

ارزیابی عملکردی مدل برگر و مدل پیشنهادی جدید بر پایه تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک در تخمین رفتار ویسکو-الاستیک بتن آسفالتی

سید محمد میرعبدالعظیمی، دانشجوی دکتری مهندسی عمران، رشته راه و ترابری، دانشگاه سمنان
غلامعلی شفافبخش*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: shafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۹۵/۱۱/۲۰ - پذیرش: ۹۶/۰۳/۰۱

چکیده

تحلیل روسازی راه‌ها و مواد تشکیل‌دهنده آنها همواره به دلیل شناخت بهتر رفتار آنان تحت شرایط متفاوت از اهمیت بالایی برخوردار بوده و باعث درک بهتر و در نتیجه طرح روابط دقیق‌تر می‌گردد. با توجه به گستره وسیع کاربرد مخلوط‌های آسفالت در دنیا، ارزیابی رفتارهای مختلف این مخلوط‌ها از جنبه‌های مختلف عملکردی و ایمنی از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد. با توجه به اینکه مخلوط‌های آسفالتی به طور ذاتی و به سبب قیر محتوی، نسبت به تغییرات دما بسیار حساس هستند، لذا شناسایی و بررسی رفتار ویسکو-الاستیک و ویسکو-الاستو پلاستیک این مخلوط‌ها و تعیین پارامترهای مؤثر بر این رفتار که بسیار وابسته به تغییرات دماست، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکردی مدل برگر و مدل پیشنهادی جدید بر پایه تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک در تخمین رفتار ویسکو-الاستیک بتن آسفالتی می‌باشد. برای این منظور، تعدادی آزمون خزش دینامیک تحت دماهای مختلف و سطوح متفاوت تنش انجام گردید. بر طبق نتایج به‌دست آمده، عملکرد مدل پیشنهادی بر پایه برنامه‌نویسی ژنتیک کاملاً رضایت‌بخش است. همچنین، مدل جدید ارائه شده، محققین بیشتری را که قصد انجام تحقیقات مشابه دارند، بدون نیاز به انجام آزمون‌های مخرب، یاری خواهد نمود.

واژه‌های کلیدی: خزش، مدل ویسکو-الاستیک، مخلوط آسفالتی، مدل برگر، برنامه‌نویسی ژنتیک

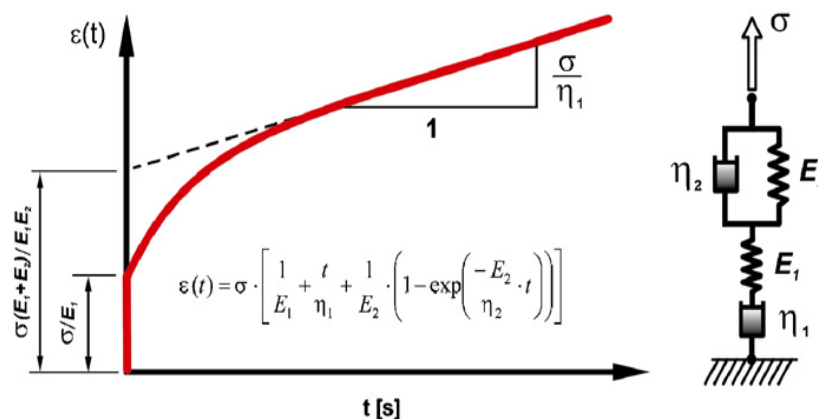
۱. مقدمه

تحلیل مکانیکی روسازی‌ها وابسته به دو فاکتور اساسی می‌باشد: ۱- روش توصیف مشخصات مصالح و دقت آن و ۲- دقت مدل‌های مکانیکی به منظور شبیه‌سازی واکنش‌های روسازی (سوسا و همکاران، ۱۹۹۱). مهمترین اقدامی که در این بخش صورت می‌گیرد کاربرد تئوری ویسکو-الاستیک برای مصالح آسفالتی می‌باشد که در طبیعت به این صورت رفتار می‌کنند و نه به صورت الاستیک خالص که در روش قبلی فرض اساسی بود. با وجود اینکه مفهوم ویسکو-الاستیک کاملاً قدیمی است، ولی کاربرد آن در طراحی و تحلیل روسازی‌ها هنوز به صورت جدی صورت نگرفته است. نخستین کاربرد آن ممکن است قبل از ۱۹۶۰ صورت

گرفته باشد. مدل برگر ترکیب مدل کلونین و ماکسول است که به صورت سری به هم متصل شده‌اند و تحت تنش ثابت قرار گرفته‌اند. بنابراین، داریم:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} (1 - \exp(-\frac{E_2}{\eta_2} t)) \right] \quad (1)$$

این مدل به خوبی رفتار مصالح ویسکو-الاستیک را نشان می‌دهد. کرنش کلی در این مدل شامل سه قسمت است: کرنش الاستیک ناگهانی^۱، کرنش ویسکوز^۲ و کرنش الاستیک تأخیری^۳. پارامترهای تابع خزش در مدل مکانیکی برگر در شکل ۱ مشخص گردیده‌اند.



شکل ۱. مدل مکانیکی برگر و پارامترهای تابع خزش در مدل برگر (عربانی و کامبوزیا، ۲۰۱۴)

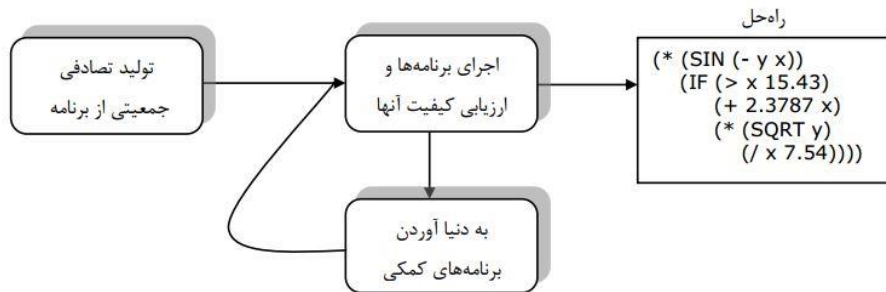
پیشنهادی جدید بر پایه تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک در تخمین رفتار ویسکو-الاستیک بتن آسفالتی می‌باشد. برنامه‌نویسی ژنتیک شاخه‌ای از الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد که مسائل را بدون نیاز به کاربر (که شکل یا ساختاری را در پیشروی راه‌حل مسئله تعیین می‌کند) حل می‌کند. تاریخچه برنامه‌نویسی ژنتیک به اوائل دهه ۱۹۹۰ میلادی بازمی‌گردد و از افرادی که بیشترین تلاش‌ها را برای پیشرفت این شاخه انجام داده‌اند می‌توان به جان کوزا اشاره کرد (کوزا، ۱۹۹۲).

مدل برگر برای اینکه رفتار ویسکو-الاستیک مواد حساس به حرارت را تخمین بزند کافی نیست. با در نظر گرفتن این مهم که مخلوط‌های آسفالتی به طور ذاتی و به سبب قیر محتوی، نسبت به تغییرات دما بسیار حساس هستند، لذا شناسایی و بررسی رفتار ویسکو-الاستیک و ویسکو-الاستو پلاستیک این مخلوط‌ها و تعیین پارامترهای مؤثر بر این رفتار که بسیار وابسته به تغییرات دماست، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد مدل برگر و مدل

1- Instantaneous elastic strain
2- Viscous strain
3- Retarded elastic strain

پیدا کردن راه‌حل‌ها استفاده شده است. برنامه‌نویسی ژنتیک، همانند طبیعت، یک فرایند تصادفی است و هرگز نمی‌تواند نتایج را تضمین کند. همچنین، برنامه‌نویسی ژنتیک موفقیت‌های زیادی در ارزیابی راه‌های نو و غیرمنتظره در حل مسائل دارد.

در برنامه‌نویسی ژنتیک، یک جمعیت از برنامه‌های کامپیوتری ایجاد می‌شود که نسل به نسل، به صورت تصادفی تبدیل به جمعیتی از برنامه‌های جدید و احتمالاً بهینه می‌شود. شکل ۲ روند کنترل برای برنامه‌نویسی ژنتیک را نشان می‌دهد که در آن انتخاب طبیعی برای



شکل ۲. روند کنترل برنامه‌نویسی ژنتیک

همکاران (۲۰۰۵) یک مدل ویسکو-الاستیک ترکیبی به منظور پیش‌بینی رفتار قیرهای درزگیر در دماهای کم ارائه گردید. آنها پی بردند که تغییر شکل‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در دماهای کمتر از ۲۸ OC تا ۴۰ OC با هم تطابق زیادی دارند. به منظور بررسی خرابی روسازی که به وسیله تاپرها ایجاد می‌شود، السیفی و همکاران (۲۰۰۵) از یک برنامه اجزای محدود به منظور پیش‌بینی واکنش‌های روسازی استفاده کردند. لی (۲۰۰۳) خصوصیات ویسکو-الاستیک مصالح را در یک مدل پیوسته به منظور پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی منظور نمود و یک مدل خستگی خیلی ساده‌تر ارائه داد. پیراباروبان و همکاران (۲۰۰۳) موفق به توسعه مدل خزشی ویسکو-الاستوپلاستیک شدند که وابستگی به زمان مخلوط‌های آسفالتی را به منظور بررسی پتانسیل شیارافتادگی و معرفی کردن فاکتورهایی که بر این عامل اثر می‌گذارند نشان می‌دهد. آنها پارامترهای مدل خزشی را از نتایج تست‌های آزمایشگاهی به دست آوردند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر دما و فرکانس بارگذاری را بر قابلیت برهمکنش

۲. مروری بر مطالعات پیشین

۲-۱. بررسی‌ها در زمینه رفتار ویسکو-الاستیک بتن

آسفالتی

سکتور و مونیسمیت (۱۹۶۱) تئوری ویسکو-الاستیک را به منظور پیش‌بینی رفتار نمونه‌های آسفالتی در آزمایش سه‌محوری استفاده کردند. در سال‌های اخیر، محققین تئوری ویسکو-الاستیک خطی را با موفقیت برای توصیف رفتار مصالح آسفالتی مورد استفاده قرار داده‌اند. السیفی و همکاران (۲۰۰۶) یک مطالعه مقایسه‌ای را بین مدل المان محدود الاستیک و مدل المان محدود ویسکو-الاستیک خطی صورت دادند و نتیجه گرفتند که استفاده از یک مدل ترکیبی ویسکو-الاستیک در روش‌های طراحی روسازی برای ثبت دقت‌های بیشتر امری ضروری است. نتیجه مهم دیگر آنها از این تحقیق آن بود که تئوری الاستیک مقاومت روسازی را بزرگتر محاسبه کرده که این محافظه‌کارانه نبوده و ممکن است سبب شکست پیش از موعد روسازی آسفالتی انعطاف‌پذیر گردد. در تحقیق دیگر السیفی و

تحلیل‌های دقیق‌تر از رفتارِ روسازی آسفالتی، این عوامل نیز دخیل گردند. تأثیر اعمال تنش و حرارت بر رفتار خزشی ماستیک‌های آسفالتی توسط یی و همکاران در سال ۲۰۰۹ تحقیق گردید. در پژوهش مذکور، ماستیک‌های ساخته شده با قیر AH-70 که حاوی ۶۴٪ مصالح ریزدانه بودند، تحت آزمون خزش فشاری تک‌محوره قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان داد که در بازه دمایی و سطوح تنش مورد مطالعه، مدل مذکور عملکرد مناسبی خواهد داشت (یی و همکاران، ۲۰۰۹). تأثیر همزمان فرکانس بارگذاری، دما و سطح تنش بر عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی در سال ۲۰۱۴، توسط الخطیب و گزلان مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، ۱۲۰ نمونه آسفالتی تهیه شده با قیر PG 64-10 و سنگدانه آهکی، تحت آزمون کشش غیرمستقیم خستگی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس بارگذاری بر عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی افزوده خواهد شد. همچنین دیده شد که نرخ افزایش عمرخستگی نسبت به فرکانس‌های بارگذاری نمایی است. ضمناً آشکار شد که برای آزمون خستگی در حالت کنترل تنش، با افزایش دما از عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی کاسته می‌شود.

۲-۲. مروری بر کاربرد محاسبات نرم در روسازی

در سال ۲۰۱۷، علوی و همکاران مدلی برای پیش‌بینی عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی در آزمون مارشال ارائه دادند. در این پژوهش، بر مبنای ۱۱۸ داده جمع‌آوری شده از آزمون خزش دینامیک تک‌محوره و با استفاده از روش برنامه‌نویسی ژنتیک چندژنه، فرمول‌بندی جدیدی جهت پیش‌بینی عدد روانی ارائه گردید. دیده شد که از

قیر و فیلر مطالعه نمودند. در این پژوهش، دو نوع قیر با درجه نفوذ ۹۰ و ۷۰ (طبق استاندارد چینی JTG F40-2004)، با درصدهای متفاوتی از فیلرهای گرانیت، دیاباز و سنگ آهک ترکیب گشته و سپس تحت آزمون‌های جاروب کرنشی، دمایی و فرکانسی قرار گرفتند. نتایج آشکار نمود که با افزایش دما و کاهش فرکانس بارگذاری، برهمکنش بین قیر و فیلرها بهبود یافته، لیکن تأثیر دما بیشتر از فرکانس بارگذاری خواهد بود. تغییر شکل‌های شیارشدگی روسازی آسفالتی تحت بارگذاری سیکلیک، توسط یانگ (۲۰۱۴) تحلیل و بررسی شد. در این مطالعه، دو مدل رفتاری ویسکو-الاستوپلاستیک و برگر به کمک نرم‌افزار المان محدود ANSYS برای بتن آسفالتی در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتیجه گرفته شد که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری بر اهمیت و تأثیرات پاسخ‌های مدل ویسکو-الاستوپلاستیک افزوده شده و از این رو بایستی در تحلیل پدیده شیارشدگی آسفالت، از مدل ویسکو-الاستوپلاستیک بهره گرفته شود. سوزا و کاسترو (۲۰۱۲) به بررسی تأثیر همزمان تنش‌های حرارتی و مکانیکی بر روسازی‌های آسفالتی پرداختند. در پژوهش مذکور، چهار مدل المان محدود: الف- بدون اثرات بارگذاری حرارتی، ب- تنها با در نظرگیری اثرات انقباضی/انبساطی دما، ج- تنها با لحاظ نمودن تأثیرات حرارت بر خصوصیات ویسکو-الاستیک و د- با در نظرگیری هر دو اثر انقباضی/انبساطی و رفتار ویسکو-الاستیک، شبیه‌سازی گردیدند. بررسی خروجی‌های مدل‌سازی آشکار کرد که تأثیرات حرارتی (انقباضی/انبساطی و تغییرات رئولوژیک) بر روسازی‌های تحت بارگذاری ترافیکی، چه به صورت منفرد و چه به صورت توأمان، چشم‌گیر بوده و بایستی برای

بین عوامل دخیل در پیش‌بینی عدد روانی، میزان فیلر و مصالح‌سنگی درشت‌دانه، بیشترین تأثیرگذاری را در پاسخ نهایی خواهند داشت. کارلافتیس و بدر (۲۰۱۵) مدلی جهت پیش‌بینی شروع ترک‌خوردگی‌های پوست سوسماری طراحی نمودند. این مدل به روش شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک تهیه گردید. نتایج نشان داد که مدل از دقت مناسبی برای پیش‌بینی احتمال شروع ترک‌خوردگی‌ها برخوردار است. در سال ۲۰۱۷، سولازو و همکاران، مدلی برای مرتبط ساختن ناهمواری‌های روسازی با عملکرد سازه‌ای آن ارائه نمودند. بدین منظور، شبکه عصبی مصنوعی از نوع پیش‌خور چندلایه با استفاده از الگوریتم لوبرگ-مرکوات آموزش داده شد. بررسی‌ها حاکی از دقت مناسب این مدل به منظور پیش‌بینی عملکرد سازه‌ای روسازی، بر مبنای داده‌های ناهمواری‌سنجی بود. الگوریتم‌های ژنتیک و روش منحنی‌انتقال با هدف پیش‌بینی مدول عکس‌العمل بستر روسازی‌ها، در سال ۲۰۱۰ توسط کُیری و همکاران مورد استفاده واقع شدند. در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک، به منظور انتقال افقی منحنی تنش انحرافی به مدول عکس‌العمل، برای تنش‌های همه‌جانبه متفاوت، در نرم‌افزار فرترن توسعه داده شد. روش نوین ارائه شده، به‌عنوان یک روش جایگزین برای مدل‌های سنتی شناخته گردید. در سال ۲۰۱۰، گیالاکریشان و همکاران برنامه‌نویسی ژنتیک را برای پیش‌بینی مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار دادند. در مطالعه مذکور، به‌کمک جعبه ابزار موجود در نرم‌افزار متلب و بر مبنای ۷۴۰۰ داده جمع‌آوری شده از ۳۴۶ مخلوط مختلف آسفالتی، مدلی برای پیش‌بینی مدول دینامیک آسفالت تهیه شد. نتایج نشان داد که اگرچه مدل پیشنهاد شده در این پژوهش، دقت مناسب‌تری را نسبت به مدل‌های رگرسیونی سنتی ارائه

می‌دهد، اما دقت مدل‌های مشابه تهیه شده به روش شبکه عصبی مصنوعی، بیشتر از مدل ارائه شده می‌باشد. تاپکین و همکاران (۲۰۱۳) تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک را برای پیش‌بینی شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده قرار دادند. مشخص گردید که مدل ارائه شده بر مبنای برنامه‌نویسی ژنتیک، دقت مناسبی را برای پیش‌بینی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی تحت مطالعه این پژوهش ارائه می‌دهد. مزاری و نیازی در سال ۲۰۱۵، تأثیر به‌کارگیری فیلرها را بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک، مدل‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که مدل‌های ایجاد شده برای پیش‌بینی پایداری مارشال نمونه‌های آسفالتی، دقت مناسبی دارند. در سال ۲۰۱۳، ترزی و همکاران، مدلی برای پیش‌بینی میزان پایداری مارشال مخلوط‌های آسفالتی تقویت شده با الیاف فولاد توسعه دادند. در این پژوهش، به کمک مدلی بر پایه برنامه‌نویسی ژنتیک، تأثیر میزان قیر، درصد الیاف فولادی و وزن مخصوص نمونه‌های آسفالتی بر پایداری مارشال نمونه‌های مذکور، ارزیابی گردید. مشخص گردید که مدل ارائه شده از پتانسیل بالایی برای بهره‌گیری به‌عنوان ابزار پیش‌بینی-کننده پایداری مارشال مخلوط‌های آسفالتی برخوردار است.

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱-۱. مصالح مصرفی

دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش حد وسط دانه‌بندی پیوسته مخلوط آسفالت گرم مربوط به قشر رویه مطابق با آیین‌نامه آشتو است (آشتو،

ارزیابی عملکردی مدل برگر و مدل پیشنهادی جدید بر پایه تکنیک برنامه نویسی ژنتیک در تخمین رفتار ویسکو-الاستیک بتن آسفالتی

۱۹۹۳). حدود این دانه بندی در جدول ۱ ارائه شده است. دو نوع قیر مصرفی، محصول پالایشگاه اصفهان هستند که مشخصات آنها در جدول ۲ درج گردیده است.

جدول ۱. دانه بندی پیوسته مخلوط آسفالت گرم مربوط به قشر رویه

اندازه الک	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶ میلی متر (شماره ۸)	۰/۳ میلی متر (شماره ۵۰)	۰/۰۷۵ میلی متر (شماره ۲۰۰)
درصد رد شده	-	۱۰۰	۹۵	-	۵۹	۴۳	۱۳	۶

جدول ۲. مشخصات قیر به کار رفته در ساخت نمونه ها

درجه نفوذ	نقطه نرمی	شکل پذیری	درجه اشتعال	نوع قیر
۰/۱ mm	(°C)	(cm)	(°C)	
۶۶	۵۱	۱۱۲	۲۶۲	۶۰-۷۰
۹۲	۴۸	۱۰۶	۲۳۵	۸۵-۱۰۰

۳-۱-۲. تعداد و نوع آزمایش های انجام شده

تعداد و جزئیات آزمایش های دینامیک صورت گرفته در این پژوهش در جدول ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳. تعداد و نوع آزمایش های دینامیک انجام شده

نوع آزمایش	سطوح تنش اعمالی	سطوح دمای آزمایش	فضای خالی بتن آسفالتی	تکرار ساخت جهت ملاحظات خطا	نوع مصالح سنگی	نوع قیر
خزش	۱۰۰ kPa	۵۰ °C	۳	۳ نمونه	سیلیسی	۶۰-۷۰
دینامیک	۲۰۰ kPa ۳۰۰ kPa	۶۰ °C	۵ ۷		آهکی	۸۵-۱۰۰

۳-۱-۳. روش ساخت نمونه ها

خزش دینامیک، تمامی مراحل سه گانه خزش در آزمایش ها پوشش داده می شود و نمونه ها وارد فاز ویسکو-الاستو پلاستیک می شوند. اما در آموزش مدل تنها از پارامترهای ویسکو-الاستیک بتن آسفالتی همچون E_1 ، E_2 ، η_1 و η_2 که از دو فاز اول نمودار خزش قابل تحصیل هستند، استفاده می شود.

پس از تعیین قیر بهینه مربوط به هر یک از مخلوط های آسفالتی با جنس مصالح و نوع قیر متفاوت، اقدام به ساخت نمونه های آسفالتی شامل دو نوع قیر، دو جنس از مصالح سنگی و سه سطح درصد فضای خالی متفاوت گردیده است. لازم به توضیح است که با توجه به محدوده تغییرات مقادیر دما و تنش اعمالی در آزمون

۳-۱-۴. آزمایش خزش دینامیک

در این تحقیق، آزمون خزش دینامیک بر طبق استاندارد British: DD226 و به وسیله دستگاه UTM انجام شده است. نکته مهم در مورد این آزمایش این است که از مقادیر تغییر مکان تجمعی حاصل نمی‌توان به عنوان عمق شیار استناد کرد و در واقع این آزمایش برای مقایسه بین انواع مختلف نمونه آسفالتی کاربرد دارد. دلیل این امر این است که مخلوط آسفالتی از شرایط مهار جانبی که در حالت واقعیت از آن برخوردار است، بهره نمی‌برد و بنابراین تغییر مکان بیشتری در مقابل اعمال بار از خود نشان می‌دهد. به طور کلی، دستگاه UTM دارای چندین بخش با عملکردهای مختلف می‌باشد. این دستگاه بر اساس پارامترهای مکانیکی و سازه‌ای با قابلیت پیش‌بینی عملکرد میدانی روسازی دارای سامانه بارگذاری با هوای فشرده است و قابلیت اعمال انواع بار مانند سینوسی و مستطیلی را دارد.

۳-۲. مطالعات تحلیلی

۳-۲-۱. نرم‌افزار مورد استفاده

از نرم‌افزار Matlab جهت تحلیل و آنالیز نتایج آزمایشگاهی به دست آمده و ارزیابی آنها استفاده خواهد شد. همچنین، تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک بر پایه داده‌های آزمایشگاهی در نهایت جهت آموزش مدل آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تخمین اولیه صحیح از پارامترهای ویسکو-الاستیک در نمودار خزش، ابتدا با استفاده از روابط ریاضی، پارامترهای مجهول در مدل خزش استخراج می‌شوند. با تخمین اولیه پارامترهای مجهول، با استفاده از برازش غیر خطی بر اساس تکنیک کمترین مربعات در ابزار CFTool در Matlab پارامترهای مجهول به صورت دقیق‌تر بهینه می‌شوند (عربانی و کامبوزیا، ۲۰۱۴)

۳-۲-۲. نحوه مدل‌سازی در الگوریتم ژنتیک

هدف از اجرای برنامه‌ریزی ژنتیک در پژوهش حاضر، تولید خودکار یک مدل ریاضی است که رفتار ویسکو-الاستیک رویه‌های بتن آسفالتی راه‌ها را تخمین بزند. در اجرای برنامه‌ریزی ژنتیک، ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش و ۳۰٪ برای تست در نظر گرفته شده است. همچنین، داده‌های مربوط به هر قسمت به صورت تصادفی از بین تمامی نتایج انتخاب شده است. مراحل کلی برنامه‌نویسی ژنتیک در زیر آمده است:

- ۱- تولید یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی با استفاده از ترکیب توابع و پایانه‌های مسئله شبیه دیگر الگوریتم‌های تصادفی، در برنامه‌نویسی ژنتیک نیز اشخاص جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شوند. روش‌های متفاوتی برای تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی وجود دارد. از ساده‌ترین روش‌ها می‌توان به روش‌های کامل، رشد کردن و ترکیبی از این دو با نام نصف به نصف اشاره کرد.
- ۲- اجرای هر یک از برنامه‌های جمعیت و نسبت دادن یک مقدار برازندگی به آنها

بعد از راه‌اندازی جمعیت، تعدادی از اشخاص جمعیت به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. آنها با دیگری مقایسه می‌شوند تا بهترین آنها از نظر برازندگی به عنوان والد برای انجام عملیات بازترکیبی و جهش انتخاب شود. چندین روش انتخاب وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های زیر اشاره کرد: ۱- روش چرخ رولت، ۲- روش رتبه بندی و ۳- روش مسابقه. ۳- ساختن برنامه‌های کامپیوتری جدید، با نام فرزند^۱ الف) کپی کردن بهترین برنامه موجود، با نام تکثیر ب) ساختن یک برنامه جدید به وسیله جهش ج) ساختن یک برنامه جدید به وسیله بازترکیبی ۴- بهترین برنامه کامپیوتری به دست آمده در هر نسل، بهترین تا اینجا، به عنوان نتیجه اجرای برنامه‌نویسی ژنتیک نشان داده می‌شود.

^۱ - Offspring

ارزیابی عملکردی مدل برگر و مدل پیشنهادی جدید بر پایه تکنیک برنامه نویسی ژنتیک در تخمین رفتار ویسکو-الاستیک بتن آسفالتی

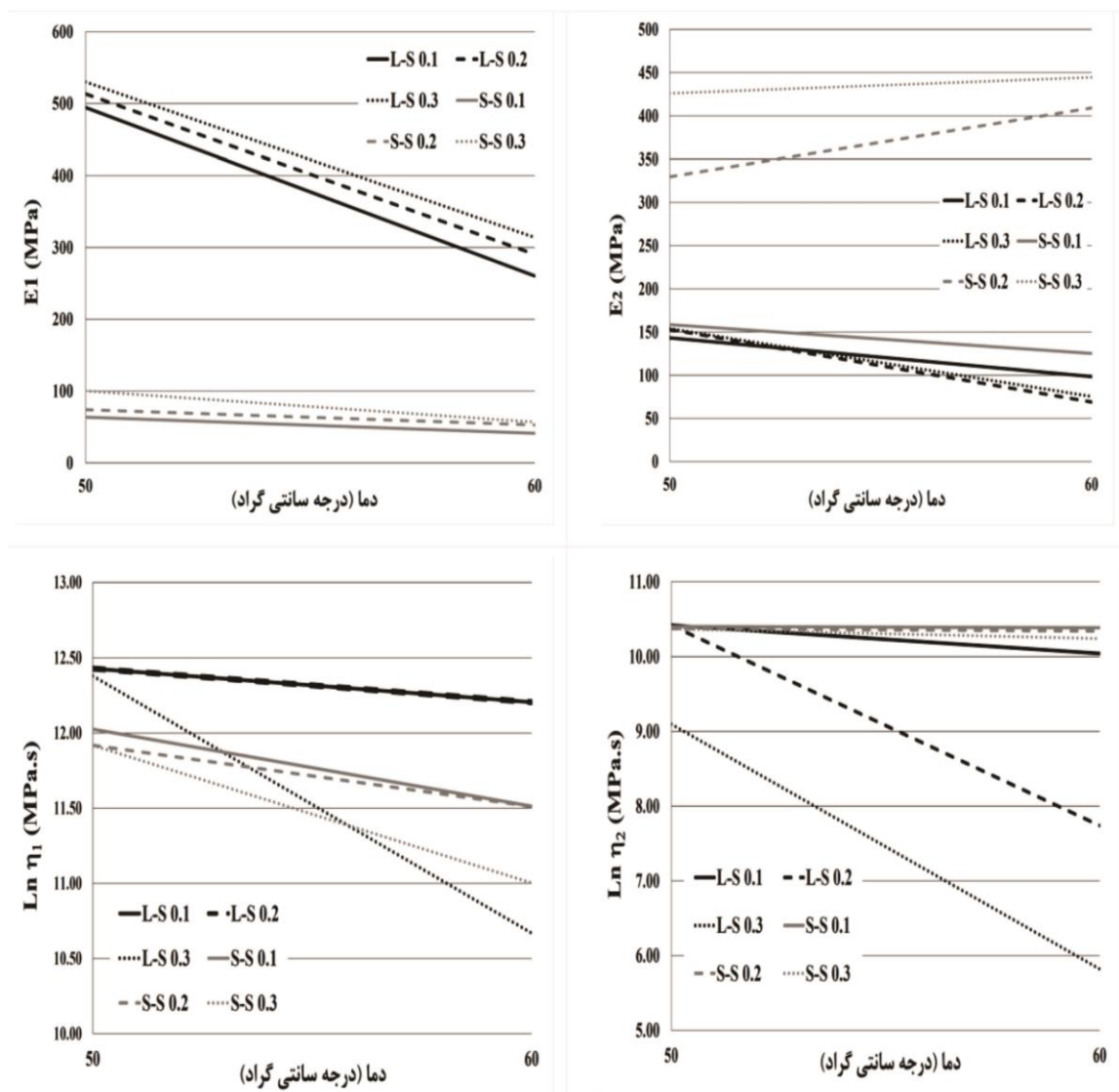
۴. نتایج و بحث

۴-۱. نتایج آزمایشگاهی

با توجه به نتایج به دست آمده در آزمایش مارشال، درصد قیر بهینه در نمونه‌های بتن آسفالتی در جدول ۴ درج شده است. در شکل ۳ به عنوان نمونه، نمودار تغییرات پارامترهای ویسکو-الاستیک نمونه‌های آسفالتی حاوی ۳٪ فضای خالی بتن آسفالتی که در

ساخت آنها از قیر خالص ۶۰-۷۰ استفاده شده، ارائه گردیده است.

همانگونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیسی، حساسیت حرارتی بیشتری در مقایسه با نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی از خود نشان می‌دهند. این امر با توجه به مدول الاستیسیته اولیه بالاتر در نمونه‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی کاملاً مشهود است.



شکل ۳. تغییرات پارامترهای ویسکو-الاستیک نمونه‌های آسفالتی حاوی ۳٪ فضای خالی و ساخته شده با قیر خالص ۶۰-۷۰

جدول ۴. مقدار قیر بهینه در نمونه‌های آسفالتی با مصالح آهکی و سیلیسی و قیر ۱۰۰-۸۵ و ۷۰-۶۰

ردیف	نوع قیر	نوع مصالح	درصد قیر بهینه
۱	۶۰-۷۰	آهکی	۵/۵
۲	۸۵-۱۰۰	آهکی	۵/۵
۳	۶۰-۷۰	سیلیسی	۵
۴	۸۵-۱۰۰	سیلیسی	۵

RMSE=b.fitness;
if RMSE<=0.001

مدل ریاضی پیشنهادی بر اساس الگوریتم برنامه‌نویسی ژنتیک طبق رابطه (۲) مشخص می‌شود. همانگونه که در مدل ریاضی دیده می‌شود، برنامه‌نویسی ژنتیک از میان تمامی توابع موجود در جعبه ابزار نرم‌افزار Matlab از توابع جمع، تفریق، ضرب، تقسیم و لگاریتم استفاده کرده است. در جدول ۵، نام اصلی متغیرهای استفاده شده در مدل پیشنهادی آورده شده است

۲-۴. خروجی مدل برنامه‌نویسی ژنتیک

بخشی از کد نوشته شده بر اساس الگوریتم برنامه‌نویسی ژنتیک در زیر درج شده است.

```
p.operatorprobstyp='variable';
p.minprob=0.2;
p.datafile='x.txt';
p.datafile='y.txt';
p.calcdiversity={'uniquegen'};
p.calccomplexity=1;
p.depthnodes='2';
p.reproduction=0.3;
p=setterminals(p,'rand');
c=1;
while c
    [v,b]=gplab(200,50,p);
    javab=b.str;
```

$$Y1 = \ln \left[\left[\left[\left[\left[\ln|x5| - \ln |[(x5x7 - x4(x6 - x1))] \times x7 \times \ln|x3|| \times \frac{\ln|x5|}{x3 \times x2} + \frac{x7}{x5} + \frac{x2}{x1 \times \ln \left| \frac{x7^2}{x4} \right|} \right] \right] \right] \right] \times x4 \right] \times x4x7 \right] \times \frac{\ln|x7|}{x3} + \frac{x2}{x1 \times \ln \left| \frac{x3}{x7} \right|} + \frac{x2}{x4} \quad (2)$$

جدول ۵. نام اصلی متغیرهای استفاده شده در مدل پیشنهادی

X7	X6	X5	X4	X3	X2	X1	نام متغیر در مدل پیشنهادی
t(s)	$\eta_2(MPa)$	$E_2(MPa)$	$E_1(MPa)$	$\eta_1(MPa)$	$\sigma(MPa)$	T (°C)	نام اصلی متغیر

Proposed Model

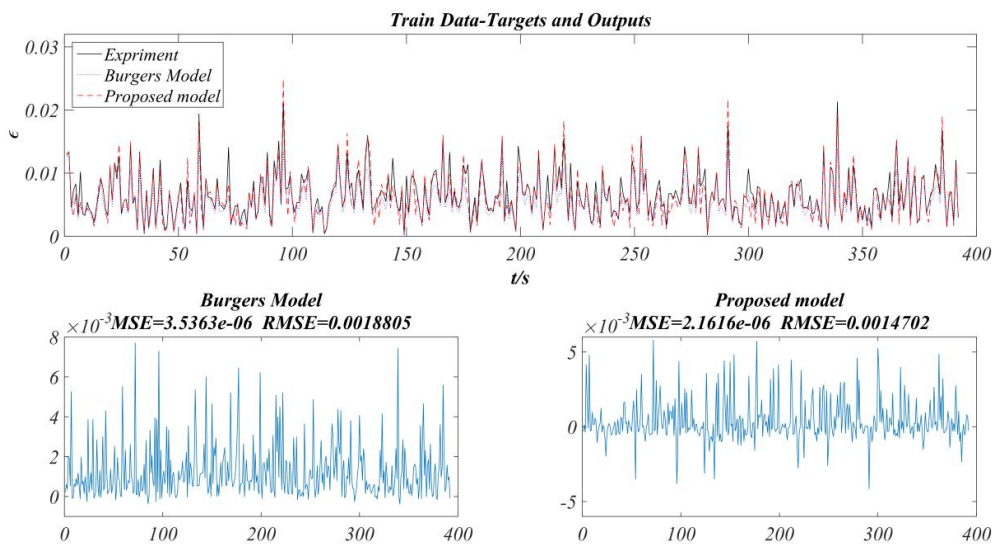
$$= \begin{cases} Y1, & t > 0 \\ Y2, & t = 0 \end{cases} \quad (4)$$

در شکل ۴، نتایج مربوط به داده‌های آموزش برای مدل ریاضی استخراج شده (مدل پیشنهادی) و مدل برگر آورده شده است. تعداد داده‌های آموزش ۳۹۲ داده می‌باشد که به صورت تصادفی از بین ۵۶۰ داده انتخاب شده‌اند. در جدول ۶، نتایج مربوط به معیارهای MSE و RMSE در بخش آموزش برای مدل پیشنهادی و مدل برگر آورده شده است.

با توجه به شروطی که در برنامه‌نویسی ژنتیک برای تقسیم بر صفر در نظر گرفته شده است، مقدار تابع در $t = 0$ طبق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$Y2 = \frac{x2}{x1 \times \ln|x3| + \frac{x2}{x4}} \quad (3)$$

با توجه به روابط (۲) و (۳)، مدل پیشنهادی طبق رابطه (۴) نوشته می‌شود:



شکل ۴. نتایج مربوط به داده‌های آموزش برای مدل ریاضی پیشنهادی و مدل برگر

جدول ۶. نتایج مربوط به معیارهای MSE و RMSE در بخش آموزش برای مدل پیشنهادی و مدل برگر

RMSE	MSE	مدل
۰/۰۰۱۹	$3/53 \times 10^{-6}$	برگر
۰/۰۰۱۴	$2/16 \times 10^{-6}$	پیشنهادی

مربوط به داده‌های تست برای مدل پیشنهادی و مدل برگر آورده شده است.

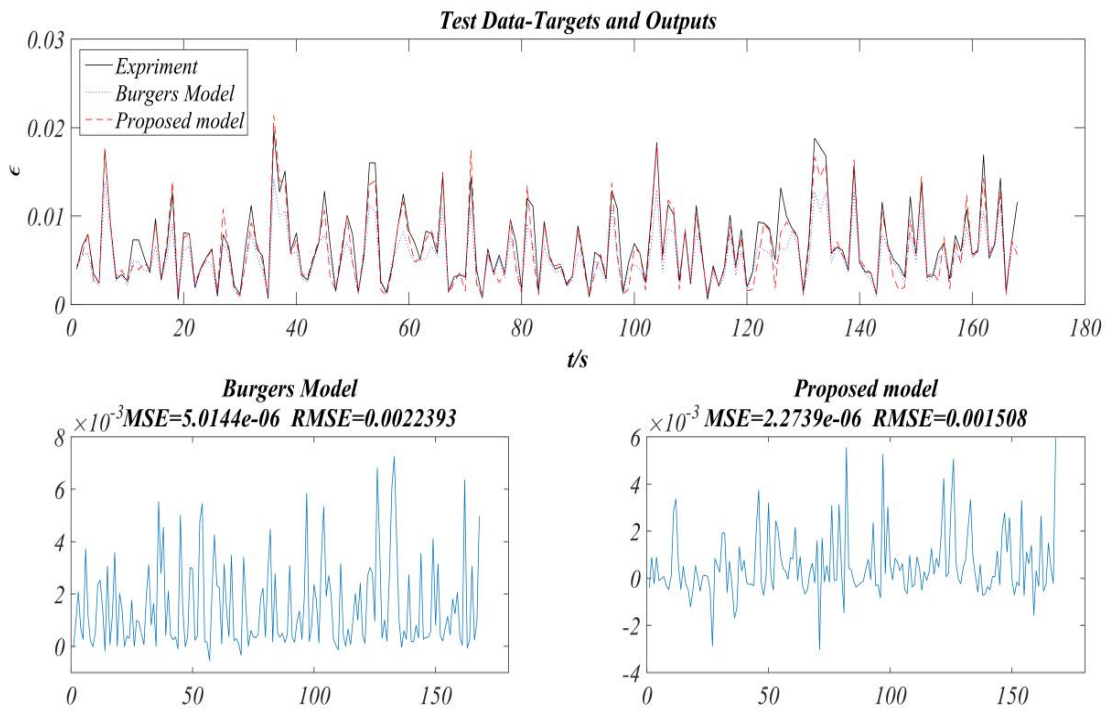
در شکل ۵، به عنوان نمونه، نتایج مربوط به مقایسه مدل پیشنهادی و مدل برگر برای نمونه آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیسی و قیر ۷۰-۶۰ و حاوی ۳٪

در شکل ۵، نتایج مربوط به داده‌های تست برای مدل ریاضی مدل پیشنهادی و مدل برگر آورده شده است. تعداد داده‌های تست ۱۶۸ داده می‌باشد که به صورت تصادفی از بین ۵۶۰ داده انتخاب شده است. در جدول ۷، نتایج مربوط به معیارهای MSE و RMSE

با مصالح سیلیسی، حدود ۹۲٪ از این نمونه‌ها همبستگی بیشتری را با مدل پیشنهادی از خود نشان می‌دهند. نکته جالب‌تر اینکه تنها در ۴٪ جامعه آماری مذکور، نمونه ساخته شده با قیر ۱۰۰-۸۵ همبستگی بیشتری را با مدل برگر از خود نشان می‌دهد. به بیان دیگر، با افزایش حساسیت نمونه‌های آسفالتی نسبت به حرارت، از مصالح آهکی به سمت مصالح سیلیسی و از قیر ۷۰-۶۰ به سمت قیر ۱۰۰-۸۵، مدل پیشنهادی عملکرد بهتری را در مقایسه با مدل برگر از خود بروز می‌دهد.

فضای خالی در دماهای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس آورده شده است.

در جدول ۸، نتایج معیارهای MSE و RMSE در ۲۴ نمونه مختلف برای مدل پیشنهادی و مدل برگر آورده شده است. بر اساس نتایج مندرج در جدول ۸ مشاهده می‌شود که در ۷۵٪ جامعه آماری، مدل پیشنهادی درصد خطای کمتری را در مقایسه با مدل برگر از خود بروز داده است. از طرفی، مشاهده می‌شود که با توجه به حساسیت حرارتی بیشتر نمونه‌های آسفالتی ساخته شده

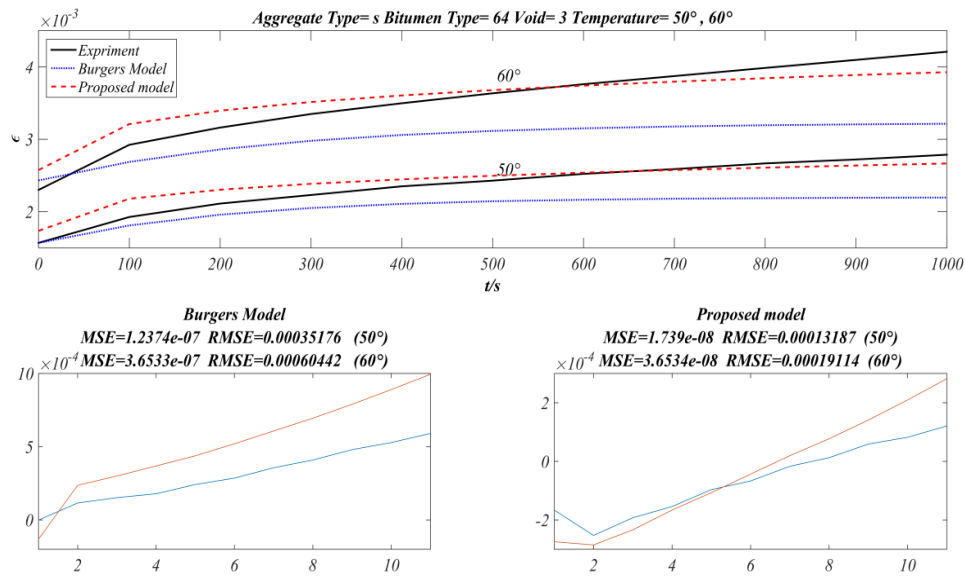


شکل ۵. نتایج مربوط به داده‌های تست برای مدل ریاضی پیشنهادی و مدل برگر

جدول ۷. نتایج مربوط به معیارهای MSE و RMSE در بخش تست برای مدل پیشنهادی و مدل برگر در بخش تست

RMSE	MSE	مدل
۰/۰۰۲۲	$۵/۰۱ \times ۱۰^{-۶}$	برگر
۰/۰۰۱۵	$۲/۲۷ \times ۱۰^{-۶}$	پیشنهادی

ارزیابی عملکردی مدل برگر و مدل پیشنهادی جدید بر پایه تکنیک برنامه نویسی ژنتیک در تخمین رفتار ویسکو-الاستیک بتن آسفالتی



شکل ۶. مقایسه مدل پیشنهادی و مدل برگر برای نمونه آسفالتی با مصالح سیلیسی و قیر ۷۰-۶۰ و حاوی ۳٪ فضای خالی

جدول ۸. نتایج معیارهای MSE و RMSE در نمونه‌های مختلف برای مدل پیشنهادی و مدل برگر

مدل پیشنهادی		مدل برگر		دما (°C)	درصد فضای خالی بتن آسفالتی	نوع قیر	جنس مصالح
RMSE	MSE	RMSE	MSE				
0.000132	1.74E-8	0.000352	1.24E-7	۵۰	۳	۶۰-۷۰	سیلیسی
0.000191	3.65E-8	0.000604	3.65E-7	۶۰	۳	۶۰-۷۰	سیلیسی
0.000184	3.37E-8	0.000523	2.74E-7	۵۰	۵	۶۰-۷۰	سیلیسی
0.000431	1.86E-7	0.001191	1.42E-6	۶۰	۵	۶۰-۷۰	سیلیسی
0.000267	7.11E-8	0.000763	5.83E-7	۵۰	۷	۶۰-۷۰	سیلیسی
0.000868	7.54E-7	0.000727	5.29E-7	۶۰	۷	۶۰-۷۰	سیلیسی
0.00065	4.22E-7	0.00174	3.03E-6	۵۰	۳	۸۵-۱۰۰	سیلیسی
0.00071	5.04E-7	0.002378	5.66E-6	۶۰	۳	۸۵-۱۰۰	سیلیسی
0.000426	1.81E-7	0.00202	4.08E-6	۵۰	۵	۸۵-۱۰۰	سیلیسی
0.000774	5.99E-7	0.001951	3.81E-6	۶۰	۵	۸۵-۱۰۰	سیلیسی
0.001363	1.86E-6	0.001772	3.14E-6	۵۰	۷	۸۵-۱۰۰	سیلیسی
0.002605	6.79E-6	0.002744	7.53E-6	۶۰	۷	۸۵-۱۰۰	سیلیسی
0.000112	1.25E-8	0.000239	5.70E-8	۵۰	۳	۶۰-۷۰	آهکی
0.000303	9.17E-8	0.000299	8.92E-8	۶۰	۳	۶۰-۷۰	آهکی
0.00043	1.85E-7	0.000229	5.27E-8	۵۰	۵	۶۰-۷۰	آهکی

0.000687	4.72E-7	0.000448	2.01E-7	۶۰	۵	۶۰-۷۰	آهکی
0.000854	7.29E-7	0.00027	7.30E-8	۵۰	۷	۶۰-۷۰	آهکی
0.000422	1.78E-7	0.001056	1.12E-6	۶۰	۷	۶۰-۷۰	آهکی
0.00018	3.23E-8	0.000435	1.89E-7	۵۰	۳	۸۵-۱۰۰	آهکی
0.00056	3.13E-7	0.000591	3.49E-7	۶۰	۳	۸۵-۱۰۰	آهکی
0.000214	4.59E-8	0.000591	3.49E-7	۵۰	۵	۸۵-۱۰۰	آهکی
0.000602	3.63E-7	0.001797	3.23E-6	۶۰	۵	۸۵-۱۰۰	آهکی
0.000332	1.10E-7	0.00111	1.23E-6	۵۰	۷	۸۵-۱۰۰	آهکی
0.002855	8.15E-6	0.001861	3.46E-6	۶۰	۷	۸۵-۱۰۰	آهکی

۵. نتیجه گیری

- با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می شود که با توجه به حساسیت حرارتی بیشتر نمونه های آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیسی، حدود ۹۲٪ از این نمونه ها همبستگی بیشتری را با مدل پیشنهادی از خود نشان می دهند.
- تنها در ۴٪ جامعه آماری این پژوهش، نمونه های ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰ همبستگی بیشتری را با مدل برگر از خود نشان دادند.
- با افزایش حساسیت نمونه های آسفالتی نسبت به حرارت، از مصالح آهکی به سمت مصالح سیلیسی و از قیر ۶۰-۷۰ به سمت قیر ۸۵-۱۰۰ مدل پیشنهادی عملکرد بهتری را در مقایسه با مدل برگر از خود بروز می دهد.

هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکردی مدل برگر و مدل پیشنهادی جدید بر پایه تکنیک برنامه نویسی ژنتیک در تخمین رفتار ویسکو-الاستیک بتن آسفالتی می باشد. بدین منظور، با انجام آزمون های مختلف دینامیک روی مخلوط های بتن آسفالتی، رفتار ویسکو-الاستیک این مخلوط ها مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت و در نهایت بر پایه مطالعات آزمایشگاهی و با تحلیل نتایج و مدل نویسی نرم افزاری، مدل پیشنهادی رفتار ویسکو-الاستیک مخلوط های بتن آسفالتی ارائه گردید. مهمترین نتایج تحقیق عبارتند از:

- بر اساس نتایج تحقیق، مشاهده می شود که در ۷۵٪ جامعه آماری، مدل پیشنهادی درصد خطای کمتری را در مقایسه با مدل برگر از خود بروز داده است.

۶. مراجع

- AASHTO. 1993. Guide for Design of Pavement Structures.
- Alavi, A. H., Hasni, H., Zaabar, I. and Lajnef, M. N. 2017. "A new approach for modeling of flow number of asphalt mixtures". Arch. Civ. Mech. Eng., 17: 326-335.
- Al-Khateeb, G. G. and Ghuzlan, Kh. A. 2014. "The combined effect of loading frequency, temperature, and stress level on the fatigue life of asphalt paving mixtures using the IDT test configuration". Int. J. Fatigue, 59: 254-261.
- Arabani, M. and Kamboozia, N. 2014. "New achievements in visco-elastoplastic constitutive model and temperature sensitivity of glasphalt. Int. J. Pavement Eng., 15(9): 810-830.
- Coleri, E., Guler, M., Gungor, A. G. and Harvey, J. T. 2010. "Prediction of subgrade resilient modulus using genetic algorithm and curve-shifting methodology". J. Transp. Res. Board, DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/2170-08>.

- Elseifi, M. A., Al-Qadi, I. L., Yoo, P. J. and Janajreh, I. 2005. "Quantification of pavement damage caused by dual and wide-base tires". *J. Transp. Res. Board*, 1940: 125-135.
- Elseifi, M. A., Al-Qadi, I. L. and Yoo, P. J. 2006. "Viscoelastic modeling and field validation of flexible pavements". *ASCE, J. Eng. Mech.*, 132(2): 172-178.
- Gopalakrishnan, K., Kim, S., Ceylan, H. and Khaitan, S. K. 2010. "Natural selection of asphalt mix stiffness predictive models with genetic programming". *Civil, Construction and Environmental Engineering Conference Presentations and Proceedings*, Paper 17.
- Karlaftis, A. G. and Badr, A. 2015. "Predicting asphalt pavement crack initiation following rehabilitation treatments". *Transp. Res. Part C: Emerg. Tech.*, 55: 510-517.
- Koza, J. R. 1992. "Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection". *The MIT Press, Cambridge, Massachusetts*.
- Lee, S. 2003. "Long-term performance assessment of asphalt concrete pavements using the third scale model mobile loading simulator and fiber reinforced asphalt concrete". *PhD Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, North Carolina State University*.
- Mazari, M. and Niazi, Y. 2015. "Modeling the effect of filler materials on performance of hot mix asphalt using genetic programming". *Airfield and Highway Pavements*.
- Pirabaroban, S., Zaman, M. and Tarefder, R. A. 2003. "Evaluation of rutting potential in asphalt mixes using finite element modeling". *The Transportation Factor 2003, Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada*.
- Sector, K. E. and Monismith, C. L. 1961. "Analysis of triaxial test data on asphalt concrete using viscoelastic principles". *Highway Research Board Proceedings*, 40: 295-314.
- Sollazzo, G., Fwa, T. F. and Bosurgi, G. 2017. "An ANN model to correlate roughness and structural performance in asphalt pavements". *J. Constr. Build. Mater.*, 134: 684-693.
- Sousa, J. B., Craus, J. and Monismith, C. L. 1991. "Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete". *SHRP-A/IR-91-104, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C.*
- Souza, F. V. and Castro, L. S. 2012. "Effect of temperature on the mechanical response of thermo-viscoelastic asphalt pavements". *J. Constr. Build. Mater.*, 30: 574-582.
- Tapkın, S., Çevik, A., Uşar, U. and Gülşan, E. 2013. "Rutting prediction of asphalt mixtures modified by polypropylene fibers via repeated creep testing by utilising genetic programming". *Mater. Res.*, 16(2): 277-292.
- Terzi, S., Saltan, M., Morova, N. and Serin, S. 2013. "Modeling Marshall stability of steel fiber reinforced asphalt concrete by genetic expression programming". *2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, 23-25 May 2013, Epoka University, Tirana, Albania*.
- Yang, P. 2014. "Rutting deformations analysis for asphalt pavement based on the visco-elastoplastic theory". *J. Adv. Mater. Res.*, 838-841: 1227-1233.
- Ye, Y., Yang, x., Chen, Ch., 2009, "Experimental researches on visco-elastoplastic constitutive model of asphalt mastic". *J. Constr. Build. Mater.*, 23: 3161-3165.
- Zhang, J., Liu, G., Hu, Zh., Zhu, C., Pei, J. and Jin, L. 2016. "Effects of temperature and loading frequency on asphalt and filler interaction ability". *J. Constr. Build. Mater.*, 124: 1028-1037.