت روی هم انگاشته می‌شود. آزمایش خزش دینامیکی بر روی مخلوط‌های آسفالتی با استاندارد Australian: AS 2891.12.1 و با شرایط بارگذاری نیمه سینوسی ۵۰۰ میلی‌ثانیه بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه استراحت با سطح تنش ۴۰۰ کیلو پاسکال و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

### ۳-ارائه و تفسیر نتایج

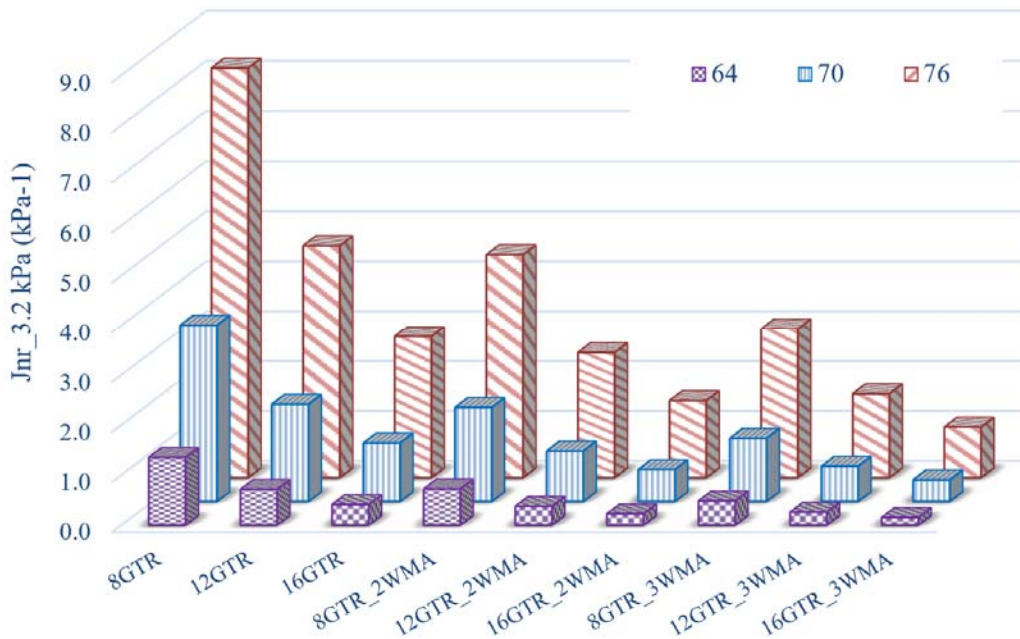
#### ۳-۱- نتایج آزمایش خزش و بازگشت در چند سطح

##### تنش

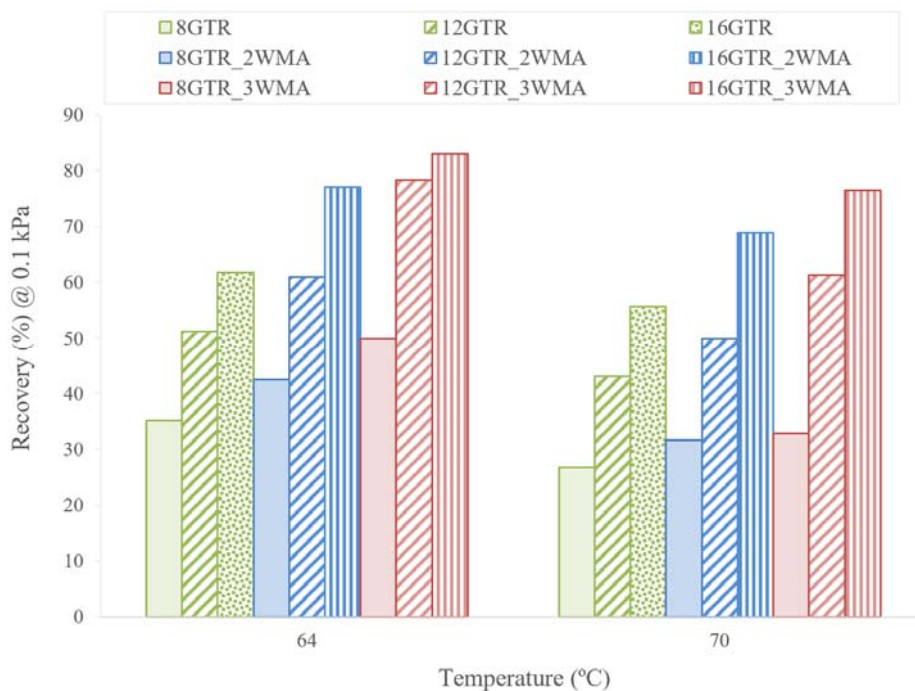
در شکل‌های ۱ و ۲ نتایج بررسی مقاومت شیارشدگی قیرها نشان می‌دهد که افزایش مقدار GTR و آسفالت گرم موجب افزایش سختی قیرها و در نتیجه کاهش مقدار  $J_{nr}$  و بهبود مقاومت شیارشدگی در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌شود. به طوری که در دمای ۷۶ درجه سانتی‌گراد، با افزایش درصد GTR از ۸ به ۱۶ درصد مقدار  $J_{nr,3.2kPa}$  از ۸/۱۹ به ۲/۸۲ کاهش یافته و در حدود ۶۶٪ مقاومت در برابر شیارشدگی بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش مقدار آسفالت گرم از ۰ به ۲ درصد در نمونه حاوی GTR8، مقدار  $J_{nr,3.2kPa}$  از ۸/۱۹ به ۴/۴۷ تغییر کرده و در حدود ۴۵٪ کاهش یافته است. با این‌وجود، روند بهبود شیارشدگی با افزایش مقدار آسفالت گرم همچنان ادامه دارد و با افزایش مقدار آن به ۳٪ مقدار  $J_{nr,3.2kPa}$  به ۲/۹۸ کاهش



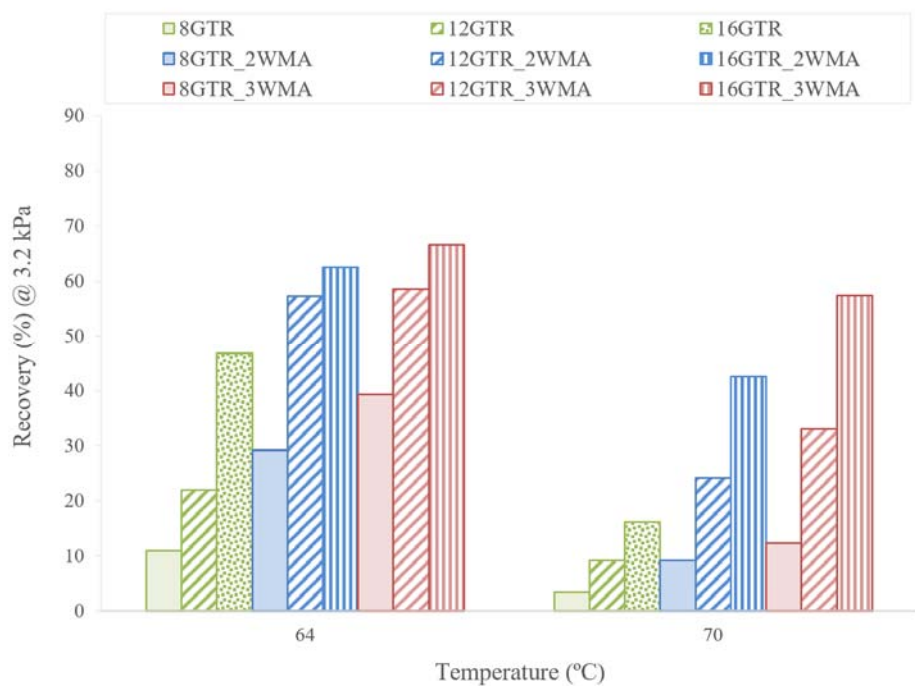
شکل ۱. بررسی تأثیر هم‌افزایی پودر لاستیک و ساسویت بر مقاومت شیارشدگی قیرها در ۰.۱ کیلو پاسکال



شکل ۲. بررسی تأثیر هم‌افزایی پودر لاستیک و ساسویت بر مقاومت شیارشدگی قیرها در ۳.۲ کیلو پاسکال



شکل ۳. بررسی تأثیر هم‌افزایی پودر لاستیک و ساسویت بر شاخص برگشت پذیری قیرها در ۰/۱ کیلو پاسکال



شکل ۴. بررسی تأثیر هم‌افزایی پودر لاستیک و ساسویت بر شاخص برگشت پذیری قیرها در ۳/۲ کیلو پاسکال

همچنین بررسی نرخ کرنش بین سیکل‌های ۱۸۰۰ تا ۳۶۰۰ در نمونه‌های نشان می‌دهد که مقدار این شاخص برای نمونه‌های 8GTR، 12GTR و 16GTR به ترتیب برابر ۱۳، ۱۰ و ۱۶ درصد است. همچنین با افزایش مقدار ۲٪ ساسویت مقدار نرخ کرنش‌های کاهش‌یافته است. از طرفی بررسی شاخص نرخ اضمحلال بین سیکل‌های ۱۸۰۰ تا ۳۶۰۰ نشانگر این است که کمترین مقدار این شاخص به ترتیب مربوط به نمونه‌های 12GTR\_3WMA، 12GTR\_2WMA و 8GTR\_2WMA با مقادیر ۶، ۷ و ۱۰ درصد است.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با وجود تأثیر مثبت افزایش GTR بر بهبود مقاومت شیارشدگی، ولی بهترین عملکرد در نمونه حاوی ۱۲٪ پودر لاستیک مشاهده شد. به طوری که با افزایش بیشتر آن، با وجود کاهش مقدار کرنش، ولی نرخ اضمحلال افزایش یافته است که نشانگر عدم تأثیر مثبت ناشی از افزایش GTR بر بهبود مقاومت شیارشدگی می‌باشد. همچنین با وجود تأثیر مثبت ساسویت بر بهبود مقاومت شیارشدگی در درصد‌های بالاتر، ولی این تأثیر آن‌چنان قابل توجه نمی‌باشد. از طرفی مطابق با مطالعات گذشته، افزایش مقدار ساسویت علاوه بر تأثیر منفی بر عملکرد دمای پایین، موجب غیراقتصادی شدن پروژه از نظر اجرایی می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن هم‌زمان عملکرد فنی روسازی در دماهای بالا و پایین و شرایط اقتصادی قیر حاوی ۱۲٪ پودر لاستیک و ۲٪ ساسویت به‌عنوان ترکیب بهینه پیشنهاد می‌شود. از دلایل بهبود مقاومت شیارشدگی آسفالت ناشی از استفاده از قیر لاستیکی اصلاح‌شده با مخلوط آسفالت گرم می‌توان به تشکیل شبکه پلیمری و سنتزی لاستیک و موقعیت فضایی اتم‌های احاطه‌شده اطراف زنجیره C-CL و C-H در ساختار پودر لاستیک اشاره کرد (Savrik, Balköse, Ulutan, & Ülkü, 2010).

درحالی‌که افزودن WMA در کنار ذرات لاستیک موجب می‌شود به دلیل ساختار کریستالی ساسویت سختی ماتریس قیری افزایش یافته و تشکیل شبکه کریستالی در قیر موجب تأثیر مثبت بر عملکرد شیارشدگی شود.

نتایج برگشت‌پذیری برای سطوح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلو پاسکال در شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد تغییر شکل قیر در سطوح پایین تنش به صورت الاستیک می‌باشد. در حالی که با افزایش تنش و فشار بیشتر، مقادیر برگشت‌پذیری کاهش یافته و قیر دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود. به‌طور کلی، اصلاح قیر با ترکیب پودر لاستیک و ساسویت بهبود قابل توجهی بر رفتار برگشت‌پذیری قیر ایجاد کرده است. به نحوی که با افزایش سطح تنش و تشدید احتمال شیارشدگی و بروز کرنش‌های پلاستیک، اصلاح قیرهای لاستیکی با ساسویت به‌طور قابل توجهی مقاومت روسازی را بهبود می‌بخشد.

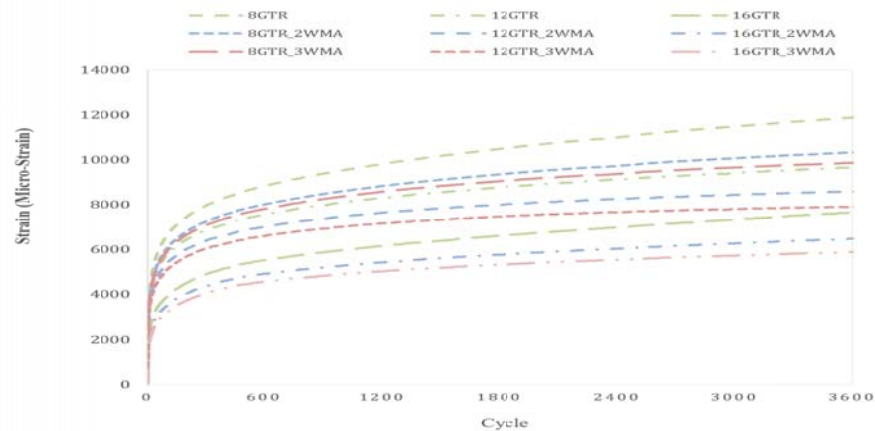
### ۳-۲- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

نتایج آزمایش خزش دینامیکی در خصوص بررسی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده در برابر کرنش‌های پلاستیک در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که مصرف قیرهای لاستیکی اصلاح‌شده با WMA به‌طور قابل توجهی تغییر شکل دائمی آسفالت را کاهش و مقاومت شیارشدگی را بهبود پیدا می‌بخشد. بررسی تأثیر GTR و مخلوط آسفالت گرم بر مقدار کرنش تجمعی ایجادشده در روسازی نشان می‌دهد که ترکیب هم‌افزایی 16GTR و 3WMA موجب شده است تا مقدار کرنش در انتهای سیکل‌های ۱۲۰۰، ۲۴۰۰ و ۳۶۰۰ به ترتیب ۰/۴۹٪، ۰/۵۰٪ و ۰/۵۱٪ کاهش یابد. در حالی که بررسی روند اضمحلال روسازی در اثر تغییر شکل‌های دائمی رخ داده بر اساس نرخ کرنش بین سیکل‌های ۶۰۰ تا ۳۶۰۰ در مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد که مقدار این شاخص برای نمونه‌های 8GTR، 12GTR و 16GTR به ترتیب برابر ۳۴، ۲۸ و ۳۸ درصد است.

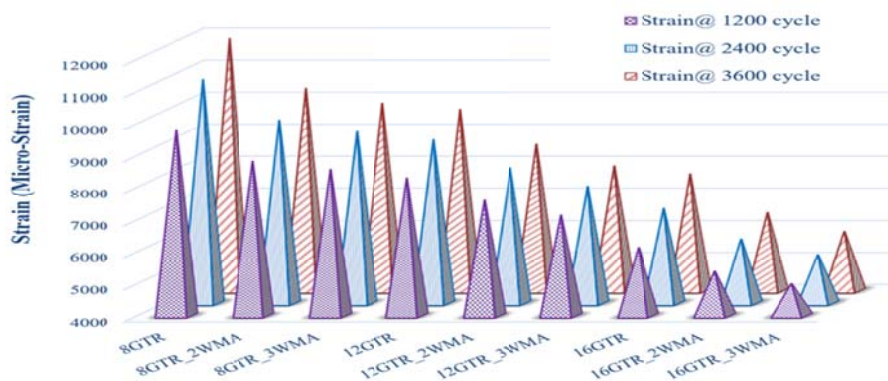
درحالی‌که با افزودن مقدار ۲ درصد ساسویت مقدار این شاخص کمتر شده است و برای نمونه‌های 8GTR\_WMA2، 12GTR\_WMA2 و 16GTR\_WMA2 به ترتیب برابر ۲۹، ۲۲ و ۳۱ درصد می‌شود. درحالی‌که با افزایش مقدار ساسویت به ۳ درصد این تأثیر مثبت همچنان ادامه دارد و مقدار نرخ کرنش کاهش می‌یابد.



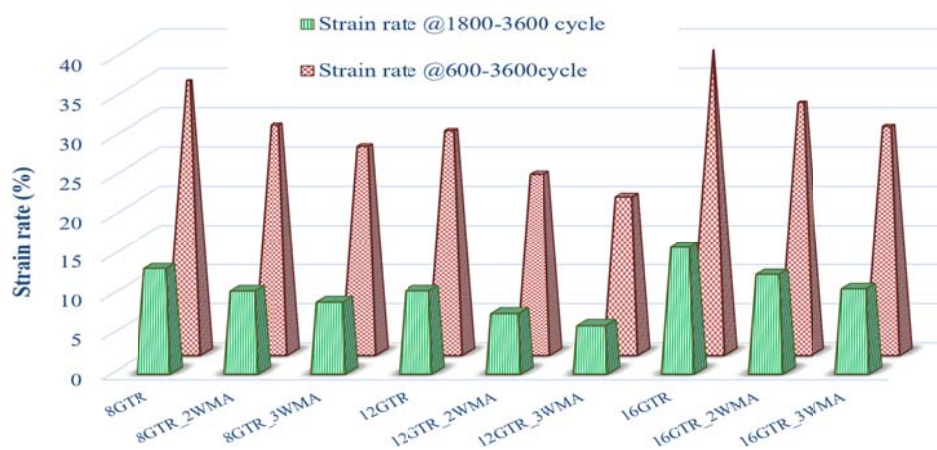
فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال بیست و یکم، دوره اول، شماره ۷۸، بهار ۱۴۰۳



شکل ۵. نمودار کرنش تجمعی آزمایش خزش دینامیکی برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده



شکل ۶. کرنش‌های انتهایی سیکل‌های ۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و ۳۶۰۰ و عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر استفاده از قیر لاستیکی حاوی ساسویت



شکل ۷. مقایسه کرنش‌های تجمعی و نرخ اضمحلال ناشی از شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی

### ۳-۳- نتایج مدل‌سازی

برای مدل‌سازی نتایج آزمایشگاهی، از سه متغیر ورودی و یک متغیر خروجی استفاده شده است. بر این اساس، متغیرهای مقدار GTR (۸، ۱۲ و ۱۶ درصد)، مقدار مخلوط آسفالت گرم (۰، ۲ و ۳ درصد ساسوبیت) و تعداد سیکل‌های بارگذاری (۱۲۰۰، ۲۴۰۰ و ۳۶۰۰ سیکل) به‌عنوان ورودی‌های مدل انتخاب شدند و کرنش تجمعی در انتهای هر سیکل به‌عنوان خروجی مدل انتخاب شدند. برای تخمین و پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی از دو مدل شبکه عصبی و رگرسیون پیشرفته استفاده شده است. با توجه به این‌که تقسیم‌بندی داده‌ها اثر زیادی بر روی نتایج خروجی دارد، در این مطالعه از ۷۰٪ مجموعه داده‌ها در آموزش، ۲۰٪ در ارزیابی و ۱۰٪ باقی‌مانده به‌عنوان داده‌های آزمون استفاده شده است. در ادامه این بخش، نتایج دو مدل پیشنهادی ارائه می‌شوند و در انتها با مقایسه عملکرد آن‌ها، مدل بهینه و مطلوب‌تر تعیین می‌شود.

#### مدل رگرسیون پیشرفته

در این مرحله، با استفاده از داده‌های آموزش که شامل ۸۰ درصد کل داده‌ها بود، مدل‌سازی انجام شد و سپس با استفاده از داده‌های آزمون مدل اعتبار سنجی شد. مدل طراحی شده در این بخش در روابط ۱ و ۲ نشان داده شده است. بر اساس تحلیل‌های آماری مدل پیشنهادی در شکل ۸، عملکرد مدل نشان می‌دهد که شاخص‌های RMSE و R به ترتیب برابر ۱۷۳۵ و ۰/۹۳۶۲۵ می‌باشد. شاخص RMSE نشان‌دهنده خطا و پراکندگی نتایج پیش‌بینی شده می‌باشد و مقدار R همبستگی نتایج واقعی و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج،

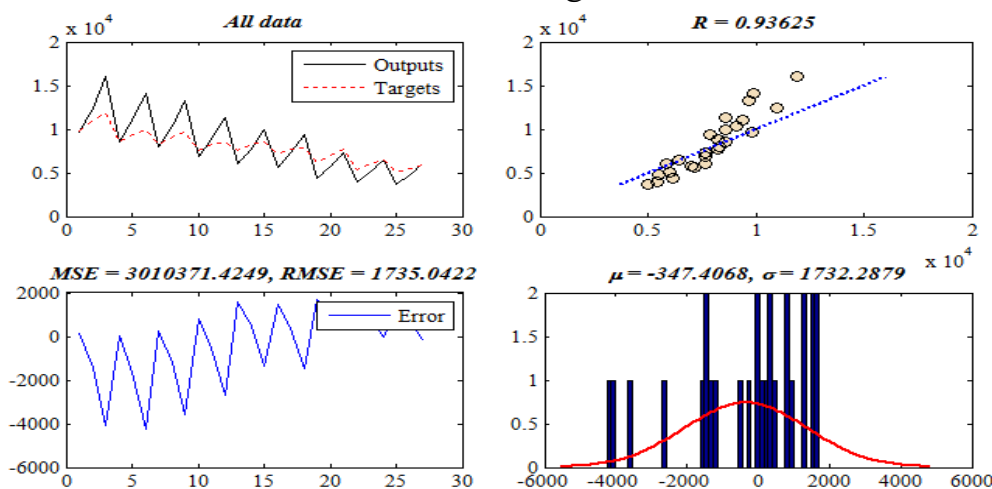
عملکرد مدل رگرسیون پیشرفته در تخمین عمق شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی مطلوب است و می‌توان با دقت مناسب و خطای کم از آن استفاده کرد. در رابطه زیر، پارامترهای  $X_1$ ،  $X_2$  و  $X_3$  به ترتیب برابر درصد GTR، درصد ساسوبیت و تعداد سیکل بارگذاری می‌باشند.

$$A = 0.6874 - 0.2149 X_1 + 0.579 X_2 - 0.5313 X_3 - 0.371 X_1^2 \quad (1)$$

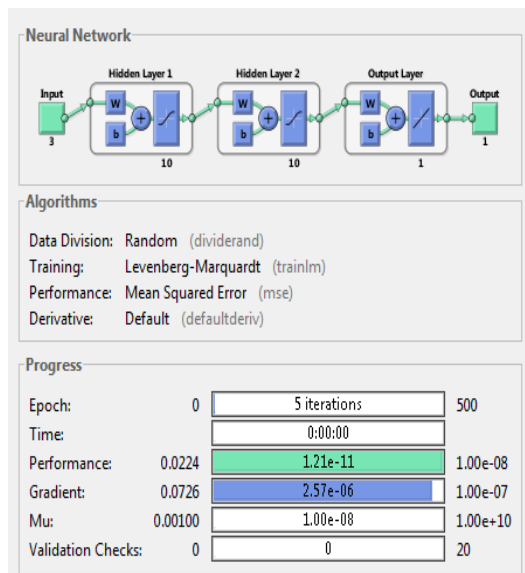
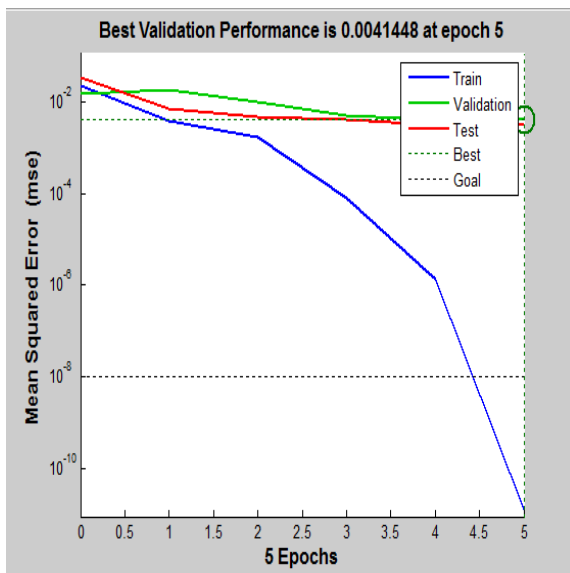
$$\text{Strain} = e^{(1.727 \times A - 8.092)} \quad (2)$$

#### مدل شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی ابزاری قدرتمند و پیشرفته است که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم هرچند پیچیده و غیرخطی را با شبکه‌ای از گره‌ها شناسایی کرده و به نحوی مناسب و با سرعت بالا به ساختار شبکه انتقال می‌دهد. ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه‌های عصبی موجب شده است در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی و در تحلیل مسائل پیچیده به‌عنوان جایگزینی مناسب نسبت به روش‌های سنتی مطرح شود (Hoang et Agatonovic-Kustrin & Beresford, 2000; al., 2021). در این تحقیق برای افزایش قدرت پیش‌بینی ANN و بررسی تأثیر ساختار و معماری شبکه بر قدرت مدل، ابتدا ۲۰ ساختار با تعداد متفاوت لایه‌ها و گره‌های مخفی طراحی شده تا بهینه‌ترین معماری شبکه برای پیش‌بینی کرنش تجمعی در مخلوط‌های آسفالتی تعیین شود.



شکل ۸. عملکرد مدل رگرسیون طراحی شده بر اساس شاخص‌های آماری



شکل ۹. معماری و روند طراحی و آموزش مدل شبکه عصبی طراحی شده

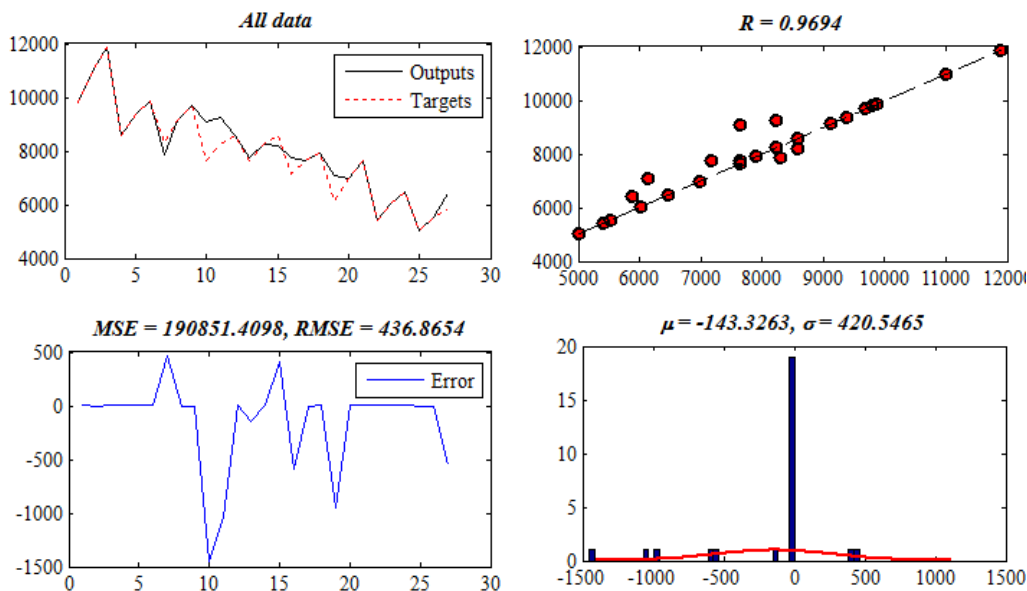
مدل طراحی شده به ترتیب برابر ۴۳۶، ۱۹۲۸۵۱ و ۰/۹۶۹ می‌باشد. ضریب R برابر ۰/۹۶۹ و RMSE برابر ۴۳۶ نشان دهنده عملکرد مناسب مدل پیشنهادی است که می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای تخمین مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با قیر لاستیکی گرم پیشنهاد شود.

#### مقایسه عملکرد مدل‌ها

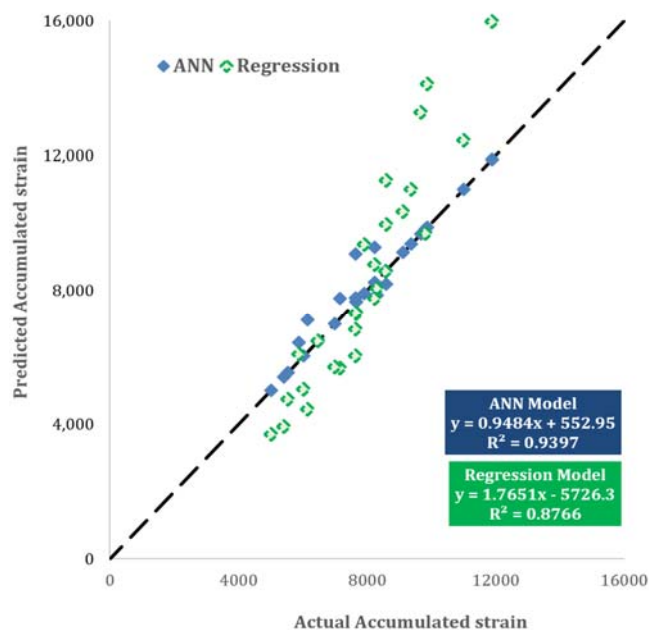
مقایسه عملکرد مدل‌های پیشنهادی در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که هر دو مدل توانایی و قابلیت مناسبی در پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی گرم دارند. به‌طوری‌که مقدار R2 برای مدل رگرسیون و ANN به ترتیب برابر ۰/۸۷۶ و ۰/۹۳۹ می‌باشد که نشانگر همبستگی مناسب داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده است. باین‌وجود، عملکرد مدل ANN از نظر دقت و قدرت بهتر از مدل رگرسیون است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند و مناسب در پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی با هدف کاهش زمان و هزینه پیشنهاد شود.

مدل‌های ANN طراحی شده با تعداد یک تا سه لایه مخفی و با تعداد مختلفی از گره‌های مخفی بین ۳ تا ۲۵ گره در هر لایه طراحی و ارزیابی شد و هر مدل در چندین مرتبه تکرار شد تا بهترین وزن‌های نهایی با کمترین خطا و بیشترین دقت تعیین شود.

در نهایت پس از طراحی مدل‌ها با ساختار و معماری‌های مختلف، مدل ۱-۱۰-۱۰-۳ با دو لایه مخفی و تعداد ده نورون در هر لایه به‌عنوان بهترین مدل با بالاترین دقت و عملکرد شناسایی شد. معماری و روند طراحی و آموزش مدل شبکه عصبی طراحی شده در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، ساختار بهینه مدل با معماری دو لایه مخفی و تعداد ده نورون در هر لایه، الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت به صورت حداقل تابع خطا و لوگ‌سیگموئید برای تابع انتقال لایه‌های میانی و تابع خطی برای لایه خارجی از نوع خطی طراحی شده است. عملکرد مدل شبکه عصبی پیشنهاد شده در شکل ۱۰ بر اساس شاخص‌های آماری تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار شاخص‌های RMSE، MSE و R



شکل ۱۰. عملکرد مدل شبکه عصبی طراحی شده بر اساس شاخص‌های آماری



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون برای کرنش مخلوط‌های آسفالتی

به‌صورت زیر می‌باشد:

### ۵- نتیجه‌گیری

-نتایج آزمایش MSCR نشان داد با هم افزایشی GTR و مخلوط آسفالت گرم و جذب مواد روغنی و سبک قیر توسط ذرات لاستیک و افزایش درصد آسفالتین و برهمکنش بین کریستال‌های موجود در ساسوبیت خواص رئولوژیکی قیر لاستیکی و مقاومت شیارشدگی در حدود ۸٪ بهبود می‌یابد. -با افزایش مقدار WMA از ۰ به ۳ درصد در حدود ۶۴٪ به مقاومت شیارشدگی قیر حاوی GTR8 افزوده شد و

در این تحقیق تلاش شد تا رفتار شیارشدگی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی حاوی ترکیب هم‌زمان پودر لاستیک و ساسوبیت ارزیابی شود و سپس بر اساس کرنش‌های پلاستیک تجمعی رخ داده در روسازی، مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چندگانه تخمین زده شود. نتایج حاصل از این مطالعه

## ۶- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از آزمایشگاه اداره کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای استان اصفهان، شرکت نفت جی اصفهان، شرکت پلیمر پیشرفته دانا که در تهیه مصالح مصرفی آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های قیر و آسفالت همکاری لازم را داشتند، کمال قدردانی و تشکر را نمایند.

## ۷- مراجع

- Agatonovic-Kustrin, S., & Beresford, R. (2000). Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 22(5), 717-727.
- Alas, M., Ali, S. I. A., Abdulhadi, Y., & Abba, S. (2020). Experimental evaluation and modeling of polymer nanocomposite modified asphalt binder using ANN and ANFIS. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(10), 04020305.
- Ali, Y., Irfan, M., Ahmed, S., & Ahmed, S. (2017). Empirical correlation of permanent deformation tests for evaluating the rutting response of conventional asphaltic concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017059.
- Ameri, M., Mirzaiyan, D., & Amini, A. (2018). Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 04018292.
- Amini, A., Ziari, H., & Goli, A. (2018). Investigating the performance of rubberised binders used in Iran based on multiple stress creep recovery and performance grading systems. *Road Materials and Pavement Design*, 19(4), 803-818.
- Amini, A., Ziari, H., Saadatjoo, S. A., Hashemifar, N. S., & Goli, A. (2021). Rutting resistance, fatigue properties and temperature susceptibility of nano clay modified asphalt rubber binder. *Construction and Building Materials*, 267, 120946.
- Che, T., Pan, B., Li, Y., Ge, D., Jin, D., & You, Z. (2022). The effect of styrene-butadiene rubber modification on the properties of asphalt binders: Aging and

با افزایش مقدار GTR از ۸ به ۱۶ درصد و WMA از ۰ به ۳ درصد مقاومت شیارشدگی در حدود ۸۸٪ بهبودیافت. در این حالت، بالاترین مقاومت شیارشدگی در برابر تغییر شکل‌های دائمی مربوط به نمونه حاوی هم‌افزایی GTR و WMA بود -مقایسه خاصیت الاستیک قیرها در آزمایش MSCR نشان داد که اصلاح قیر با ترکیب پودر لاستیک و ساسویت بهبود قابل‌توجهی بر رفتار برگشت‌پذیری قیر ایجاد کرده است. به نحوی که با افزایش سطح تنش و تشدید احتمال شیارشدگی و بروز کرنش‌های پلاستیک، اصلاح قیرهای لاستیکی با ساسویت به‌طور قابل‌توجهی مقاومت روسازی را بهبود می‌بخشد.

-نتایج مقاومت شیارشدگی نشان داد به ترتیب نمونه‌های حاوی قیرهای 12GTR\_2WMA، 12GTR\_3WMA و 8GTR\_2WMA دارای کمترین مقدار نرخ اضمحلال و رشد کرنش تجمعی می‌باشند و از نظر مقاومت در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک عملکرد بهتری را دارند. به دلیل ساختار کریستالی ساسویت، سختی ماتریس قیری افزایش‌یافته و تشکیل شبکه کریستالی در قیر موجب تأثیر مثبت بر عملکرد شیارشدگی شد.

-باوجود تأثیر مثبت GTR و مخلوط آسفالت گرم بر مقاومت شیارشدگی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی در درصدها بالا، ولی با در نظر گرفتن هم‌زمان عملکرد فنی روسازی در دماهای بالا و پایین و شرایط اقتصادی برای اجرای پروژه ساختار حاوی ۱۲٪ پودر لاستیک و ۲٪ ساسویت به‌عنوان ترکیب بهینه پیشنهاد می‌شود.

-نتایج بخش مدل‌سازی نشان داد مقدار  $R^2$  برای مدل‌های رگرسیون و ANN به ترتیب برابر ۰/۸۷۶ و ۰/۹۳۹ می‌باشد و هر دو مدل توانایی و قابلیت مناسبی در پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی دارند.

-باوجود عملکرد مناسب مدل‌های توسعه‌یافته، ولی عملکرد مدل ANN از نظر دقت بهتر از مدل رگرسیون بود و می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند در پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی با هدف کاهش زمان و هزینه پیشنهاد شود.

-نتایج این تحقیق صرفاً برای قیر ۶۰/۷۰ و متغیرهای پودر لاستیک (۸ تا ۱۶ درصد)، ساسویت (صفر تا ۳ درصد) و تعداد سیکل‌های بارگذاری (صفر تا ۳۶۰۰ سیکل) صادق است و پیشنهاد می‌شود مدل‌های این تحقیق در آینده توسعه و گسترش داده شوند.

- Rodríguez-Alloza, A. M., Gallego, J., Pérez, I., Bonati, A., & Giuliani, F. (2014). High and low temperature properties of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 53, 460-466 .
- Saberik, F., Fakhri, M., & Azami, A. (2017). Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1125-1132.  
**doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.079**
- Savrik, S. A., Balköse, D., Ulutan, S., & Ülkü, S. (2010). Characterization of poly (vinyl chloride) powder produced by emulsion polymerization. *Journal Of Thermal Analysis and Calorimetry*, 101(2), 801-806 .
- Shafabakhsh, G., Ani, O. J., & Talebsafa, M. (2015). Artificial neural network modeling (ANN) for predicting rutting performance of nano-modified hot-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 85, 136-143 .
- Sobhi, S., Yousefi, A., & Behnood, A. (2020). The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 238, 117676.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117676**
- Wang, H., Dang, Z., You, Z., & Cao, D. (2012). Effect of warm mixture asphalt (WMA) additives on high failure temperature properties for crumb rubber modified (CRM) binders. *Construction and Building Materials*, 35, 281-288 .
- Xu, P., Zeng, Z. A., Miao, Y., Zhang, D., & Fu, C. (2023). Field Aging Characterization of Asphalt Pavement Based on the Artificial Neural Networks and Gray Relational Analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(7), 04023188 .
- Yang, X., You, Z., Hasan, M. R. M., Diab, A., Shao, H., Chen, S., & Ge, D. (2017). Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm. *Journal of Cleaner Production*, 159, 346-358 .
- Yousefi, A., Behnood, A., Nowruzi, A., & Haghshenas, H. (2021). Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and restoring. *Construction and Building Materials*, 316, 126034.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126034**
- D'Angelo, J., Kluttz, R., Dongre, R. N., Stephens, K., & Zanzotto, L. (2007). Revision of the superpave high temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test (With Discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 76 .
- Hoang, A. T., Nižetić, S., Ong, H. C., Tarelko, W., Le, T. H., Chau, M. Q., & Nguyen, X. P. (2021). A review on application of artificial neural network (ANN) for performance and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel-based fuels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101416 .
- Jamshidi, A., Hamzah, M. O., & You, Z. (2013). Performance of warm mix asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art. *Construction and Building Materials*, 38, 530-553 .
- Li, L., Huang, X., Han, D., Dong, M., & Zhu, D. (2015). Investigation of rutting behavior of asphalt pavement in long and steep section of mountainous highway with overloading. *Construction and Building Materials*, 93, 635-643 .
- Li, X., Zhou, Z., & You, Z. (2016). Compaction temperatures of Sasobit produced warm mix asphalt mixtures modified with SBS. *Construction and Building Materials*, 123, 357-364 .
- Moniri, A., Ziari, H., Amini, A., & Hajiloo, M. (2022). Investigating the ANN model for cracking of HMA in terms of temperature, RAP and fibre content. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(3), 545-557 .
- Omranian, S. R., Hernando, D., Arab, A., Hamzah, M. O., Keong, C. K., Vuye, C., & Van den bergh, W. (2021). Validation of a model to predict the effect of short-term aging on the rheological properties of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 278, 122381.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122381**
- Qin, Q., Farrar, M. J., Pauli, A. T., & Adams, J. J. (2014). Morphology, thermal analysis and rheology of Sasobit modified warm mix asphalt binders. *Fuel*, 115, 416-425 .

- Ziari, H., Divandari, H., Hajiloo, M., & Amini, A. (2019). Investigating the effect of amorphous carbon powder on the moisture sensitivity, fatigue performance and rutting resistance of rubberized asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 217, 62-72 .
- Ziari, H., Goli, A., & Amini, A. (2016). Effect of crumb rubber modifier on the performance properties of rubberized binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 04016156 .
- Ziari, H., Nasiri, E., Amini, A., & Ferdosian, O. (2019). The effect of EAF dust and waste PVC on moisture sensitivity, rutting resistance, and fatigue performance of asphalt binders and mixtures. *Construction and Building Materials*, 203, 188-200 .
- reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*, 268, 121200 .
- Ziari, H., Amini, A., & Goli, A. (2020). Investigation of blending conditions effect on GTR dissolution and rheological properties of rubberized binders. *Construction and Building Materials*, 242, 117828 .
- Ziari, H., Amini, A., Goli, A., & Mirzaiyan, D. (2018). Predicting rutting performance of carbon nano tube (CNT) asphalt binders using regression models and neural networks. *Construction and Building Materials*, 160, 415-426 .

# Estimation of Rutting Depth of Asphalt Mixtures Containing WMA-Rubberized Binder Using Neural Network and Nonlinear Regression Model

*Amir Amini, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.*

*Farzad Dadkhah, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Tiran, Isfahan, Iran.*

*Mahdi Feghhi Najaf Abadi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Payame Noor University of Tehran Province, Tehran, Iran.*

*Ahmad Safari Mohammadi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: amini.amir68@gmail.com*

Received: September 2003 Accepted: January 2024

## ABSTRACT

The use of modified bitumens has increased the number of variables affecting pavement rutting resistance. Based on this, investigating pavement rutting behavior as an effective approach of functional and environmental variables can improve operational conditions during design and maintenance and reduce heavy laboratory costs. In this research, an attempt is made to evaluate the rutting behavior of bitumen and asphalt mixtures containing the simultaneous combination of rubber powder and Sasobit using multiple stress creep recovery (MSCR) and dynamic creep tests. Then, based on the cumulative plastic strains occurring in the pavement, the rutting resistance of asphalt mixtures will be estimated using artificial neural network models and multiple regression, so that if a suitable model is determined with high accuracy and low error, the production of asphalt with high rutting potential in the laboratory stage and prevent before factory production. The results of the laboratory section indicated that despite the positive effect of GTR and WMA on the rutting resistance of bitumen and asphalt mixtures in high percentages, but taking into account the technical performance of the pavement at high and low temperatures and the economic conditions of bitumen containing 12% rubber powder and 2 % Sasobit is suggested as the optimal combination. Also, the results of the modeling section showed that despite the appropriate performance of the regression and ANN models in estimating the rutting resistance, the ANN model with a correlation coefficient of 0.939 was better than the regression model in terms of accuracy and power. Therefore, it can be suggested as a powerful and appropriate tool in reducing time and cost and preventing the production of asphalt with high rutting potential in the laboratory stage and before factory production.

**Keywords:** Rubberized Asphalt, Rutting, Multiple Stress Creep Recovery, Sasobit, Predictive Models