

# ارائه مدل‌های پیش‌بینی مشخصات رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده حاوی SBS و نانو لوله کربن با استفاده از رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی

## مقاله علمی - پژوهشی

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

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amiramini@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۳۸۴-۳۷۳

### چکیده

با وجود مزایای قابل توجه قیرهای پلیمری اصلاح شده با نانو ذرات، ولی تنها تعداد کمی از مطالعات بر روی پیش‌بینی عملکرد شیارشدگی آن‌ها متمرکز شده‌اند. تخمین و پیش‌بینی صحیح رفتار شیارشدگی روسازی به‌عنوان یک رویکرد تأثیرپذیر از متغیرهای عملکردی و محیطی می‌تواند از تولید آسفالت با پتانسیل بالای شیارشدگی در مرحله آزمایشگاهی و پیش از تولید کارخانه‌ای جلوگیری کند. این تحقیق به مدل‌سازی تأثیر هم‌افزایی SBS و نانولوله‌های کربنی (CNT) در بهبود خواص رئولوژیکی قیرها با استفاده از هوش مصنوعی و تحلیل‌های آماری می‌پردازد. عملکرد شیارشدگی قیرها حاوی ۰.۶، ۱/۲ و ۳ درصد CNT و ۳ و ۶ درصد SBS به صورت جداگانه و ترکیبی با استفاده از آزمایش جاروب دما، تحلیل واریانس و مدل‌های رگرسیون و شبکه عصبی (ANN) بررسی شده است. نتایج نشان داد که هم‌افزایی پلیمر و نانوذرات موجب افزایش مقاومت شیارشدگی و بهبود رفتار رئولوژیکی قیر در دماهای بالا می‌شود. آزمون واریانس نشان داد که افزایش CNT به ۱.۲٪ بیشترین تأثیر را بر بهبود مقاومت شیارشدگی دارد. مقایسه عملکرد مدل‌های پیش‌بینی نشان داد که  $R^2$  برای مدل‌های رگرسیون و ANN بالای ۰.۹۰ است. با این حال، مدل ANN با ضریب همبستگی ۰.۹۷۶ عملکرد بهتری دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با نانوکامپوزیت برای جلوگیری از آسفالت با پتانسیل شیارشدگی بالا در مرحله پیش‌تولید پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: مشخصات رئولوژیکی، شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون چندگانه، نانو کامپوزیت، قیر اصلاح شده

### ۱-مقدمه

(Saadatjoo, Hashemifar, & Goli, 2021; Che et al., 2022). پلیمرها دسته‌ای از مواد افزودنی هستند که با توجه به قابلیت‌های منحصر به فرد و خاص، توانایی قابل توجهی در بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی روسازی‌های انعطاف‌پذیر دارند. استفاده از مواد پلیمری مختلف با بهبود خصوصیات قیرها و مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش عمر مفید جاده‌ها و کاهش هزینه‌های ترمیم و نگهداری می‌شود. SBS یکی از رایج‌ترین و مناسب‌ترین مواد افزودنی مصرفی در صنعت روسازی است که دارای خصوصیات ترکیبی از مواد پلیمری بوده و توانایی بهبود عملکرد

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 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 گذشته احساس شود. هدف استفاده از مواد افزودنی در اصلاح قیرهای خالص، افزایش عمر خستگی، مقاومت شیارشدگی و کاهش شدت ترک‌خوردگی روسازی است (Amini, Ziari, )

قیرها و مخلوط‌های آسفالت تأثیر بگذارد. سانتاگاتا و همکاران (Santagata, Baglieri, Tsantilil, Chiappinelli, & Aimonetto, 2015) در مطالعات خود بر روی عملکرد CNT در روسازی جاده‌ها دریافتند که نانولوله‌های کربنی خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط آسفالت را در جنبه‌های مختلفی از جمله مقاومت در برابر ترک خوردگی، پیرشدگی و عمر خستگی بهبود می‌بخشد. عربانی و همکاران (Arabani & Faramarzi, 2015) با بررسی شیارشدگی و خستگی مخلوط‌های اصلاح‌شده با CNT دریافتند که افزودن CNT می‌تواند خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی را در برابر ترک خوردگی ناشی از خستگی و تغییر شکل دائمی بهبود بخشد. عامری و همکاران (Ameri, Nowbakht, Molayem, & Aliha, 2016) با بررسی اثر نانولوله‌های کربنی روی خواص شکست خستگی مخلوط‌های آسفالتی را از طریق نسبت انرژی تلف‌شده دریافتند که افزودن CNT می‌تواند مقاومت در برابر شکست و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود بخشد. گلی و همکاران (Goli, Ziari, & Amini, 2017) به این نتیجه رسیدند که CNT علاوه بر کاهش حساسیت دما و افزایش خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیرها، می‌تواند تأثیرات مثبت قابل‌توجهی بر بهبود پایداری ذخیره‌سازی قیرهای پلیمری داشته باشد. تانگ و همکاران سال ۲۰۲۳ با انجام شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و بررسی رئولوژیکی و شیمیایی قیرهای اصلاح‌شده کامپوزیت SBS/CNT در حالت‌های مختلف پیرشدگی نشان دادند که CNT می‌تواند اجزای موجود در قیر اصلاح‌شده با SBS را جذب کند و حرکت و انتشار مولکول‌های SBS و قیر را محدود کند، که باعث افزایش پایداری قیر اصلاح‌شده با SBS می‌شود. در همین حال، افزودن نانولوله‌های کربنی می‌تواند خواص رئولوژیکی، حساسیت دما و مقاومت در برابر شیارشدگی قیر اصلاح‌شده با SBS را در دماهای بالا بهبود بخشد. علاوه بر این، نانولوله‌های کربنی تأثیر محدودی در به تاخیر انداختن اکسیداسیون داشتند و نقش فعالی در افزایش عملکرد دمای بالا در شرایط مختلف پیرشدگی داشتند. کانگ و همکاران (Gong, Wu, Bi, & Tian, 2023) (Tang et al., 2023) سال ۲۰۲۳ نشان دادند که افزودن SBS و CNT ها به طور قابل توجهی مقاومت در برابر خستگی درزگیرهای قیری را بهبود می‌بخشد. بطوری که، C1.0S5F5 خاصیت انعطاف پذیری بهتری را منعکس می‌کند، که از ترک خوردن ثانویه پس از ساخت درزگیر جلوگیری می‌کند. همچنین، C1.0S5F5 مقاومت بسیار خوبی در برابر تغییر شکل در شرایط ترافیکی سنگین نشان می‌دهد. به طور خلاصه،

دینامیکی آسفالت را در برابر بارهای اعمالی دارد. باوجود مزایای قابل‌توجه SBS در صنعت روسازی، ولی استفاده از این مواد همچنان دارای چالش‌ها و نقاط ضعفی می‌باشند. به‌طوری‌که با افزایش غلظت SBS، پلیمر به‌تدریج به فاز غالب تبدیل شده و منجر به وارونگی در فاز قیر و مشکلاتی مانند پایداری ذخیره‌سازی شود. تمایل جداسازی قیرهای اصلاح‌شده با SBS، به‌ویژه در دماهای بالا، یکی دیگر از معایب استفاده از پلیمرهاست که ممکن است بر مزایای مورد انتظار اصلاح تأثیر منفی بگذارد (Al-Hadidy & Tan, 2009). برای غلبه بر این مشکل، طیف گسترده‌ای از افزودنی‌ها برای اصلاح کولپلیمرهای SBS با روش‌های فیزیکی یا شیمیایی استفاده‌شده است (Zhang & Yu, 2009). در بین مواد اصلاح‌کننده خواص قیرهای پلیمری، نانو ذرات به دلیل خواص منحصربه‌فرد بیش از سایر مواد موردتوجه قرار گرفته‌اند. نانو ذرات با داشتن ساختار صفحه‌ای، دارای خواص منحصربه‌فردی بوده نسبت به سایر مواد می‌باشند. به‌طوری‌که افزایش نسبت سطح به حجم نانو ذرات باعث می‌شود که اتم‌های واقع در سطح، اثر بسیار بیشتری نسبت به اتم‌های درون حجم ذرات، بر خواص فیزیکی ذرات داشته باشند. این ویژگی، واکنش‌پذیری نانو ذرات را به‌شدت افزایش می‌دهد به‌گونه‌ای که این ذرات به‌شدت تمایل به آگلومر یا کلوخه‌ای شدن داشته باشند (Oberlin, Endo, & Koyama, 1976). همچنین، افزایش سطح ذرات، فشار سطحی را تغییر داده و منجر به تغییر فاصله بین ذرات یا فاصله بین اتم‌های ذرات می‌شود. فاصله بین اتم‌های ذرات با کاهش اندازه آن‌ها، کاهش می‌یابد (Yang, 2003) (Hirsch & Brettreich, 2006). در میان نانو ذرات مختلفی که تاکنون به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های قیر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، نانولوله‌های کربنی (CNT) به دلیل ویژگی‌های خاص در اصلاح خواص روسازی به‌طور فزاینده‌ای موردتوجه قرار گرفته‌اند. این مواد با ساختار استوانه‌های توخالی بلند از گرافن با قطر حداقل ۱ نانومتر، توانایی بالایی در بهبود خواص قیر دارند (Lamb & Huffman, 1993). خواص مکانیکی متمایز و سطح ویژه بالا، CNT را به افزودنی‌هایی ارزشمند در صنعت روسازی تبدیل کرده است که می‌تواند کامپوزیت‌های چسبنده قوی‌تری نسبت به مواد تقویت‌کننده سنتی بسازند. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی بر روی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با قیرهای اصلاح‌شده با نانو ذرات انجام‌شده است. امیرخانیان و همکاران (Amirkhanian, Xiao, & Amirkhanian, 2011) نشان داد که قیرهای اصلاح‌شده با CNT به‌طور قابل‌توجهی بر مقاومت شیارشدگی و خستگی

شاخص‌های عملکرد معمولی، مانند نقطه نرم شدگی و درجه نفوذ درزگیرهای قیری اصلاح شده با SBS/CNT، می‌توانند الزامات مشخصات را برآورده کنند و در مقایسه با درزگیرهای تجاری موجود، پایداری در دمای بالا و خواص ضد پیرشدگی خوبی را نشان دهند. با وجود تأثیرات مثبت قیرهای پلیمری اصلاح‌شده با نانو ذرات کربن، ولی تعدد متغیرهای تأثیرگذار بر عملکرد قیرهای حاوی نانو کامپوزیت باعث شده است تا مشکلاتی در مرحله پیش‌تولید آسفالت و در کارخانه ایجاد شود. شیارشدگی یکی از خرابی‌های شایع در روسازی‌های آسفالتی است که تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله عملکرد فنی و رئولوژیکی قیر مخلوط قرار دارد. علیرغم مطالعات گسترده بر روی عملکرد قیرهای اصلاح‌شده، پیش‌بینی و تخمین مقاومت شیارشدگی به دلیل پیچیدگی و تعدد متغیرها هنوز به‌طور کامل درک نشده است. در سال‌های اخیر، با افزایش علاقه به هوش مصنوعی، مدل‌های محاسباتی و الگوریتم‌های هوشمند توسعه یافته‌اند و به‌عنوان ابزاری قدرتمندی برای تجزیه و تحلیل داده‌های پیچیده و حل مسائل پیچیده غیرخطی پیشنهاد شده‌اند. در سال‌های اخیر، با افزایش علاقه به هوش مصنوعی، مدل‌های محاسباتی و الگوریتم‌های هوشمند توسعه یافته‌اند و به‌عنوان ابزاری قدرتمندی برای تجزیه و تحلیل داده‌های پیچیده و حل مسائل پیچیده غیرخطی پیشنهاد شده‌اند (Moniri, Ziari, Amini, & Mirzaiyan, 2018; Hajiloo, 2022; Ziari, Amini, Goli, & Mirzaiyan, 2018). شبکه‌های عصبی مصنوعی 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. عمرانیان و همکاران (Omranian et al., 2021) 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 (Xu, Zeng, Miao, Zhang, & Fu, 2023) مدلی برای پیش‌بینی تعیین پیرشدگی میدانی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی و تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری ایجاد کردند که ویسکوزیته قیر پیرشده را به‌عنوان ویژگی پیش‌بینی‌کننده هدف در نظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد که مدل پیش‌بینی توسعه یافته با استفاده از رویکرد ANN دقت پیش‌بینی بالایی با مقدار  $R^2$

بیشتر از ۰/۹۰ ارائه می‌دهد.

با وجود مزایای قابل توجه قیرهای پلیمری اصلاح‌شده با نانو ذرات، ولی تنها تعداد کمی از مطالعات بر روی پیش‌بینی عملکرد شیارشدگی آن‌ها متمرکز شده‌اند. تخمین و پیش‌بینی صحیح رفتار شیارشدگی روسازی به‌عنوان یک رویکرد تأثیرپذیر از متغیرهای عملکردی و محیطی می‌تواند از تولید آسفالت با پتانسیل بالای شیارشدگی در مرحله آزمایشگاهی و پیش از تولید کارخانه‌ای جلوگیری شود. بنابراین، هدف اول این مطالعه بررسی تأثیر هم‌افزایی SBS و CNT بر رفتار رئولوژیکی و مقاومت شیارشدگی قیرها با استفاده از آزمایش جاروب دما و تحلیل‌های آماری می‌باشد. درحالی‌که هدف دوم بر مبنای تخمین مقاومت شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده بر اساس پارامتر شیارشدگی سوپرپیو با استفاده از مدل‌های ANN و رگرسیون قرار داده شده است.

## ۲- روش تحقیق و مصالح آزمایشگاهی

### ۲-۱- قیر و مواد افزودنی

برای تهیه قیرهای پلیمری اصلاح‌شده با نانو ذرات، به ترتیب از مقادیر ۰/۶ و ۱/۲ درصد CNT و ۳ و ۶ درصد وزنی SBS به همراه قیر PG64-22 شرکت پاسارگاد تهران استفاده شده است. مقادیر انتخاب‌شده برای مواد افزودنی بر اساس تحقیقات قبلی و در محدوده مناسب و بهینه هر افزودنی انتخاب شده است (Goli et al., 2017; Jafari, Babazadeh, & Aflaki, 2015).

### ۲-۲- تولید قیرهای اصلاح شده

با توجه به اهمیت تولید قیرهای حاوی نانو ذرات از نظر پراکندگی یکنواخت و مناسب در مقیاس نانو، برای تهیه قیرهای اصلاح‌شده از روش طرح اختلاط در مطالعات موفق گذشته استفاده شده است. به این منظور، ابتدا قیر خالص تا حدود  $10 \pm 150$  درجه سانتی‌گراد گرم و سپس پلیمر SBS در درصد‌های مشخص به قیر اضافه شد و به کمک دستگاه همزن مکانیکی اختلاط اولیه انجام شد. سپس، دمای قیر به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داده شد و در مدت زمان ۹۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه عملیات اختلاط قیر پلیمری با دستگاه همزن برش بالا انجام شد (Mirzaiyan, Ameri, Amini, Sabouri, & Norouzi, 2019). در نهایت، نانو ذرات به آرامی به قیر پلیمری اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و

با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه اختلاط نهایی قیر با افزودنی انجام شد (Goli et al., 2017).

### ۲-۳- برنامه آزمایشگاهی

آزمایش جاروب دما باهدف بررسی خصوصیات شیارشدگی و مشخصات رئولوژیکی قیرها در دماهای متغیر و در فرکانس ثابت انجام می‌شود. این آزمایش با استفاده از دستگاه DSR و نمونه‌ها با قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر مورد آزمایش قرار می‌گیرد. بازه دمایی ۳۰ تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد، فرکانس ثابت ۱۰ رادیان بر ثانیه (معادل ۱/۵۹ هرتز) و کرنش نوسانی ۱ درصد به‌عنوان شرایط خصوصی آزمایش جاروب دما در این تحقیق انتخاب شده است. خروجی‌های این آزمایش اساساً پارامترهای مدول مختلط برشی ( $G^*$ ) و زاویه فاز ( $\delta$ ) و درنهایت شاخص شیارشدگی برحسب پارامتر  $G^*/\text{Sin}\delta$  می‌باشد. پارامتر  $G^*$  بیانگر مقاومت قیر بدر برابر تغییر شکل ایجادشده در اثر نیروهای برشی است، درحالی‌که پارامتر  $\delta$  تأخیر زمانی بین تنش‌های برشی اعمال شده و پاسخ‌های کرنش برشی را نشان می‌دهد. درحالی‌که پارامتر  $G^*/\text{Sin}\delta$  به‌عنوان شاخصی مهم در سیستم درجه‌بندی عملکرد Superpave (PG) برای ارزیابی رفتار رئولوژیکی و مقاومت شیارشدگی قیرها محسوب می‌شود.

### ۳-ارائه و تفسیر نتایج

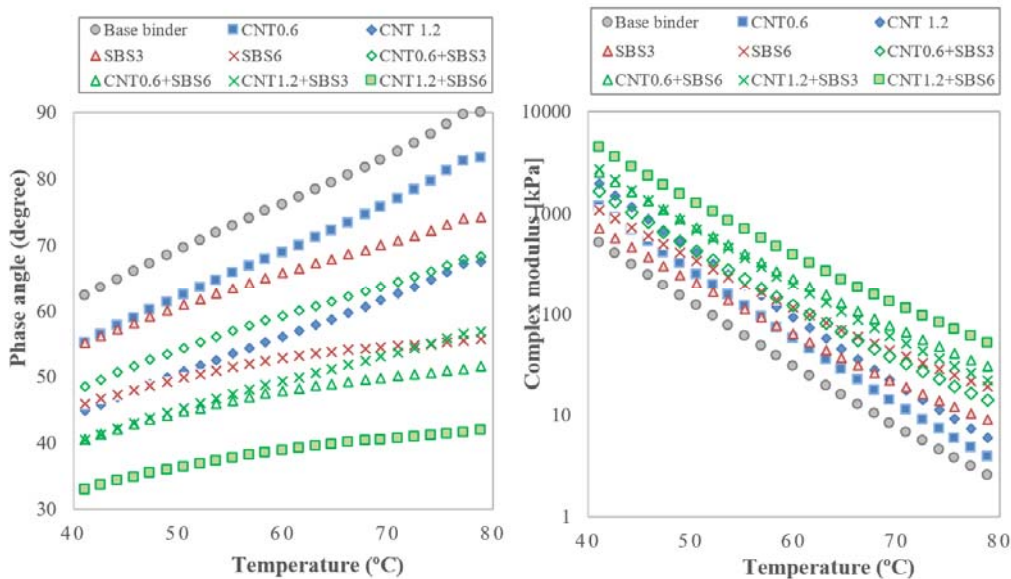
#### ۳-۱- نتایج آزمایشگاهی

بررسی نتایج رئولوژیکی قیرهای حاوی SBS/CNT در شکل ۱ نمایش داده شده است. بر اساس نتایج، افزایش دما از ۴۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش سختی قیر و در نتیجه کاهش  $G^*$  و افزایش  $\delta$  شده است. به‌طوری‌که با افزایش تغییرات زاویه فاز، رفتار قیر از حالت الاستیک به سمت رفتار پلاستیک تغییر حالت می‌دهد و خواص رئولوژیکی قیر تضعیف می‌شود. این در حالی است که افزودن پلیمر و نانو ذرات موجب افزایش سختی قیر شده و مقاومت رئولوژیکی قیرها را بهبود بخشیده است و تأثیر منفی دما بر کاهش سختی قیرها را تا حدی جبران کرده است. این در حالی است که با افزایش دما سرعت کاهش  $G^*$  قیر پایه نسبت به قیرهای اصلاح شده پلیمری بسیار بیشتر است. دلیل این موضوع ناشی از تشکیل زنجیره سه‌بعدی پلیمری در ماتریس قیری می‌باشد که موجب کاهش حساسیت و بهبود مقاومت قیر نسبت به افزایش دما می‌باشد. با افزایش مقدار SBS از ۳ به ۶

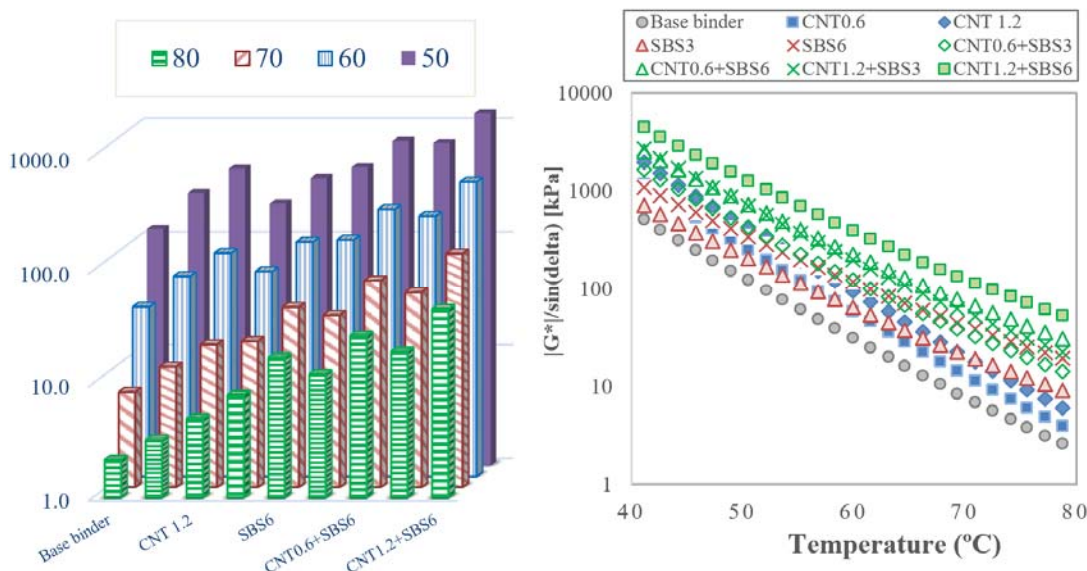
درصد این رویکرد مثبت، تشدید شده است و شیب نمودار کاهش سختی در نمونه حاوی SBS6 در کمترین مقدار خود قرار گرفته است. بررسی عملکرد رئولوژیکی قیرهای SBS/CNT نشان می‌دهد که با افزودن نانو ذرات به قیر پلیمری مقادیر  $G^*$  افزایش و  $\delta$  کاهش یافته است که این تأثیر با افزایش درصد CNT بیشتر نمایان می‌شود. به‌طوری‌که با افزودن ۰/۶ درصد CNT به قیر SBS6 مقدار  $G^*$  در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۱۲، ۹۳ و ۷۳ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش مقدار CNT از ۰/۶ به ۱/۲ درصد مقدار  $G^*$  در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۲۷۰، ۲۳۶ و ۱۹۹ درصد بهبود یافته است. افزایش مدول  $G^*$  و زاویه اختلاف فاز به معنای افزایش سختی و مقاومت روسازی در مقابل شیارشدگی ناشی از تغییر شکل‌های ماندگار و پلاستیک است. بررسی  $G^*/\text{Sin}\delta$  در شکل ۲ نشان می‌دهد که به‌طور کلی با افزایش دما از ۵۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد سختی قیر کاهش یافته و قیر رفتار نرم‌تری پیدا می‌کند. این تغییرات موجب کاهش رفتار الاستیک و کاهش مقاومت شیارشدگی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار می‌شود. نکته قابل توجه که در بررسی تأثیر هم‌زمان دما و مواد افزودنی مشاهده می‌شود، نقش مثبت SBS و CNT در افزایش مقاومت قیرها در برابر افزایش دما است. به‌طوری‌که تأثیر دما بر قیرهای پایه به مراتب بیشتر از قیرهای پلیمری اصلاح شده با CNT است. این تفاوت با افزایش درصد پلیمر و CNT مشهودتر است و در قیرهای اصلاح شده با ترکیب SBS/CNT مقاومت بیشتری در برابر شاخص حرارتی و تنش بارگذاری دیده می‌شود که ناشی از تشکیل شبکه پلیمری و تعامل نانو ذرات و ماتریس قیر می‌باشد. به‌طوری‌که نسبت شاخص  $G^*/\text{Sin}\delta$  در دماهای ۸۰ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای قیرهای پایه، CNT0.6+SBS3، CNT0.6+SBS6، CNT1.2+SBS3 و CNT1.2+SBS6 به ترتیب برابر ۱/۷۵، ۲/۸۴، ۳/۶۳، ۲/۷۵ و ۳/۵۸ درصد می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با هم‌افزایی پلیمر و نانو ذرات احتمال شیارشدگی در اثر افزایش دما کاهش یافته است و رفتار قیر از نظر خصوصیات ویسکوالاستیک بهبود می‌یابد. همچنین، بهترین عملکرد در نمونه‌های حاوی SBS6 مشاهده می‌شود که ناشی از واکنش SBS با قیر و تشکیل زنجیره‌های به هم پیچیده و درنهایت بهبود عملکرد رئولوژیکی و مقاومت شیارشدگی روسازی می‌باشد (Liu, Zeiada, Al-Khateeb, Shanableh, & Samarai, 2021; Xiao et al., 2021).

تقویت مقاومت برشی در برابر تنش‌های فشاری سیکلی در هر پالس موجب می‌شود که بخش از انرژی توسط کرنش‌های ارتجاعی و بخش دیگر از طریق کرنش‌های غیر ارتجاعی و ماندگار برشی، پخش و استهلاک شوند (Amini et al., 2021; Yılmaz & Gürbüz, 2021).

به‌طور خلاصه می‌توان بیان کرد که در اثر هم‌افزایی پلیمر و نانو ذرات عملکرد رئولوژیکی قیرها به‌طور قابل توجهی بهبود یافته و این تأثیر مثبت در دماهای بالاتر بیشتر آشکار می‌شود. دلیل این موضوع می‌تواند ناشی از پخش ذرات نانولوله کربن و نفوذ آن‌ها در فضای مولکول‌های سنگین پلیمر باشد که موجب افزایش مقاومت برشی و بهبود چسبندگی ماتریس پلیمری شده است.



شکل ۱. بررسی تأثیر هم‌افزایی SBS و CNT بر خصوصیات رئولوژیکی قیرها



شکل ۲. مقایسه پارامتر  $G^*/\sin\delta$  قیرهای اصلاح شده با کامپوزیت SBS/CNT در طیف دمایی گسترده

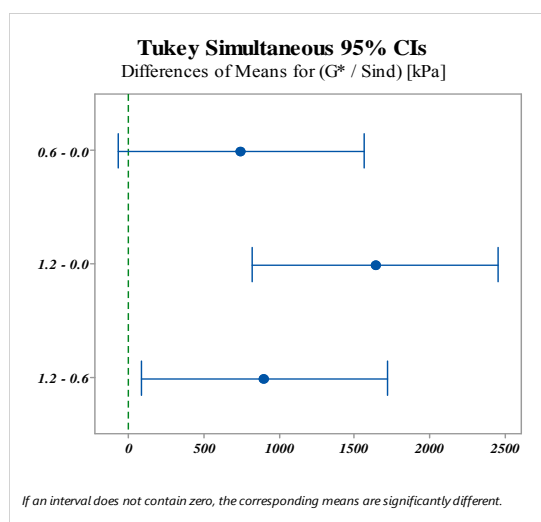
### ۲-۳- نتایج آزمون های آماری

برای بررسی تأثیر CNT، SBS و دمای عملکردی بر خصوصیات شیارشدگی، تحلیل واریانس با استفاده از نرم افزار Minitab انجام شده است. جهت تحلیل ANOVA ابتدا کنترل نرمال بودن داده ها به کمک آزمون کولموگروف-اسمیرنوف تایید شده است و سپس تحلیل بر روی داده های نرمال انجام شده است. نتایج میزان اثرگذاری متغیرها بر عملکرد شیارشدگی قیرهای اصلاح شده با SBS/CNT در جدول ۱ نشان داده است. بر اساس نتایج به دست آمده متغیرهای درصد CNT، درصد SBS و دمای آزمایش اثر معناداری در سطح معناداری ۹۵ درصد بر شاخص شیارشدگی قیرهای اصلاح شده دارد. این در حالی است که بر اساس ضریب F به دست آمده، به ترتیب متغیرهای CNT، دمای آزمایش و درصد SBS با مقادیر ۳۸/۴، ۲۳/۱ و ۱۱/۹ بیشترین میزان تأثیر را بر تغییرات خصوصیات رئولوژیکی و مقاومت شیارشدگی دارند. نتایج آزمون Tukey و نمودارهای تداخلی در شکل های ۳ و ۴ نشان می دهد که افزایش مقدار SBS

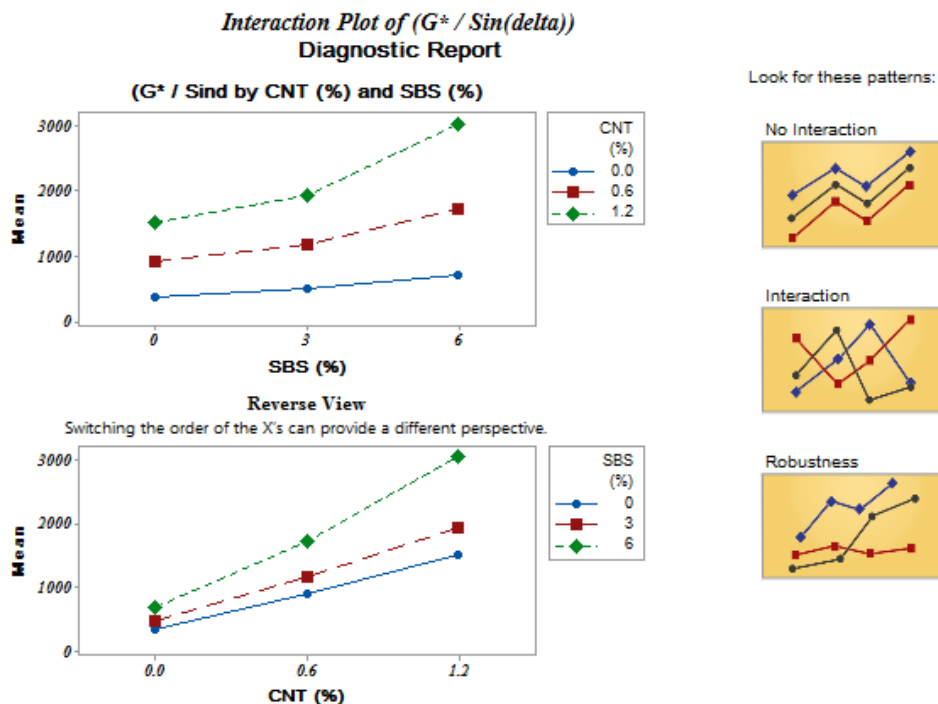
از ۰ به ۳ درصد تأثیر قابل توجهی در سطح معناداری ۹۵ درصد بر مقاومت شیارشدگی قیرها ندارد. این در حالی است که با افزایش آن به مقدار ۶ درصد، تأثیر مثبت SBS بر بهبود مقاومت شیارشدگی قیرها نمایان می شود. بطوری که با افزایش مقدار SBS، شبکه قدرتمند پلیمری ناشی از تعامل مولکول های استایرن و قیر تشکیل شده و در نتیجه پیوند ذرات پلیمر و گروه های عاملی قیر در ماتریس قیری موجب بهبود خواص رئولوژیکی شده است. همچنین، بررسی مقادیر CNT نشان می دهد افزودن ۰/۶ درصد CNT تأثیر خاصی در سطح معناداری ۹۵ درصد بر مقاومت شیارشدگی قیرها ندارد. در حالی که با افزایش مقدار آن به ۱/۲ درصد مقدار کربن موجود در ماتریس قیری افزایش یافته و با تشکیل پیوندهای کووالانسی و در نتیجه برهمکنش پیوند  $\pi-\sigma$  با مولکول های کربن قیر و برهمکنش  $\pi-\pi$  بین دیواره های CNT، تأثیرگذاری نانو ذرات در بهبود خواص قیرها و افزایش مقاومت شیارشدگی آشکار می شود (Ziari et al., 2018).

جدول ۱. نتایج آزمون تحلیل واریانس

متغیرها	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	Sig.
درصد CNT	۱۳۳۶۶۸۸۸۹	۶۶۸۳۳۴۴۳	۳۸/۴	۰/۰۰۰
درصد SBS	۴۱۴۲۸۸۰۹	۲۰۷۱۴۴۰۵	۱۱/۹	۰/۰۰۰
دمای آزمایش	۱۲۸۶۷۱۷۲۴۴	۴۰۲۰۹۹۱۴	۲۳/۱	۰/۰۰۰



شکل ۳. نتایج آزمون Tukey



شکل ۴. نتایج بررسی تداخل هم‌افزایی متغیرهای SBS و CNT

### ۳- نتایج مدل رگرسیون پیشرفته

$$Z = 0.82785 + 0.2679 X_1 - 0.0154 X_2 - 1.0960 X_3 - 0.08192 X_1^2 - 0.03958 X_2^2 + 0.2373 X_3^2 + 0.02245 X_1 X_2 - 0.12874 X_1 X_3 + 0.36613 X_2 X_3 \quad (1)$$

$$G^*/\sin(\delta) = e^{(17.97 \times Z - 3.55)} \quad (2)$$

### ۴- مدل شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی به‌عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند و مفید در حل مسائل پیچیده و با تعداد متغیر زیاد می‌باشند که توانایی مناسب در یادگیری، سازگاری، و یافتن رابطه مناسب بین متغیرهای ورودی و خروجی دارند. در این مطالعه، برای توسعه مدل تخمین مقاومت شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با استفاده از شبکه‌های عصبی، در گام اول معماری شبکه شامل تعداد لایه‌های موجود و تعداد نورون‌های هر لایه تعیین می‌شود. برای بررسی تأثیر ساختار و معماری شبکه بر دقت مدل، ۲۰ ساختار با تعداد متفاوت لایه‌ها و گره‌های مخفی طراحی شده تا بهینه‌ترین معماری شبکه تعیین شود. پس از تعیین معماری شبکه، نوع تابع تبدیل برای نگاشت داده‌های ورودی به شبکه مشخص می‌شود. تابع تانزانت سیگموئید با توانایی تبدیل داده‌های ورودی به داده‌هایی در محدوده ۰ تا ۱ برای لایه‌های مخفی ورودی و تابع تحریک خطی برای لایه خروجی در نظر گرفته شده است.

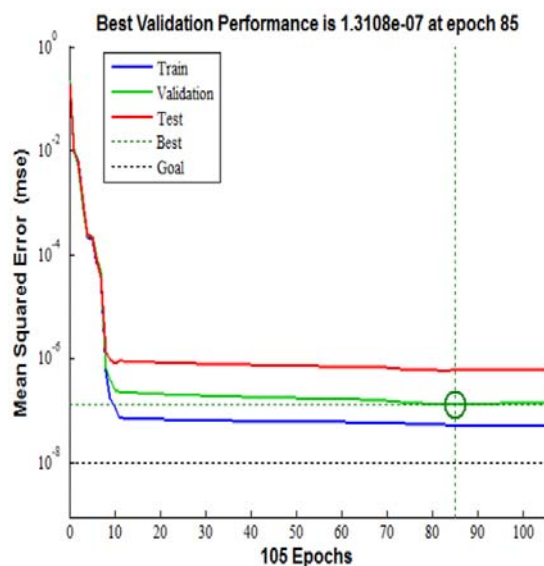
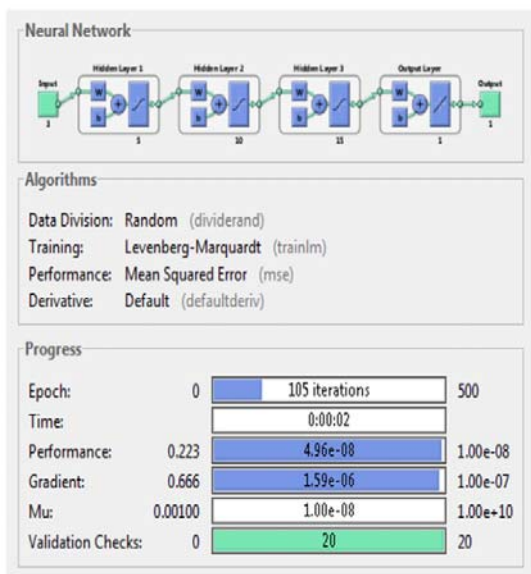
رگرسیون پرکاربردترین روش آماری است که برای سنجش و ارائه‌ی مدل ارتباط متغیرها استفاده می‌شود. در این تحقیق از مدل رگرسیون غیرخطی استفاده شده تا با تعیین ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها، رابطه ریاضی مناسبی تعیین شود. برای مدل‌سازی داده‌های آزمایشگاهی، ابتدا اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش جاروب دما نرمال‌سازی شدند و در دو دسته آموزش و آزمون تقسیم شدند. با استفاده از داده‌های آموزش که شامل ۸۰ درصد کل داده‌ها بود، مدل‌سازی انجام شد و سپس با استفاده از داده‌های آزمون که شامل ۲۰ درصد اطلاعات می‌باشد و در بخش آموزش استفاده نشده است، اعتبارسنجی انجام شد. مدل پیشنهادی در رابطه ۱ و ۲ نشان داده شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل توسعه‌یافته در تخمین مقاومت شیارشدگی قیرها از شاخص‌های RMSE، MAPE و COV استفاده شده است که مقادیر کمتر این شاخص‌ها، بیانگر عملکرد بهتر مدل می‌باشد. مقادیر شاخص‌های RMSE، MAPE و COV برای مدل توسعه‌یافته برابر ۵۱۱/۲۵، ۷/۶۰ و ۳۸/۶۵ می‌باشد که بیانگر مطلوبیت نسبی مدل در تخمین مقاومت شیارشدگی قیرها می‌باشد. در این رابطه، متغیرهای  $X_1$ ،  $X_2$  و  $X_3$  به ترتیب برابر درصد SBS، درصد CNT و دمای آزمایش می‌باشد.

### مقایسه عملکرد مدل‌ها

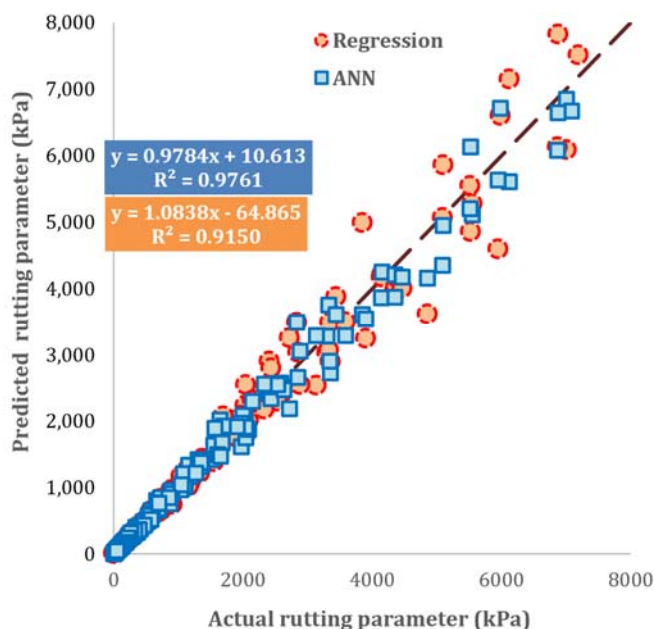
نتایج همبستگی مقادیر پیش‌بینی و واقعی شاخص  $G^*/\text{Sin}\delta$  قیرهای اصلاح‌شده حاوی SBS/CNT در شکل ۶ نشان می‌دهد که مقادیر  $R^2$  برای مدل‌های رگرسیون و ANN به ترتیب برابر ۰/۹۱۵ و ۰/۹۷۶ می‌باشد و هر دو مدل پیشنهادی با داشتن  $R^2 > 0.9$  عملکرد مناسبی در پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی دارند. درحالی‌که مقایسه عملکرد آن‌ها نشان می‌دهد، مدل ANN دارای خطای کمتر و دقت بالاتری می‌باشد و از عملکرد بهتری نسبت به مدل رگرسیون برخوردار می‌باشد. بنابراین با توجه به عملکرد مناسب مدل ANN در تخمین داده‌ها با دقت مناسب و خطای کم، می‌توان بیان کرد که مدل توسعه‌یافته در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند و مناسب موجب کاهش زمان و هزینه در مرحله آزمایشگاهی شود و از تولید آسفالت با پتانسیل شیارشدگی بالا در مرحله پیش‌تولید جلوگیری کند.

همچنین، الگوریتم لوببرگ-مارکوارت به‌صورت حداقل تابع خطا و لوگ‌سیگموئید برای تابع انتقال لایه‌های میانی و تابع خطی برای لایه خارجی از نوع خطی استفاده شده است.

پس از بررسی ساختار و معماری‌های مختلف مدل‌های شبکه عصبی، مدل ۱-۳-۳ با سه لایه مخفی و تعداد ۵ نورون در لایه اول، ۱۰ نورون در لایه دوم و ۱۵ نورون در لایه بالاترین دقت و کمترین خطای پیش‌بینی به‌عنوان مدل برتر شناسایی شد. نتایج پارامترهای آماری نشان می‌دهد که مقدار شاخص‌های RMSE، MAPE و COV مدل طراحی‌شده به ترتیب برابر ۰/۳۰۰/۶، ۵/۵۶ و ۲۲/۷ می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و مقایسه آن‌ها با عملکرد مدل رگرسیون مشخص می‌شود که مدل شبکه عصبی با خطای کمتر و دقت بالاتر، مطلوبیت بهتری در تخمین مقاومت شیارشدگی قیرهای حاوی SBS/CNT دارد. همچنین نتایج در شکل ۵ نشان می‌دهد که با وجود ۱۰۵ تکرار برای همگرایی مدل، ولی مدل پس از تکرار ۸۵ به مطلوبیت کافی رسیده است و داده‌های آموزش، آزمون و اعتبارسنجی به حداقل خطا و بالاترین دقت خود دست‌یافته‌اند.



شکل ۵. معماری و روند طراحی و آموزش مدل شبکه عصبی طراحی‌شده



شکل ۶. مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون برای پارامتر شیارشدگی قیر

## ۵- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر هم‌افزایی SBS و CNT بر رفتار رئولوژیکی قیرها با استفاده از آزمایش جاروب دما و تحلیل‌های آماری می‌باشد. همچنین، تخمین مقاومت شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده بر اساس پارامتر شیارشدگی سوپریپو با استفاده از مدل‌های ANN و رگرسیون تخمین زده شود. نتایج حاصل از این مطالعه به صورت زیر می‌باشد:

-نتایج آزمایش جاروب دما نشان می‌دهد که با هم‌افزایی پلیمر و نانو ذرات و تعامل آن‌ها با اجزای قیر، زنجیره‌های پلیمری تشکیل شده و در نهایت احتمال شیارشدگی در اثر افزایش دما کاهش می‌یابد.

-مقایسه عملکرد قیرها نشان داد که نمونه ترکیبی حاوی CNT1.2+SBS6 بهترین عملکرد را در بین نمونه‌های بررسی شده دارد که دلیل آن می‌تواند ناشی از پخش ذرات نانولوله کربن و نفوذ آن‌ها در فضای مولکول‌های سنگین پلیمر و افزایش مقاومت برشی و بهبود چسبندگی ماتریس پلیمری و در نتیجه بهبود خواص رئولوژیکی و مقاومت

-نتایج آزمون واریانس نشان داد که با وجود تأثیرگذاری معنادار متغیرهای CNT، SBS و دمای آزمایش بر شاخص شیارشدگی، ولی افزایش مقدار CNT نسبت به سایر متغیرها اثرگذاری بیشتری بر خواص رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده

با کامپوزیت SBS/CNT دارد.

-عملکرد مدل‌های پیش‌بینی نشان داد که مقادیر  $R^2$  برای مدل‌های رگرسیون و ANN به ترتیب برابر  $0.915$  و  $0.976$  می‌باشد و هر دو مدل پیشنهادی با داشتن  $R^2 > 0.9$  عملکرد مناسبی در پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی قیرهای حاوی SBS/CNT دارند.

-مقایسه مدل‌های توسعه‌یافته نشان داد که مدل ANN دارای خطای کمتر و دقت بالاتری نسبت به مدل رگرسیون غیرخطی می‌باشد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند و مناسب در پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با نانو کامپوزیت برای جلوگیری از آسفالت با پتانسیل شیارشدگی بالا در مرحله پیش‌تولید پیشنهاد شود.

## ۶- سپاسگزاری

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

- Mirzaiyan, D., Ameri, M., Amini, A., Sabouri, M., & Norouzi, A. (2019). Evaluation of the performance and temperature susceptibility of gilsonite-and SBS-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 207, 679-692.
- 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.
- Oberlin, A., Endo, M., & Koyama, T. (1976). Filamentous growth of carbon through benzene decomposition. *Journal of Crystal Growth*, 32(3), 335-349.
- 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**
- Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., Chiappinelli, G., & Aimonetto, I. B. (2015). Effect of sonication on high temperature properties of bituminous binders reinforced with nano-additives. *Construction and Building Materials*, 75, 395-403.
- Tang, Y., Fu, Z., Ma, F., Liu, J., Sun, Q., & Li, C. (2023). Carbon nanotubes for improving rheological and chemical properties of styrene-butadiene-styrene modified asphalt binder. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(1), 2211212.
- Xiao, Y., Chang, X., Yan, B., Zhang, X., Yunusa, M., Yu, R., & Chen, Z. (2021). SBS morphology characteristics in asphalt binder and their relation with viscoelastic properties. *Construction and Building Materials*, 301, 124292.
- 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, P. (2003). *The Chemistry of Nanostructured Materials*, World Scientific.
- Yılmaz, B., & Gürbüz, H. E. (2021). Rheological and morphological evaluation of nanoclay modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 313, 125479.
- Zhang, F., & Yu, J.-Y. (2009). The research for asphalt modified with phosphorus trichloride/SBS. *International Polymer Processing*, 24(2), 148-156.
- 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.
- Al-Hadidy, A., & Tan, Y.-q. (2009). Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2941-2950.
- Ameri, M., Nowbakht, S., Molayem, M., & Aliha, M. (2016). Investigation of fatigue and fracture properties of asphalt mixtures modified with carbon nanotubes. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 39(7), 896-906.
- 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.
- Amirkhanian, A. N., Xiao, F., & Amirkhanian, S. N. (2011). Characterization of unaged asphalt binder modified with carbon nano particles. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(5), 281.
- Arabani, M., & Faramarzi, M. (2015). Characterization of CNTs-modified HMA's mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 83, 207-215.
- 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 restoring. *Construction and Building Materials*, 316, 126034.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126034**
- Goli, A., Ziari, H., & Amini, A. (2017). Influence of carbon nanotubes on performance properties and storage stability of SBS modified asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017070.
- Gong, Y., Wu, S., Bi, H., & Tian, L. (2023). Study on Thermal Stability and Fatigue Properties of SBS/CNT-Modified Asphalt Sealant. *Polymers*, 15(19), 3968.
- Hirsch, A., & Brettreich, M. (2006). *Fullerenes: chemistry and reactions*: John Wiley & Sons.
- Jafari, M., Babazadeh, A., & Aflaki, S. (2015). Effects of stress levels on creep and recovery behavior of modified asphalt binders with the same continuous performance grades. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2505), 15-23.
- Lamb, L. D., & Huffman, D. R. (1993). Fullerene production. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 54(12), 1635-1643.
- Liu, H., Zeiada, W., Al-Khateeb, G. G., Shanableh, A., & Samarai, M. (2021). Use of the multiple stress creep recovery (MSCR) test to characterize the rutting potential of asphalt binders: A literature review. *Construction and Building Materials*, 269, 121320.

# Presenting Predictive Models of Rheological Characteristics of Modified Bitumens Containing SBS and Carbon Nanotubes Using Nonlinear Regression and Neural Network

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

*E-mail: amiramini@iau.ac.ir*

Received: May 2025- Accepted: August 2025

## **ABSTRACT**

Despite the significant advantages of polymer bitumen's modified with nanoparticles, only a few studies have focused on predicting their rutting performance. Correct estimation and prediction of pavement rutting behavior as an effective approach of functional and environmental variables can prevent the production of asphalt with high rutting potential in the laboratory stage and before factory production. This research deals with modeling the synergistic effect of SBS and carbon nanotubes (CNT) in improving the rheological properties of bitumen's using artificial intelligence and statistical analysis. The rutting performance of bitumen's containing 0, 0.6 and 1.2% CNT and 3 and 6% SBS have been investigated separately and in combination using temperature sweep test, analysis of variance and regression and neural network (ANN) models. The results showed that the synergism of polymer and nanoparticles increases the rutting resistance and improves the rheological behavior of bitumen at high temperatures. The variance test showed that the increase of CNT to 1.2% has the greatest effect on improving the rutting resistance. Comparing the performance of prediction models showed that  $R^2$  for regression and ANN models is above 0.90. However, the ANN model performs better with a correlation coefficient of 0.976 and can be suggested as an effective tool in predicting the rheological behavior of nanocomposite-modified bitumen to prevent asphalt with high rutting potential in the pre-production stage.

**Keywords:** Rheological Characteristics, Artificial Neural Network, Multiple Regression, Nanocomposite, Modified Bitumen