



## ارزیابی اثر افزودنی دوگانه پودر لاستیک و PET به صورت عددی و آزمایشگاهی در مخلوط آسفالتی گرم

امیرحسین عامری<sup>۱</sup>، محمود عامری<sup>۲\*</sup>، حمید شاکر<sup>۱</sup>، فائزه جعفری<sup>۲</sup>، بیت الله بدرلو<sup>۳</sup>

۱-دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲-دانشکده عمران، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۳-دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵

### کلمات کلیدی:

پودر لاستیک

پلی اتیلن ترفتالات

مخلوط آسفالتی

شبکه عصبی

تخمین داده‌های آزمایشگاهی

**خلاصه:** استفاده از دو ماده پلی اتیلن ترفتالات (PET) و پودر لاستیک (CR) به صورت هم‌زمان در مخلوط‌های آسفالتی به دلیل بهره بردن هم‌زمان از خاصیت نرم شدگی پودر لاستیک و سخت شدگی پلی اتیلن ترفتالات، می‌تواند منجر به حذف این دو ماه از طبیعت و ساخت مخلوط آسفالتی مقاوم‌تر با بهره‌مندی حداکثری از دو افزودنی CR و PET گردد. بدین منظور، درصدهایی از دو افزودنی با مقادیر (۰ و ۱۰۰)٪، (۲۵ و ۷۵)٪، (۵۰ و ۵۰)٪، (۷۵ و ۲۵)٪ و (۱۰۰ و ۰)٪ با هم ترکیب شده و افزودنی را شکل داده اند که در دو درصد ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی قیر به مخلوط اضافه شده‌اند، برای بررسی مخلوط‌های اصلاح شده، از آزمایش‌های مدول برجهندگی، خزش دینامیکی، حساسیت رطوبتی و ITS استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داده است که ماده‌ی معرفی شده دارای مشخصات مطلوب بوده است، به طوری که استفاده از دو افزودنی به ازای ۱۵٪ افزودنی دوگانه به قیر مصرفی، منجر به افزایش ۱/۵ درصدی مدول برجهندگی و میزان خزش دینامیکی می‌گردد، همچنین مقدار کشش غیرمستقیم در حالت خشک به میزان ۱/۱۴ برابر نمونه شاهد می‌شود که مقدار افزودنی در این نمونه ۲۵٪ پودر لاستیک و ۷۵٪ پلی اتیلن ترفتالات می‌گردد. از طرفی برای آزمایش حساسیت رطوبتی، نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک تنها باعث بهبود حدود ۱۱ درصدی حساسیت رطوبتی مخلوط می‌شود. در نهایت، از شیوه شبکه عصبی به منظور برآورد نتایج آزمایشگاه استفاده شده است و دقت مدل سنجیده شده است.

### ۱- مقدمه

می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. در بین این موارد مطرح شده مواد بازیافتی ضمن بهبود برخی خصوصیات مخلوط مزایای زیست‌محیطی فراوانی نیز دارد چرا که از انباشت مواد زائد جلوگیری کرده و از آسیب‌های زیست‌محیطی می‌کاهد [۴]. پودر لاستیک (CR) و پلی اتیلن ترفتالات (PET) به عنوان دو ماده بازیافتی که می‌تواند در آسفالت مورد استفاده قرار گیرند در تحقیقات مختلف به طرق مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. پودر لاستیک معمولاً بر دو پایه لاستیک و تیوب بوده و معمولاً به صورت تر یا خشک برای بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. PET نیز انواع مختلفی دارد که ترکیب نهایی و نوع گرید مورد استفاده بر نتیجه نهایی می‌تواند تأثیرگذار باشد [۵]. تحقیقات پیشین نشان داده است که محققان به استفاده جداگانه از این دو ماده به عنوان اصلاح کننده در قیر پرداخته‌اند. به طور مثال، در برخی تحقیقات اشاره شده است که ترکیب مواد در داخل قیر به گونه‌ای بوده است که امکان استفاده از زباله‌های پلاستیکی از جنس پلی اتیلن به منظور بهبود برخی از خصوصیات قیر فراهم کرده

طول عمر روسازی جاده‌ها یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر اقتصاد یک کشور است. از این رو یکی از اهداف اولیه طرح و اجرای روسازی آسفالتی در سطح جاده‌ها، حصول بهترین عملکرد از نظر دوام و پایداری در شرایطی بهینه است. کیفیت روسازی به عوامل مختلفی بستگی دارد که از جمله آن می‌توان به مصالح تشکیل دهنده شامل مصالح سنگی و قیر اشاره کرد [۱]. در این بین با وجود آن که قیر از نظر وزنی نسبت به مصالح سنگی بسیار کمتر است، قیر نقش بسیار مهمی در عملکرد روسازی‌های آسفالتی و دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد و هرگونه تغییر در عملکرد قیر باعث تغییرات زیادی در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی می‌شود [۲]. تغییرات در ساختار قیر با هدف اصلاح و بهبود ویژگی‌های قیر انجام می‌شود و بیشتر معطوف به اصلاح قیر با افزودنی‌های خاصی می‌شود [۳]. از جمله موادی که می‌توان برای اصلاح قیر مورد استفاده قرار داد شامل: مواد بر پایه پلیمر، مواد بازیافتی و نانو مواد هستند که هر کدام بسته به هدف اصلی از اصلاح قیر

1 Crumb rubber

2 Polyethylene terephthalate

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ameri@iust.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



است [۶]. همچنین، نتایج تحقیقات نشان داده است که استفاده از زباله بطری پلاستیکی در مخلوط‌های SMA می‌تواند باعث افزایش مقاومت شیار شدگی و افزایش سختی مخلوط شود [۷]. همچنین، افزودن زباله بطری پلاستیکی به مخلوط‌های آسفالتی گرم باعث افزایش سختی قیر و افزایش ویسکوزیته مخلوط‌های اصلاح شده می‌شود که این افزایش در ویسکوزیته سبب کاهش تراکم نمونه‌های آسفالتی می‌گردد [۸]. به طور کلی نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که استفاده از پلاستومرها نظیر پلی‌اتیلن به منظور افزایش مقاومت در برابر شیار شدگی در دماهای بهره‌برداری می‌تواند منجر به اصلاح قیر مصرفی شوند. لذا کاربرد پلیمر برای اصلاح خواص قیرهای مورد استفاده در روسازی راه، در دهه‌های اخیر رو به گسترش بوده است. به طوری که متصدیان راه‌سازی با به کارگیری قیر اصلاح شده در آسفالت باعث افزایش قابل ملاحظه عمر راه‌ها و در نتیجه موجب افزایش عمر بهره‌برداری از آن‌ها شده‌اند.

از سوی دیگر، برخی از محققان به استفاده از مواد بازیافتی دیگری از جنس پودر لاستیک در طرح اختلاط بتن آسفالتی گرم پرداخته‌اند که در این تحقیقات اشاره شده است که این مواد بازیافتی نیز می‌تواند برخی از خصوصیات قیر را نظیر مقاومت و خصوصیات چسبنده قیری را بهبود دهد و همچنین ویسکوزیته را به علت از دست دادن برخی از روغن‌ها در روند ترکیب پودر لاستیک و قیر تا حدودی افزایش دهد [۹]. در همین راستا برخی الاستومرها نظیر استایرن بوتادین استایرن (SBS) سبب افزایش مقاومت چسبندگی قیر، مقاومت خستگی و کاهش حساسیت ترک خوردگی حرارتی شده‌اند [۱۰ و ۱۱]. لیو<sup>۱</sup> و همکاران در تحقیق خود اشاره داشته‌اند که بهبود مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های دائم به واسطه لزجت بالا، درجه نرمی بالا و برجهدگی بهتر، بهبود مقاومت قیر در برابر ترک‌های سطحی نوظهور، کاهش ترک‌های خستگی و بهبود دوام روسازی از جمله مسائلی می‌باشد که در تحقیقات پیشین دیده شده است [۱۲]. محققان به صورت متوالی در تلاش بوده‌اند که اثر استفاده از الاستومرها را در بهبود خواص قیر با روش‌های آزمایشگاهی رایج مورد ارزیابی قرار دهند. لذا انجام تست‌های آزمایشگاهی نظیر خزش، آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) و مدول برجهدگی و دیگر موارد بر روی بتن آسفالتی گرم حاوی پودر لاستیک از جمله روش‌هایی بوده است که به کرات در تحقیقات دیده شده است و نتایج نشان داده است که استفاده از این اصلاح کننده می‌تواند منجر به بهبود خواص قیر مصرفی شود؛ به طور مثال کوک<sup>۲</sup> و همکاران در سال

۲۰۱۱ به بررسی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر لاستیک پرداختند. در این تحقیق پودر لاستیک با قیر ترکیب شده و آزمایش‌هایی ماند خزش دینامیکی، کشش غیرمستقیم و تست‌های ارزیابی خصوصیات قیر انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از پودر لاستیک خصوصیات رفتاری مخلوط آسفالتی را بهبود داد است. در این تحقیق افزودنی ۵ درصد پودر لاستیک به عنوان نمونه مطلوب معرفی شد [۱۳].

حمد<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی پودر لاستیک در بتن آسفالتی گرم پرداخته است. در مطالعه حاضر از تأثیر اندازه پودر لاستیک به منظور بهبود مدول انعطاف‌پذیر، تست کششی غیرمستقیم (ITS)، پایداری و تست خزش استفاده شده است [۱۴]. پرویتیا<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی پودر لاستیک در طرح اختلاط بتن آسفالتی پرداخته‌اند که در این تحقیق اشاره شده است که استفاده از پودر لاستیک به عنوان افزودنی منجر به دوام بیشتر روسازی آسفالتی می‌گردد، نسبت اضافه کردن پودر لاستیک ۱٪ و ۲٪ کل مصالح در طرح اختلاط می‌باشد که تست‌های آزمایش مارشال و آزمایش‌ها حجمی بر روی آن انجام شده است. سایز پودر لاستیک استفاده شده #۴۰ و #۸۰ می‌باشد که اضافه کردن آن به آسفالت منجر به افزایش مقاومت کیفیت آسفالت می‌گردد [۱۵]. وانگ<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ به اثر استفاده کردن از پودر لاستیک و چسب‌های لاستیکی در بتن آسفالتی گرم پرداخته‌اند که اثر دما بر روی رفتار بتن آسفالتی گرم حاوی پودر لاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است که از دو روش ایجاد تنش دوگانه مکانیکی و MSCR استفاده شده است و نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از مواد زائد می‌تواند در بهبود عملکرد آسفالتی در دماهای مختلف مؤثر باشد [۱۶]. با توجه به تحقیقات پیشین؛ به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد این دو اصلاح کننده به منظور بهبود خواص قیرهای مورد استفاده در روسازی راه، در دهه‌های اخیر رو به گسترش است. به طوری که متصدیان راه‌سازی با به کارگیری قیر اصلاح شده در آسفالت باعث افزایش قابل ملاحظه عمر راه‌ها و در نتیجه موجب افزایش عمر بهره‌برداری از آن‌ها شده‌اند. لذا با توجه با تحقیقات پیشین بر روی ترکیب دو اصلاح کننده تا به حال تحقیقی صورت نگرفته است، لذا هدف اصلی این تحقیق بررسی خصوصیات رفتاری مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با ترکیب دو افزودنی زباله بطری لاستیکی (پلی‌اتیلن ترفتالات) و پودر لاستیک به صورت آزمایشگاهی می‌باشد. هدف از قرار دادن این دو ماه در کنار هم به عنوان افزودنی به دلیل خاصیت سخت

3 Gizing Sami Hamad

4 Wulandari

5 Wang

1 Liu

2 KOK

از MF<sup>۸</sup>، SF<sup>۹</sup> و PI<sup>۱۰</sup> برای استخراج ویژگی‌های مفید از تصاویر روسازی استفاده شده است [۱۹]. پس از اتمام تست‌های آزمایشگاهی؛ تمامی نتایج برداشت شده از آزمایشگاه با استفاده از شیوه انفیس در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج نشان داده است که همبستگی خوبی بین شیوه‌های آزمایشگاهی و عددی وجود دارد.

طبق آمارها سالیانه میلیون‌ها حلقه تابر در جهان بعد از استفاده به صورت زباله جمع‌آوری و انبار می‌گردد که هم از جنبه‌های زیست‌محیطی و هم از لحاظ کمبود فضای مورد نیاز برای انبار کردن مشکلات فراوانی را ایجاد می‌کند. همچنین، پلی‌اتیلن ترفتالات که برای ساخت بطری‌های پلاستیکی و محفظه‌های سفت و سخت بسته‌بندی مواد غذایی کاربرد دارد، در گروه پلاستیک‌های زیاد بازیافت شونده قرار دارد. اما بیش از نیمی از این پلاستیک که به منظور تولید بطری‌ها به کار گرفته می‌شود، برای بازیافت جمع‌آوری نمی‌شود. استفاده از این دو ماده زائد و کاربری کردن آن در صنایع ساخت و ساز به صورت جداگانه در تحقیقات دیده شده است، اما کاربرد هم‌زمان اثر افزودنی دوگانه پودر CR و PET در تحقیقات پیشین، از جمله مواردی می‌باشد که نیاز به بررسی جامع دارد. در تحقیق حاضر به بررسی استفاده از مخلوط پودر لاستیک و پلی‌اتیلن ترفتالات گرید بطری (یکی از ضایعات بازیافتی پلاستیک) به عنوان الاستومر و پلاستومر پرداخته می‌شود که هدف اصلی تحقیق، بررسی ماده جدید معرفی شده، مشخص کردن میزان تأثیر این افزودنی با آزمایش‌های حساسیت رطوبتی، مدول برجهندگی و خزش و در نهایت تعیین درصدی بهینه اختلاط این دو ماده با هم و اختلاط دو ماده با قیر می‌باشد. همچنین انتظار می‌رود که ترکیب دو افزودنی مورد استفاده منجر به تولید افزودنی دوگانه‌ای شود که هم از خاصیت نرم شدگی پودر لاستیک و هم خاصیت سفت کنندگی PT بهره‌مند گردد.

## ۲- روش تحقیق

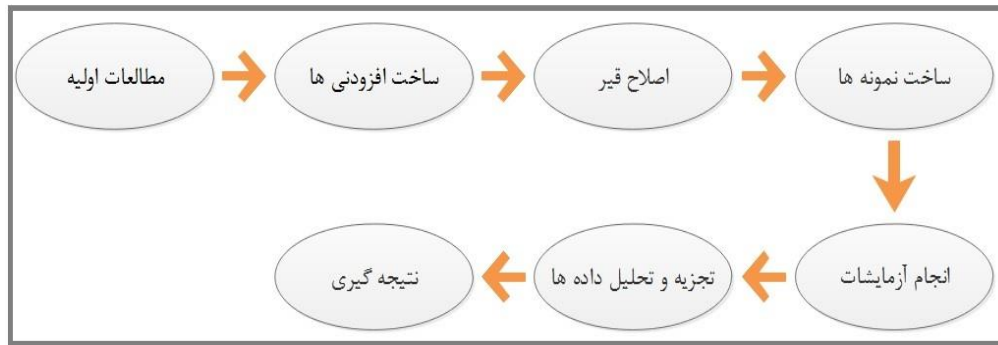
در این مطالعه روش آزمایشگاهی برای انجام تحقیق استفاده شده است. یکی از مشخصه‌های اساسی این روش تحقیق، استفاده از یک نمونه کنترل (شاهد) می‌باشد. به منظور ساخت نمونه‌ها، به انتخاب مصالح سنگی، نوع قیر و افزودنی‌های دوگانه معرفی شده در تحقیق به قیر و نحوه اختلاط آن پرداخته خواهد شد. پس از آن، به شرح و نتایج آزمایش‌های انجام شده برای بررسی اثر افزودنی در قیر پرداخته می‌شود و در نهایت تجزیه و تحلیل داده‌ها

شدگی توسط پلاستومر PET و نرم شدگی توسط الاستومر پودر لاستیک می‌باشد که بهینه‌ترین درصد استفاده از این دو ماده به عنوان جایگزین قیر معرفی می‌گردد. بدین منظور سعی گردیده است، به پیدا کردن درصد مناسب قیر به انجام آزمایش‌های مدول برجهندگی، خزش دینامیکی، کشش غیرمستقیم و آب جوشان پرداخت و درصد بهینه افزودنی را در هر کدام از آزمایشات به دست آورد. در این راستا از یک نوع خاص از افزودنی به نام افزودنی دوگانه پودر لاستیک و PET استفاده شده است. پودر لاستیک مصرف شده بر پایه تیوب و PET بازیافتی ناشی از بطری‌های آب معدنی با نام تجاری فارسی پلی‌اتیلن ترفتالات می‌باشد. پس از تمام تست‌های آزمایشگاهی به بررسی عددی نتایج با استفاده از شیوه شبکه عصبی پرداخته شده است و کارایی مدل‌های شبکه عصبی در تخمین نتایج ارزیابی می‌گردد، استفاده از روش‌های تخمینی در تحقیقات آزمایشگاهی در تحقیقات اخیر در بتن‌های آسفالتی دیده شده است، به طور مثال، یوسف و همکاران در سال ۲۰۱۹ به استفاده از روش شبکه عصبی و یادگیری عمیق به منظور تخمین عملکرد روسازی و رشد ترک پرداخته‌اند. بدین منظور با استفاده از شبکه DCCN به تصویربندی و پیکسل‌بندی تصاویر شده است که در این راستا نرخ رشد ترک مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۷]. نیوادا<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸، از روش ANN به منظور بررسی رویه آسفالتی استفاده کرده است که نتایج نشان داده است که شبکه‌های عصبی سه لایه‌ای ANN می‌تواند به خوبی رفتار رویه آسفالتی را پیش‌بینی کنند [۱۸].

هوانگ<sup>۲</sup> و همکاران با استفاده از تصاویر برگرفته شده از روسازی‌های آسفالتی به بررسی ترک ایجاد شده بر روی سطح روسازی پرداخته‌اند، در این تحقیق اشاره شده است که بررسی‌های دوره‌ای شرایط آسفالت در نگهداری جاده بسیار مهم است. لذا؛ از تصاویر برگرفته شده از سطح روسازی به صورت دوره‌ای در این مطالعه استفاده شده است، همچنین؛ از شش روش یادگیری ماشینی، طبقه‌بندی ساده لوح بیزی<sup>۳</sup>، طبقه‌بندی درخت (CT)، شبکه عصبی مصنوعی<sup>۴</sup>، شبکه عصبی عملکرد پایه شعاعی<sup>۵</sup>، ماشین بردار پشتیبانی<sup>۶</sup> و کمترین وکتور پشتیبانی دستگاه بردار<sup>۷</sup> بهره گرفته شده است، علاوه بر این،

- 1 Nivedya
- 2 Hoang
- 3 NBC
- 4 Backpropagation (BPANN)
- 5 RBFNN
- 6 SVM
- 7 LSSVM

- 8 Median Filter
- 9 Steerable Filter
- 10 Projective Integral



شکل ۱. مراحل انجام کلیات تحقیق

Fig. 1. General step reaserch

جدول ۱. مشخصات فنی قیر مصرفی

Table 1. Technical specifications for bitumen

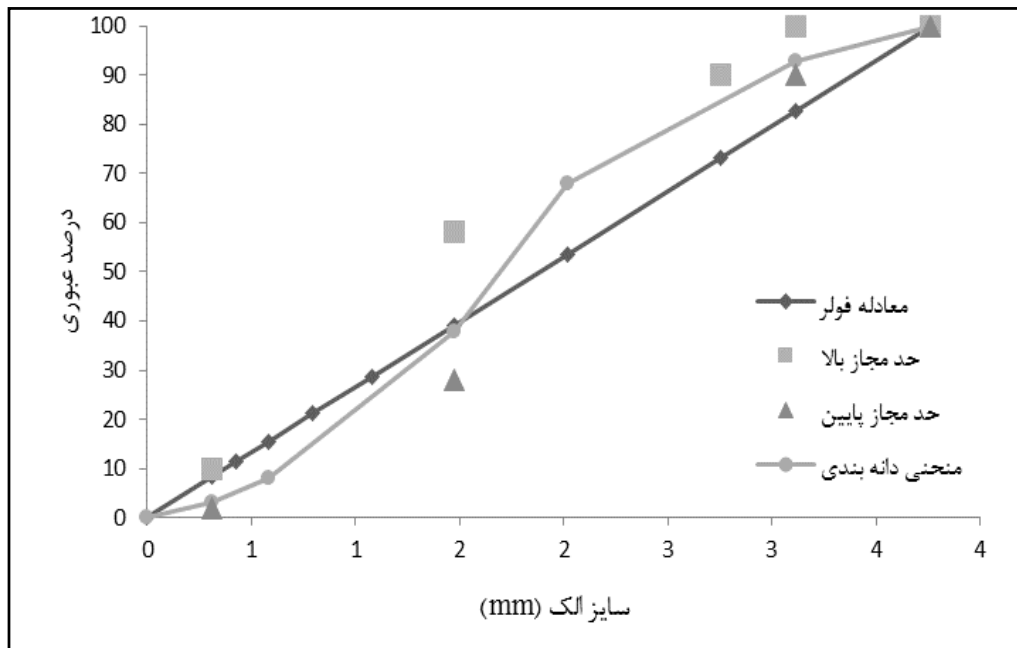
قیر ۶۰-۷۰	حدود استاندارد		روش آزمایش	خصوصیات
	حد بالا	حد پایین		
۱/۰۴۸	۱/۰۶	۱/۰۱	ASTM D70	وزن مخصوص در ۲۵ (درجه سانتی‌گراد)
۶۸	۷۰	۶۰	ASTM D5	درجه نفوذ در ۲۵ (درجه سانتی‌گراد)
۴۸	۵۴	۴۵	ASTM D36	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
۱۰۰	-	۱۰۰	ASTM D113	انگمی در ۲۵ درجه (سانتی‌گراد)
۳۱۵	-	۲۵۰	ASTM D92	نقطه اشتعال
۱/۷-۱/۶	-	-	ASTMD-7	دانسیته
۶۰-۷۰	-	-	ASTM D-5	در نفوذ 25C, mm/10 درجه
۱۰۰ Min	-	-	ASTM D-113	کشش‌پذیری در ۲۵ °C
۵/۹۹	-	-	ASTM D-4	حلالیت در دی سولفید wt%.
منفی	-	-	AASHTOT 102	تست لکه
Max 2	-	-	ASTM D-6	افت وزنی بر اثر حرارت wt%.
Max 20	-	-	ASTM D-6-D-5	اثر افت نفوذ بر حرارت، %

تأثیرگذار هستند [۲۰]. بر همین اساس در این تحقیق از قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ تولید شرکت پاسارگاد تهران با توجه به کاربری گسترده آن در ساخت نمونه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایش‌های قیر شامل: آزمایش درجه نفوذ، نقطه نرمی، خاصیت انگمی، تعیین درجه اشتعال و وزن مخصوص قیر می‌باشد. مشخصات فیزیکی و رئولوژی قیر و استاندارد آن در جدول ۱ بیان شده است.

به دو صورت عددی و آزمایشگاهی انجام می‌شود و نتایج هر دو بخش ارائه می‌شود. شکل ۱، مراحل کلی انجام تحقیق را نشان می‌دهد که در بخش روش تحقیق به صورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲-۱- مواد و مصالح

مواد و مصالح مورد استفاده و درجه‌بندی آن‌ها بر خصوصیات مخلوط آسفالتی از جمله سختی، دوام، نفوذپذیری، کارایی و حساسیت رطوبتی



شکل ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی

Fig. 2. Grading for stone material

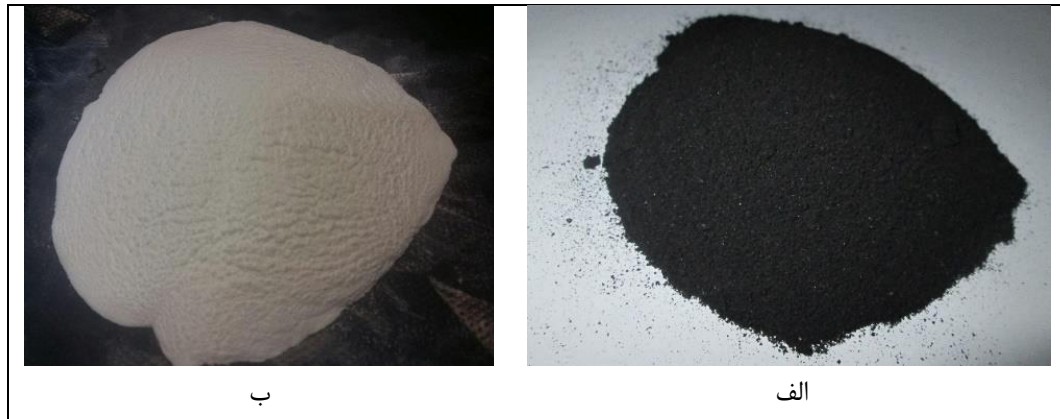
جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی و مقادیر مجاز

Table 2. Experimental test for stone material to recognize allowable range.

استاندارد آزمایش		حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
AASHTO	ASTM	آستر	رویه		
T96		۴۰	۳۰	۲۰	حداکثر سایش به روش لس آنجلس (درصد)
T85				۲/۶۵۴	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
	D5821	۸۰	۹۰	۹۴	حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴
T85		۲/۵	۲/۵	/۸	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
T84		۲/۸	۲/۵	۱/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)

شکستگی در دو وجه، حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)، حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه) و وزن مخصوص می‌باشد که نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی و مقادیر مجاز نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق از معدن تلو واقع در تهران تهیه شده است. دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، آزمایش‌های مصالح سنگی که شامل دانه‌بندی مصالح سنگی، آزمایش سایش (لس آنجلس)، حداقل درصد



شکل ۳. افزودنی های استفاده شده (الف) پودر لاستیک (ب) پلی اتیلن ترفتالات

Fig. 3. Raw materials a) crump rubber powder and b) Polyethylene terephthalate

۷۰-۶۰ بود. ویژگی های این قیر سبب می شود که این حجم از افزودنی به سهولت در قیر حل شود. به طوری که در صورت افزایش مقدار افزودنی به بالای ۱۵٪، افزودنی توان حل شدن در قیر را نخواهد داشت و در قیر ته نشین می گردد. در این تحقیق با توجه به اینکه پایه تحقیق بر اصلاح مخلوط با اصلاح خاصیت ویسکو الاستیک قیر و رسیدن به قیر اصلاح شده ای با سختی مناسب که از اختلاط بین درصدی از دو نوع افزودنی و قیر به دست خواهد آمد، می باشد از روش تر برای اختلاط استفاده شده است، بدین منظور، با استفاده از مخلوط کن دور بالا با ۵۰۰۰ دور دمای ۱۷۰ درجه به مدت ۴۵ دقیقه قیر و اصلاح کننده با هم مخلوط شدند و در نهایت قیر اصلاح شده به دست آمد.

برای تعیین مقدار قیر بهینه در مخلوط آسفالتی از روش آزمون مارشال استفاده شد و مقدار قیر بهینه نمونه شاهد برابر ۵/۴ درصد به دست آمد و در نهایت برای ساخت نمونه های اصلاح شده نیز از همین درصد استفاده گردید. نام گذاری ترکیب های مورد بررسی و همچنین درصد مشارکت هر ماده در افزودنی دوگانه مورد استفاده در جدول شماره ۳ بیان شده است.

#### ۲-۲- آزمایش خزش دینامیکی

تغییر شکل دائمی که به شیار شدگی شناخته می شود یکی از اصلی ترین خرابی های ایجاد شده در روسازی آسفالتی در مناطق گرمسیری می باشد. شیار شدگی عمر خدمت دهی را کاهش می دهد. یکی از روش های اندازه گیری ویژگی تغییر شکل دائمی مخلوط های آسفالتی، اعمال چندین هزار بار تکراری به وسیله یک آزمایش بار تکرار شونده و ثبت تغییر مکان های دائمی

افزودنی مورد استفاده همان طور که در بخش قبل بیان گردید افزودنی دوگانه از جنس پودر لاستیک بر پایه تیوب و پلی اتیلن ترفتالات (PET) با نام تجاری BG ۱۰۲۱ تولید کشور مالزی می باشد. اندازه ذرات اولیه دو ماده مطرح شده عبوری از الک ۵۰ در نظر گرفته شده است. دو ماده با هم ترکیب شده و تهیه افزودنی دوگانه با روش اکستروژن پلاستیک صورت گرفته است. اکستروژن پلاستیک یک فرایند تولید با حجم بالا است که در آن پلاستیک خام ذوب شده و ترکیب مصالح در حالت ذوب انجام گرفته و در نهایت پروفیل پلاستیکی مورد نظر خارج می گردد. پارامترهای ورودی این دستگاه شامل سه مخزن اصلی چرخنده برای مخلوط کردن دو ماده است که در این پژوهش طبق توصیه های موجود دستگاه دمای مخزن های اول، دوم و سوم به ترتیب ۲۷۰، ۲۸۰ و ۲۷۰ درجه تنظیم شد [۲۱ و ۲۲]. در نهایت خروجی دستگاه پروفیل هایی از جنس افزودنی دوگانه مورد نظر بود که این پروفیل ها سپس پودر شده و با استفاده از دستگاه همزن دور بالا به قیر اضافه گردید. بدین منظور، مخلوط های آسفالتی با قیرهای اصلاح شده ساخته شدند. شکل ۳ افزودنی های این تحقیق را نشان می دهد.

مقدار افزودنی پلی اتیلن ترفتالات و پودر لاستیک در رنج وسیعی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ با توجه به تحقیقات قبلی در نظر گرفته شده است که سعی گردیده است با اختلاط این دو با نسبت های متفاوت به ازای ۱۰٪ و ۱۵٪ مقادیر قیر، دید مناسبی را نسبت به عملکرد هم زمان دو ماده به دست آورد. مقادیر کمتر و بیشتر از ۱۰٪ و ۱۵٪ در ساخت نمونه ها تست شده است و درصد بهینه پس از ساخت و اختلاط قیر، انتخاب شده است، یکی از دلایل انتخاب دو درصد ۱۰ و ۱۵ به عنوان مقدار ماده افزودنی استفاده از قیر AC



جدول ۳. طرح اختلاط های مورد بررسی در تحقیق

Table 3. Feature of sample and percentage of modifiers

سطر	نمونه	درصد افزودنی	درصد پودر لاستیک	درصد PET
۱	10CR100T0	۱۰	۱۰۰	۰
۲	15CR100T0	۱۵	۱۰۰	۰
۳	10CR75T25	۱۰	۷۵	۲۵
۴	15CR75P25	۱۵	۷۵	۲۵
۵	10CR50T50	۱۰	۵۰	۵۰
۶	15CR50T50	۱۵	۵۰	۵۰
۷	10CR25T75	۱۰	۲۵	۷۵
۸	15CR25P75	۱۵	۲۵	۷۵
۹	10CR0T100	۱۰	۰	۱۰۰
۱۰	15CR0P100	۱۵	۰	۱۰۰

دستگاه  $UTM_5$  و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و بار نیمه سینوسی انجام شد [۲۵]؛ و در نهایت میانگین ۵ مدول برجهندگی نهایی که دستگاه به عنوان خروجی ارائه می‌کند به عنوان مدول برجهندگی مخلوطها گزارش شده است.

۲-۴- آزمایش کشش غیرمستقیم

مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوطهای آسفالتی از مشخصات مهم روسازی در سرویس‌دهی در دمای پایین می‌باشد. آزمایش ITS می‌تواند مکانیسم بارگذاری در شرایط عملکردی واقعی را شبیه‌سازی کند. همچنین این آزمایش برای تعیین خسارات وارده به آسفالت را در دمای پایین استفاده شود [۲۶]. این آزمایش بر روی نمونه‌های خشک و مرطوب برای تعیین نسبت استحکام کششی (TSR) مخلوطهای آسفالتی بر اساس استاندارد AASHTO T283 انجام شد. برای نمونه‌های مرطوب طبق استاندارد AASHTO T283 ابتدا نمونه‌ها با استفاده از وکیوم کردن بیش از ۸۵ درصد اشباع گردیده و به مدت ۱۶ ساعت در دمای منفی ۱۷ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و در نهایت یک ساعت در آب دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده و بعد از این مرحله با استفاده از دستگاه کشش غیرمستقیم مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع برای انجام این آزمایش از ۶۶ نمونه آسفالتی استفاده شده که ۳۳ نمونه به صورت تر و ۳۳ نمونه به صورت خشک مورد آزمایش قرار گرفته است.

به عنوان تابعی از سیکل بارگذاری است. برای رسیدن به چنین هدفی در این تحقیق آزمایش خزش دینامیکی و با دستگاه  $UTM_5$  و با سطح تنش ۴۵۰ کیلو پاسکال و دمای ۵۰ درجه انجام شده است و مطابق توصیه محققان اعمال بار تا کرنش ۰/۰۱ ادامه می‌یابد [۲۲]. برای این منظور یک بار مربعی شکل به مدت ۰/۱ ثانیه با زمان استراحت ۰/۹۵ به نمونه آسفالتی اعمال می‌شود. قطر نمونه‌ها نیز ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر برای مخلوط با حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌ی ۳۷/۵ میلی‌متر توصیه شده است [۲۴] و [۲۳]. بر پایه تئوری ویتزک تعداد دفعات بارگذاری تا شروع ناحیه سوم به عنوان عدد روانی شناخته می‌شود و عدد روانی به عنوان یکی از بهترین شاخص‌های شیار شدگی مخلوطهای آسفالتی در اکثر تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق نیز در نهایت تعداد سیکل معادل حداقل مقدار نرخ کرنش برگرفته از نمودار نرخ کرنش در برابر سیکل را به عنوان عدد روانی گزارش شده است.

۲-۳- آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی یک پاسخ آزمایش دینامیکی است که به صورت نسبت تنش انحرافی محوری تکرار شونده به کرنش محوری برگشت‌پذیر تعریف می‌شود. مدول برجهندگی برای ارزیابی کیفیت نسبی مخلوط آسفالتی به عنوان داده ورودی طرح روسازی، ارزیابی و یا تحلیل روسازی به کار می‌رود. این آزمون در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM D4123 و با استفاده از

## ۲-۵- آزمایش آب جوشان

منظور تمامی ورودی‌ها به صورت یک ماتریس  $189 \times 5$  در نظر گرفته شده است و خروجی شبکه، پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی برای هر آزمایش می‌باشد که به صورت یک ماتریس  $189 \times 1$  برای مقاومت کششی و  $99 \times 1$  برای عدد روانی و مدول برجهندگی ارائه می‌شود. در این راستا، نتایج آزمایشگاهی به عنوان میانگین داده‌های ورودی به شبکه در نظر گرفته شده است که برای عدد روانی و مدول برجهندگی  $33$  آزمایش انجام شده است که با استفاده از توزیع نرمال،  $99$  نمونه با توزیع نرمال به صورت تصادفی، تولید شده است. همچنین این عدد برای آزمایش کشش غیرمستقیم  $63$  عدد می‌باشد که با تولید نمونه‌های تصادفی حول نقطه میانگین،  $189$  نمونه به منظور ساخت شبکه عصبی در نظر گرفته شده است و در همه مدل‌ها  $0/30$  کل داده‌ها به عنوان داده‌های (مجموعه تست و صحت سنجی) در نظر گرفته شده است و مابقی داده‌ها به منظور ساخت مدل استفاده شده است. پس از انتخاب مجموع داده‌های آموزش به صورت تصادفی و ساخت مدل هیبرید شبکه عصبی، به آموزش داده‌ها پرداخته می‌شود، همچنین با بارگذاری داده‌ها در قسمت تست و صحت سنجی شبکه به تخمین نتایج برای سه بخش پرداخته می‌شود و میزان نزدیکی داده‌های تخمین زده شده با داده‌های اولیه بررسی می‌گردد. آموزش داده‌ها برای چندین بار با تغییر نوع شبکه و تعداد اپوک‌ها تکرار می‌گردد تا حداکثر مقادیر همبستگی برای داده‌های آموزش و حداقل مقادیر خطا برای داده‌های تست و صحت سنجی مشخص گردد، پس از آن مدل ساخته شده برای هر آزمایش ذخیره می‌گردد و مقادیر تخمینی در هر سه دسته به منظور بررسی ضریب همبستگی و خطای شبکه ذخیره می‌شود. مقادیر  $R^2$  برای داده‌های آموزش باید نزدیک به یک باشد، چرا که ساخت مدل و تخمین آن بر اساس داده‌های ورودی آزمایش صورت گرفته است؛ اما مقادیر  $R^2$  برای دسته‌ی تست و صحت سنجی شده پایین‌تر می‌باشد، چرا که نتایج آزمایش در مدل وارد نمی‌گردد و عملکرد مدل با نتایج به دست آمده تست خواهد شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- خزش دینامیکی

نتایج آزمایش خزش دینامیکی بر اساس عدد روانی در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به داده‌های این شکل، عدد روانی با اضافه شدن افزودنی‌های دوگانه عدد روانی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. این نمودار حاوی دو درصد مختلف برای مقدار افزودنی دوگانه است که شامل مقدار  $10$  و  $15$  درصد افزودنی می‌باشد. برای مخلوط‌های حاوی  $10$  درصد افزودنی دوگانه با

این روش بر اساس استاندارد ASTM D3625 (اثر آب بر مصالح پوشاننده شده با قیر با استفاده از آب جوشان) می‌باشد که این آزمایش برای ارزیابی قابلیت عریان شدگی نمونه‌های متراکم نشده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش حدود  $250$  گرم مخلوط متراکم نشده به مدت  $10$  دقیقه در آب در حال جوشیدن قرار می‌گیرد. پس از جوشیدن اجازه می‌دهیم مخلوط سرد و سپس آب را خارج می‌نماییم و در نهایت مخلوط را روی دستمال سفیدی برای خشک شدن قرار می‌دهیم. قابلیت عریان شدگی در این روش با ارزیابی درصد کاهش سطح مناطق پوشش داده شده به دلیل قرار گرفتن در شرایط آب جوشان مورد بررسی قرار می‌گیرد. این آزمایش، یک روش سریع برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های متراکم نشده است ولی در این روش ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی مورد ارزیابی قرار نمی‌گیرد.

### ۲-۶- به کارگیری روش شبکه عصبی انفیس

سیستم شبکه عصبی فازی سازگار نوعی شبکه عصبی بر پایه روش تاکوچی است که بر اساس مدل‌های  $1990$  توسعه داده شده است. این روش از خواص شبکه عصبی (ANN) و اصول منطق فازی بهره می‌برد. برای این منظور کلیه داده‌های به دست آمده از آزمایشگاه به عنوان متغیر خروجی وارد نرم‌افزار متلب در نظر گرفته شده است. در تحقیقات گذشته که بر روی این روش انجام شده متغیر خروجی و ورودی را ثابت فرض می‌کند اما در این تحقیق متغیر ورودی با میانگین و واریانس حاصل از نتایج آزمایشگاهی به صورت تصادفی تولید می‌شود. در این تحقیق مقدار ورودی‌ها شامل درصد افزودنی به ترکیب قیر، درصد پودر لاستیک در افزودنی دوگانه، درصد PET و CR در افزودنی دوگانه می‌باشد. مقدار عدد روانی، مدول برجهندگی و کشش غیرمستقیم‌تر و خشک نیز به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. واریانس برای مقدار ورودی با میانگین  $0/02$  و توزیع نرمال فرض شده و واریانس مدل انعطاف‌پذیر  $0/01$  است. بدین منظور مقادیر افزودنی دوگانه، درصد اضافه کردن آن به قیر، نوع افزودنی (PET و پودر لاستیک) و میزان تنش کششی غیرمستقیم در حالت اشباع به عنوان پارامترهای ورودی ساخته شده‌اند و در نهایت نتایج آزمایشگاهی نظیر خزش دینامیکی، آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول جهندگی به عنوان خروجی مسئله در نظر گرفته شده است. شکل ۴، یکی از شبکه‌های عصبی ساخته شده در تحقیق را پس از در نظر گرفتن ورودی‌های تحقیق و ساخت معماری شبکه نشان می‌دهد. بدین



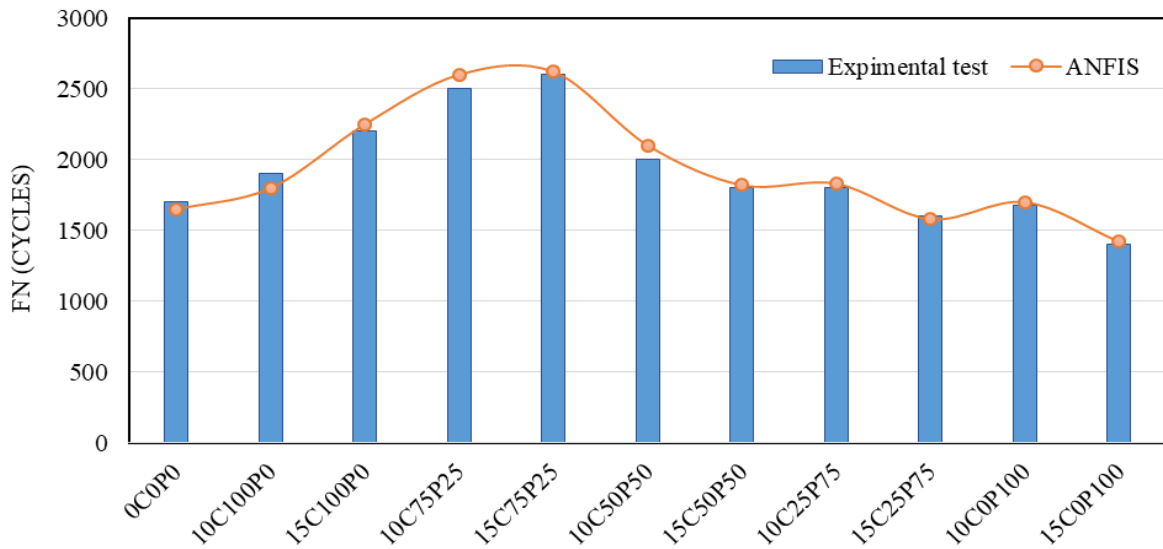


شکل ۴. مدل شبکه عصبی ارائه شده برای بررسی آزمایش کشش غیر مستقیم

Fig. 4. Neural network model for tensile strength

کلی طی شده همانند نمونه‌های حاوی ۱۰٪ می‌باشد ولی مقدار افزایش‌ها و کاهش‌ها متفاوت هستند. به طوری که با اضافه شدن ۱۵٪ افزودنی دوگانه شامل صد درصد پودر لاستیک مقدار افزایش عدد روانی مقدار بیشتری نسبت به مقدار افزایش همین اصلاح کننده در نمونه‌ها ۱۰ درصدی دارد. همچنین مقدار کاهش نیز روند تندتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد

اضافه شده سهم PET از صفر درصد به ۲۵ درصد، افزایشی در مقدار عدد روانی اتفاق می‌افتد ولی با اضافه شدن بیشتر از ۲۵ درصد پلی‌اتیلن، مقدار عدد روانی کاهش می‌یابد و در نهایت این کاهش برای نمونه IOCROT100 به گونه‌ای است که عدد روانی این نمونه حتی از عدد روانی نمونه شاهد هم پایین‌تر می‌آید. برای نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد افزودنی دوگانه، روند



شکل ۵. نتایج آزمایش خزش دینامیکی

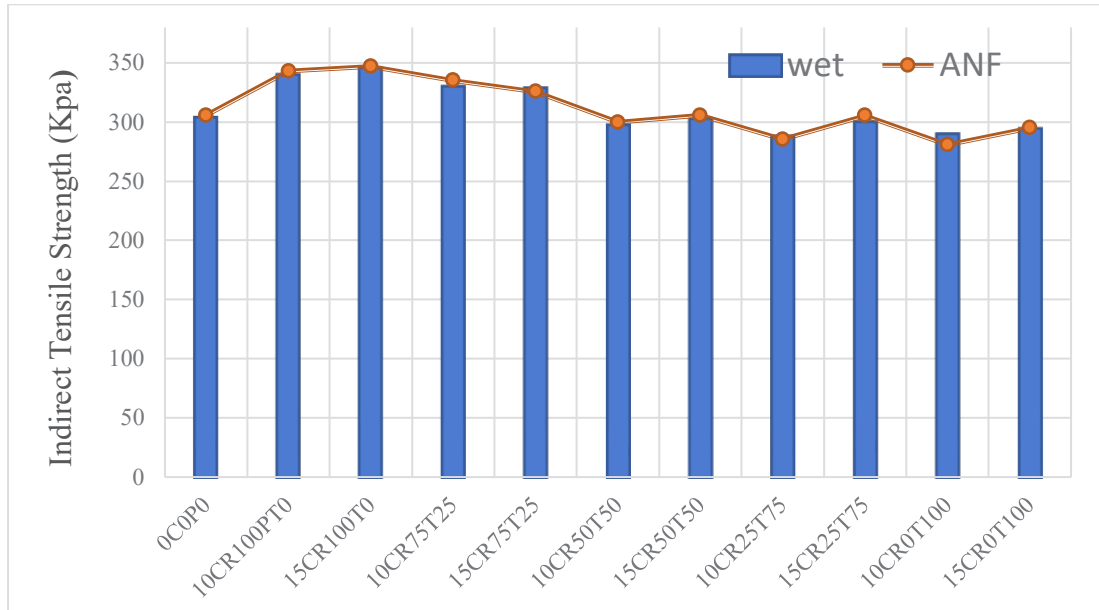
Fig. 5. Dynamic creep test results

کند و با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری تغییر شکل‌های ماندگار در نمونه افزایش می‌یابد و مخلوط از خود رفتار ترموپلاستیک بیشتری نشان می‌دهد. این امر باعث کاهش مقاومت نمونه‌های ساخته شده با درصد‌های بالای پلی‌اتیلن در برابر خرابی شیار شدگی می‌شود. همچنین با افزایش درصد اصلاح کننده از ۱۰ به ۱۵٪ مقدار تغییرات در ویسکوزیته افزایش می‌یابد. همان‌طور که از شکل برمی‌آید عدد روانی با اضافه شدن افزودنی دچار تغییر می‌شود به گونه‌ای که با افزایش سهم PET در افزودنی دوگانه از صفر درصد به ۲۵ درصد عدد روانی افزایش یافته اما با افزایش این سهم از ۲۵ درصد به ۵۰ درصد، از ۵۰ به ۷۵ و همچنین از ۷۵ به صد درصد عدد روانی کاهش می‌یابد به طوری که در افزودنی دوگانه‌ای که تنها از صد درصد PET تشکیل شده مقدار عدد روانی به کمتر از عدد روانی نمونه شاهد می‌رسد. روند کلی تغییر مقدار عدد روانی با تغییر مقدار افزودنی از ۱۰ درصد به ۱۵ درصد مشابه بوده و تنها مقدار تغییر متفاوت است.

### ۳-۲- کشش غیرمستقیم

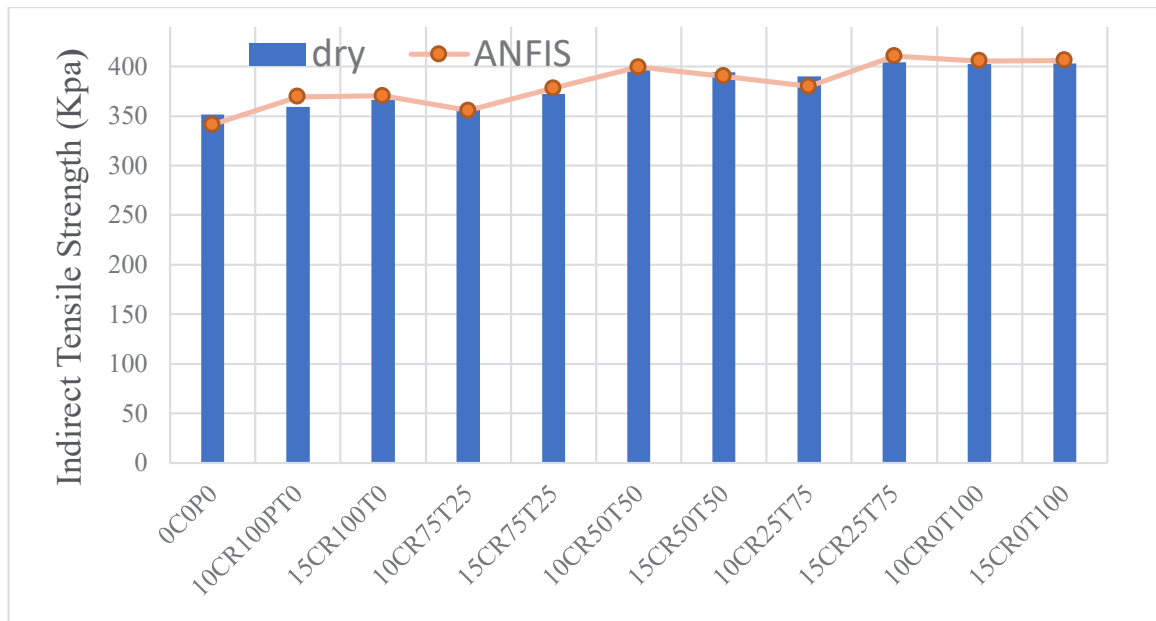
نتایج کشش غیرمستقیم برای نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد و ۱۵ درصد افزودنی‌های دوگانه در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است. در بررسی مقاومت کششی غیرمستقیم خشک، تأثیر افزودنی‌های دوگانه مثبت ارزیابی شده

اصلاح کننده دارد به طوری که عدد روانی در نمونه 15CR0T100 مقدار خیلی کمتری نسبت به نمونه شاهد دارد. این روند می‌تواند چندین دلیل داشته باشد. نخست آن که نمونه‌های حاوی پودر لاستیک تنها به سبب اختلاط با سرعت برش بالا با قیر، خصوصیت جذب مواد فرار قیر را تا حد زیادی از دست می‌دهند که این عامل می‌تواند باعث افزایش جزئی در ویسکوزیته قیر گردد. همچنین از طرف دیگر در این فرآیند اصلاح قیر به سبب وجود دماهای بالا، مقداری از جز مالین قیر تبخیر می‌شود که باعث افزایش ویسکوزیته می‌گردد. در فرآیند اختلاط قیر با مصالح سنگی، قیر نقش روان کننده بین سنگ‌دانه‌ها ایفا می‌کند و باعث چرخش و جابجایی بهتر سنگ‌دانه‌ها نسبت به همدیگر می‌شود که این امر باعث بهبود خاصیت قفل و بست سنگ‌دانه‌ای مخلوط می‌شود. با افزایش ویسکوزیته قیر نقش روان کننده قیر کاسته می‌شود و قفل و بست سنگ‌دانه‌ای کاهش می‌یابد که باعث کاهش مقاومت مخلوط در برابر بارهای تکراری وارده می‌شود. در این تحقیق نیز، با افزایش مقدار پلی‌اتیلن در مخلوط سختی قیر افزایش می‌یابد که این افزایش در سختی می‌تواند باعث کاهش تراکم مخلوط و در نتیجه افزایش فضای خالی گردد. از طرف دیگر این افزایش ویسکوزیته باعث افزایش مقاومت مخلوط در برابر سیکل‌های وارده می‌شود اما این افزایش مقاومت تا حدودی می‌تواند در مقابل بارهای اعمال شده به نمونه مقاومت



شکل ۶. نتایج کشش غیرمستقیم در حالت تر

Fig. 6. Indirect traction results in wet mode

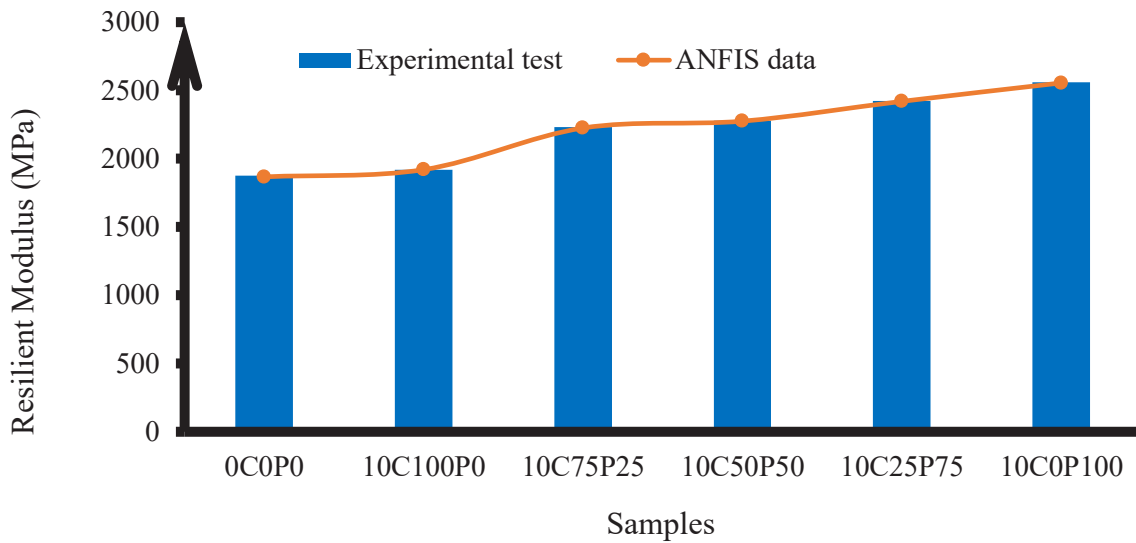


شکل ۷. نتایج کشش غیرمستقیم در حالت خشک

Fig.7. Indirect tensile test for dry mode

غیرمستقیم چشم ناگهانی پیدا می‌کند. نکته قابل تأمل دیگر در خصوص این نمودار رابطه مستقیم بین میزان افزودنی و مقاومت کششی غیرمستقیم می‌باشد بدین معنی که همواره میزان مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد افزودنی از ۱۰ درصد بیشتر است. بیشترین مقدار افزایش

است. به طوری که در این حالت (شرایط خشک) میزان مقاومت کششی با افزایش درصد PET افزایش چشمگیری می‌یابد، هر چند که میزان مقاومت کششی در حالت استفاده از پودر لاستیک با نمونه شاهد تفاوت چندانی ندارد اما با جایگزینی مقدار اندکی PET به جای پودر لاستیک، مقاومت کششی



شکل ۸. نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای نمونه های اصلاح شده با ۱۰ افزودنی

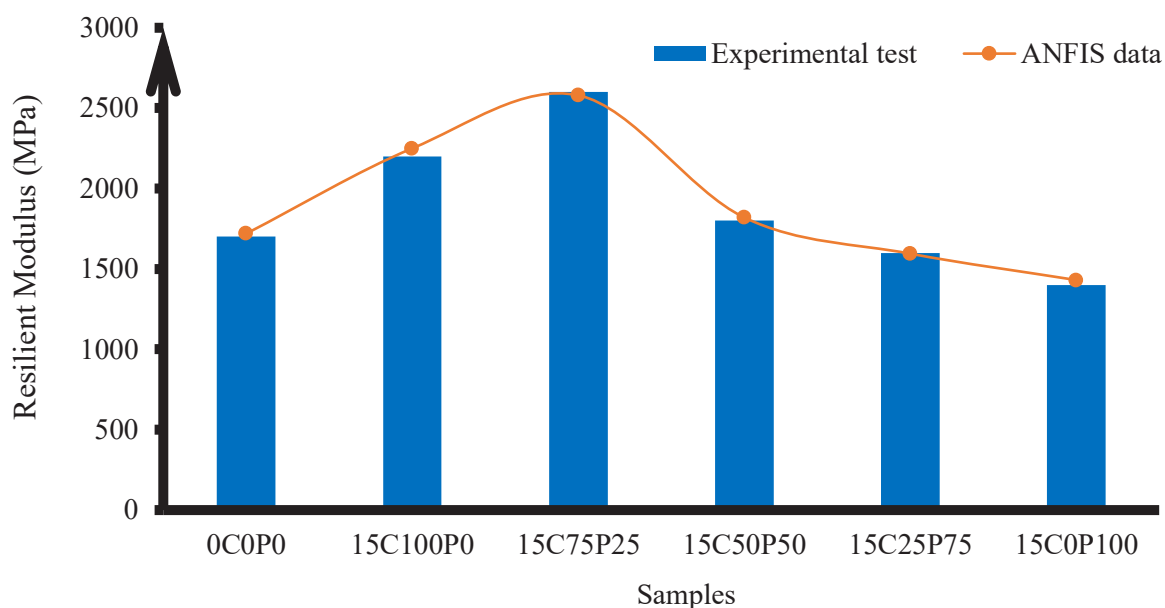
Fig. 8. Results of the resilient modulus for 10% additive modified sample

می‌گردد، چرا که در این حالت، سطوح پوشیده نشده با قیر و وجود فضای خالی بیشتر نمونه متراکم شده، مستعد ورود آب به فضای بین قیر و سطح مصالح سنگی می‌گردد که این پدیده می‌تواند باعث کاهش مقاومت مخلوط در برابر کشش گردد. لذا، نمونه‌های ساخته شده با قیر سفت‌تر حساسیت بیشتری به خرابی رطوبتی از خود نشان می‌دهند استفاده از پلی‌اتیلن در بتن آسفالتی، در تحقیقات پیشین به ازای افزایش پلی‌اتیلن، در حالت خشک افزایش یافته است، به طوری که میزان مقاومت کششی به بالاترین مقدار خود رسیده است، اما در حالت تر، استفاده از این ماده منجر به کاهش مقاومت می‌گردد، به منظور بالا بردن هم‌زمان مقاومت کششی در حالت خشک و تر می‌توان به استفاده هم‌زمان ۲۵ درصدی از پودر لاستیک و ۷۵٪ PET پرداخت که در تحقیقات قبلی نیز درصد بهینه استفاده از PET، ۷/۵ درصد بوده است که نسبت اضافه کردن این دو افزودنی به قیر ۱۰٪ وزنی آن بوده است [۵].

### ۳-۳- مدول برجهندگی

مدول برجهندگی به عنوان داده ورودی برای طراحی، تحلیل و ارزیابی روسازی به کار می‌رود. نتایج مربوط به مدول برجهندگی مخلوط‌های اصلاح شده و نمونه شاهد در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق نتایج این آزمایش به ازای افزودن ۱۰ درصد اضافه کردن افزودنی به قیر، با اضافه شده پودر

مقاومت کششی در حالت خشک مربوط به نمونه حاوی ۱۵ درصد افزودنی دوگانه از جنس PET (۱۰۰٪ PET) می‌باشد. افزایش ۲۰ درصدی در مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ی مذکور نسبت به نمونه شاهد مشاهده می‌شود. انتظار می‌رود که در صورت استفاده از ۲۰ درصد افزودنی این روند همچنان ادامه داشته و مقدار مقاومت کششی افزایش یابد. یکی از دلایل اصلی این تغییرات، سختی قیر می‌باشد. نمونه‌هایی که حاوی درصدهای بالاتر پلی‌اتیلن می‌باشند، سختی بیشتری نسبت به سایرین دارند که ناشی از افزایش سختی قیر به سبب وجود این پلیمر ترموپلاستیک در قیر می‌باشد که می‌تواند باعث افزایش مقاومت مخلوط در برابر کشش گردد. میزان مقاومت کششی در حالت اشباع نسبت به شرایط خشک کاهش می‌یابد که این میزان کاهش برای نمونه‌های حاوی PET بیشتر از نمونه‌های حاوی پودر لاستیک تنها است. میزان مقاومت در حالت اشباع همانند حالت خشک، در صورت استفاده بیشتر از افزودنی مقدار بیشتری دارد. از نکات منفی در خصوص استفاده از میزان بالای افزودنی PET می‌توان به کاهش مقدار مقاومت کششی اشاره نمود. به طوری که نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد یا بیشتر PET مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم کمتری نسبت به نمونه شاهد دارند که می‌تواند به دلیل سخت شدن قیر در اثر وجود پلی‌اتیلن در مخلوط باشد که باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌گردد. این افزایش ویسکوزیته قیر مانع پوشش یکنواخت و کامل قیر بر روی سنگ‌دانه‌ها



شکل ۹. نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای نمونه های اصلاح شده با ۱۵ درصد افزودنی

Fig.9. Results of the resilient modulus for 15 % additive modified sample

اضافه کردن ۱۵٪ افزودنی به قیر، در فرآیند اختلاط به سبب وجود دماهای بالا، مقداری از جز مالتین قیر تبخیر می شود و باعث افزایش جزئی در ویسکوزیته قیر می گردد.

#### ۳-۴- بحث بر روی نتایج عددی و آزمایشگاهی

جدول ۴، حداکثر مقادیر نمونه های آزمایشگاهی را به نمونه شاهد نشان می دهد؛ در آزمایش کشش غیرمستقیم در حالت خشک و تر؛ نمونه هایی که حاوی درصد های بالاتر پلی اتیلن می باشند، سختی بیشتری نسبت به سایرین دارند که ناشی از افزایش سختی قیر به سبب وجود این پلیمر ترموپلاستیک در قیر می باشد که می تواند باعث افزایش مقاومت مخلوط در برابر کشش گردد. در بین نمونه های ساخته شده در آزمایشگاه، نمونه هایی که بیشتر از ۷۵ درصد PET را به عنوان افزودنی دارند، میزان مقاومت کششی بالاتری را دارند که این مقدار در ماکزیمم حالت به ۱/۱۴ برابر نمونه ی شاهد می رسد. در آزمایش خزش دینامیکی، بهینه ترین مقدار، مربوط به نمونه هایی می باشد که حاوی ۷۵ درصد CR و ۲۵ درصد PET می باشد. در این نمونه ها، به ازای درصد های بالای PET و CR، میزان خزش دینامیکی کاهش می یابد، چرا که با افزایش CR، ویسکوزیته قیر کاهش یافته و منجر به کاهش مقاومت مخلوط در برابر بارهای تکراری شده است. همچنین، با افزایش بیش از حد

لاستیک مقدار مدول برجهندگی به صورت جزئی افزایش می یابد ولی اضافه شدن و بیشتر شدن سهم PET در اصلاح کننده مقدار افزایش مدول برجهندگی نسبت به نمونه شاهد مقدار بیشتری را تجربه می کند. همچنین مطابق شکل ۸ و شکل ۹ با افزایش مقدار اصلاح کننده از ۱۰ درصد به ۱۵ درصد مقدار مدول برجهندگی افزایش می یابد.

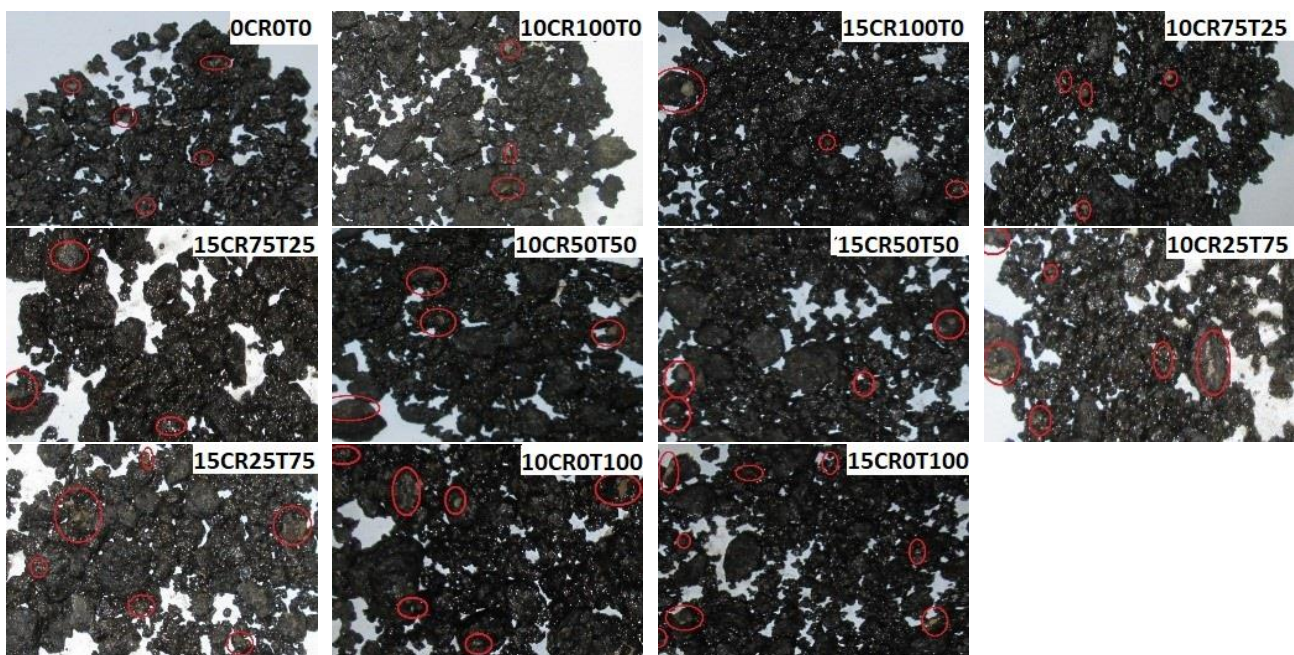
نمونه های ساخته شده با ۱۵ درصد افزودنی نسبت به نمونه های حاوی ۱۰ درصد افزودنی مدول برجهندگی بیشتری را دارند. از دلایل این امر می توان به برهم کنش مناسب نمونه های ۱۵ درصدی نسبت به نمونه های ۱۰ درصدی اشاره نمود. از دیگر نکات قابل توجه در این نمودار می توان به تأثیر ناچیز افزودنی پودر لاستیک تنها بر خصوصیات مدول برجهندگی اشاره کرد. همان گونه که ملاحظه گردید افزایش مقدار ناچیزی پلی اتیلن ترفتالات باعث افزایش قابل ملاحظه مدول برجهندگی می گردد به طوری که با افزایش تنها ۲۵ درصد پلی اتیلن ترفتالات مقدار مدول برجهندگی رشدی ۱۶ درصدی می یابد. به طور کلی، نتایج مذکور را به این شکل می توان توجیه نمود که سخت شدن قیر به واسطه حضور این نوع از پلی استر در مخلوط باعث افزایش ویسکوزیته قیر و به تبع آن افزایش سختی مخلوط های ساخته شده گردیده است. نمونه حاوی ۱۰۰ درصد پودر لاستیک مقدار افزایش کمتری نسبت به بقیه درصد های این دو افزودنی دارد. همچنین؛ به ازای



جدول ۴. مقادیر بهبود نتایج آزمایشات مورد بررسی نمونه های اصلاح شده نسبت به نمونه شاهد

Table 4. The percentage increase for samples containing additive to control sample in laboratory

نام آزمایش	درصد PET	درصد CR	درصد افزودنی به قیر	درصد افزایش
آزمایش کشش غیرمستقیم (تر)	۱۰۰	۰	۱۵	۱/۱۴
آزمایش کشش غیرمستقیم (خشک)	۷۵	۲۵	۱۵	۱/۱۴
آزمایش خزش دینامیکی	۲۵	۷۵	۱۵	۱/۵۲
آزمایش مدول برجهنگی	۲۵	۷۵	۱۵	۱/۵۰



شکل ۱۰. نتایج آزمایش آب جوشان

Fig. 10. Boiling water test results

### ۳-۵- آب جوشان

این روش که به عنوان یک آزمایش کیفی برای بررسی میزان عریان شدگی آسفالت به صورت مقایسه‌ای شناخته می‌شود، در اکثر تحقیقات مربوط به عریان شدگی مورد توجه قرار می‌گیرد. در این بخش، با ارائه عکس‌هایی، مخلوط‌های اصلاح شده و اصلاح نشده که با درصد قیرهای مختلف ساخته شده‌اند، مورد بررسی چشمی قرار می‌گیرند.

در اشکال ۱۰ مجموعه تصاویر مربوط به آزمایش آب جوشان نمایش داده شده است. روش مذکور، به عنوان یک آزمایش کیفی برای بررسی

مقدار پلی‌اتیلن در مخلوط سختی قیر کاهش می‌یابد، چرا که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری تغییر شکل‌های ماندگار در نمونه افزایش یافته است و مخلوط از خود رفتار ترموپلاستیک بیشتری نشان می‌دهد. این روند به ازای ۱۰٪ و ۱۵٪ افزودنی در قیر در نمونه‌ها مشاهده شده است. درصد بهینه، برای آزمایش خزش دینامیکی به ازای اضافه کردن ۷۵٪ پودر لاستیک و ۲۵٪ پلی‌اتیلن ترفتالات می‌باشد که دلیل این مهم، سخت شدن قیر به واسطه حضور پلی‌استر در مخلوط می‌باشد که باعث افزایش ویسکوزیته قیر و به تبع آن افزایش سختی مخلوط‌های ساخته شده گردیده است.



جدول ۵. مقادیر به دست آمده برای  $R^2$  و RMSE بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی

Table 5. Values obtained for  $R^2$  and RMSE between laboratory and numerical data

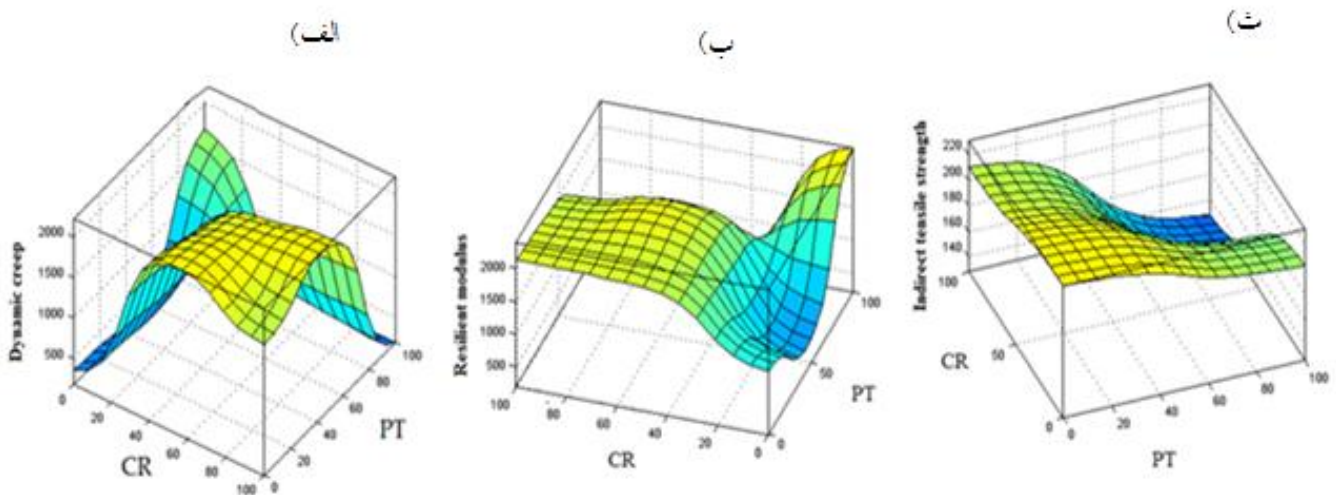
لایه خروجی	داده‌های آموزش داده شده		داده‌های تست شده		داده‌های صحت سنجی شده	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
آزمایش تست کشش غیرمستقیم	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۰/۹۷۴	۰/۰۰۰۲	۰/۹۰۵	۰/۰۰۳۵
خزش دینامیکی	۱	۰/۰۰۳۶	۰/۷۹۸	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۲	۰/۰۰۲۶
مدول برجهندگی	۰/۰۹۹۶	۰/۰۰۲۵	۰/۹۷۰	۰/۰۰۲۶	۰/۷۸۵	۰/۰۰۲۴

عدد روانی، مدول برجهندگی و کشش غیرمستقیم تر و خشک، تخمین زده می‌شود. به این منظور تمامی داده‌های آزمایشگاهی برای آزمایش‌های فوق، به سه دسته آموزش، تست و صحت سنجی تقسیم می‌شود و پس از ساخت مدل شبکه عصبی بر روی داده‌های آموزش داده شده، به تست و صحت سنجی شبکه با استفاده از داده‌های موجود در بخش تست و صحت سنجی پرداخته می‌شود. در نهایت، کارایی ANFIS بر اساس تحقیقات قبلی بر اساس دو پارامتر ( $R^2$  and MSE) مربع ضریب همبستگی  $R^2$  و ریشه میانگین مربع خطای بین مقادیر تخمینی و آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است [۲۶]. با توجه به تحقیقات پیشین، اگر مقدار  $R^2$  نزدیک به ۱ باشد و مقدار RMSE نزدیک به صفر است، شبکه عصبی کارایی مناسبی را برای تخمین مقادیر آزمایشگاهی دارد، به طوری که پیشنهاد می‌شود که اعتبار مدل‌های شبکه عصبی، با توجه به این دو پارامتر سنجیده شود. جدول دو این مقادیر را برای این مدل‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، ضریب  $R^2$  برای داده‌های صحت سنجی شده و تست مقادیری بالاتر از ۰/۷۵ دارد که با توجه به تحقیقات پیشین [۲۷ و ۲۸]، عددی قابل قبول می‌باشد، در داده‌های آموزش، داده‌های تخمینی از روی نتایج واقعی تخمین زده شده است که انتظار می‌رود در ساخت مدل عددی نزدیک به ۱ را داشته باشد که نشان دهنده‌ی آموزش حداکثری داده‌ها می‌باشد. با توجه به تحقیقات پیشین در زمینه‌ی ساخت مدل‌های عددی به منظور بررسی نتایج آزمایشگاهی، مقادیر  $R^2$  برای داده‌های آموزش، عددی نزدیک به یک و برای سایر داده‌ها با توجه به دقت مدل، مقادیر بالاتر از ۰/۷۵ را دارد [۲۷ و ۲۸].

میزان عریان شدگی آسفالت به صورت مقایسه‌ای شناخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که کمترین مقدار آب شستگی مربوط به نمونه حاوی پودر لاستیک تنها می‌باشد. همچنین با افزایش درصد PET در افزودنی، میزان آب شستگی افزایش یافته است و سنگ‌دانه‌هایی که بخشی از پوشش قیری خود را از دست داده‌اند بیشتر شده است. این پدیده همانند نتایجی که از مقاومت کششی غیرمستقیم به دست آمده می‌تواند ناشی از سخت شدن قیر در اثر وجود PET در مخلوط باشد که باعث افزایش ویسکوزیته قیر گردیده که همین امر مانع پوشش یکنواخت و کامل قیر بر روی سنگ‌دانه‌ها گشته و در نتیجه در مراحل انجام تست آب جوشان قیر از روی سنگ‌دانه جدا شده و سنگ‌دانه‌های بخشی از پوشش قیری خود را از دست داده‌اند. با در نظر گرفتن نتایج آزمایش کششی غیرمستقیم تر که به صورت یک سیکل کامل ذوب و انجماد انجام شده، در کنار نتایج آزمایش آب جوشان می‌توان چنین استدلال کرد که استفاده از افزودنی PET به تنهایی در مناطق سردسیر دارای مشکلات زیادی است ولی استفاده این ماده در کنار پودر لاستیک را می‌توان در مناطق سردسیر نیز استفاده کرد.

### ۳-۶- نتایج بخش عددی

پس از انجام آزمایش بر روی این دو افزودنی در آزمایشگاه، به بررسی عددی نتایج پرداخته شده است، بدین صورت که برخی پارامترها نظیر درصد افزودنی به ترکیب قیر، درصد پودر لاستیک در افزودنی دوگانه، درصد PET در افزودنی دوگانه به عنوان ورودی به شبکه عصبی معرفی می‌شود، پس از ساخت شبکه عصبی و گسترش آن، مقادیر به دست آمده برای آزمایش‌های



شکل ۱۱. نتیجه ANFIS برای تست کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی و خزش دینامیکی

Fig. 11. ANFIS result for experimental test

باشد، تغییر سطح بیشتر قابل مشاهده است. شکل ۱۱-ب، رابطه بین مدول برجهندگی و مقادیر پودر لاستیک را نشان داده است که مطابق با این شکل حداکثر مقدار مربوط به ۷۵٪ پودر لاستیک و ۲۵٪ PET است و با کاهش مقدار پودر لاستیک میزان تغییر سطح کاهش می‌یابد. شکل ۱۱-ث، تغییرات سطح آزمایش کشش غیرمستقیم را برای پودر لاستیک و PET نشان می‌دهد که آزمایش کشش غیرمستقیم به عنوان متغیر وابسته می‌باشد، این شکل حداکثر مقدار را ۵۰٪ پودر لاستیک و ۵۰٪ PET نشان می‌دهد و با افزایش مقدار پودر لاستیک و PET تغییر سطح کاهش می‌یابد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

تجزیه مواد پلیمری، مانند لاستیک فرسوده و ضایعات بازیافتی پلاستیک به صورت طبیعی نیاز به مدت زمان بسیار طولانی دارد. از این رو، یکی از این روش‌ها تجزیه فیزیکی یا به عبارت دیگر جدا نمودن لاستیک از الیاف نخی و سپس خرد کردن و فرآوری آن‌ها در اندازه‌های مختلف و مصرف مجدد آن در صنایع مختلف می‌باشد، همچنین استفاده از پودر لاستیک و پلی‌اتیلن ترفتالات به صورت جداگانه در مخلوط‌های آسفالت مسئله جدیدی است که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. در تحقیق حاضر به بررسی اثر هم‌زمان افزودنی دوگانه در نمونه‌های آسفالتی پرداخته شد که هدف اصلی این تحقیق بررسی خصوصیات رفتاری مخلوط‌های

مدل انفیس توانایی دارد نتایج آزمایشگاهی را به درستی پیش‌بینی کند زیرا مقدار  $R^2$  برای تمامی نتایج آزمایشگاهی تقریباً برابر با ۱ است و RMSE نزدیک به ۰ است. همچنین، مدل‌های انفیس ساخته شده در این تحقیق، قابلیت پیش‌بینی مقدار خروجی نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی را دارند. استفاده از مقادیر ضریب همبستگی و خطای مدل، اساسی‌ترین و پرکاربردترین پارامترهای متریک برای سنجیدن صحت شبکه می‌باشد که در تحقیقات مختلف به کار برده می‌شود، هدف اصلی ساخت این شبکه‌ها، برآورد مقادیر عددی برای آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه می‌باشد که در مدل‌های شبکه عصبی، میزان نزدیکی مقادیر تخمینی توسط مدل به مقادیر واقعی با این سه پارامتر متریک، بررسی می‌شود و مناسب بودن این مقادیر می‌تواند نشان دهنده دقت مدل در ارزیابی نتایج باشند [۲۹]. شکل ۵ تا ۹ این واقعیت را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ رابطه بین دو متغیر ورودی PET و پودر لاستیک و لایه‌های خروجی (مدول برجهندگی، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و خزش دینامیکی) را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۱۱-الف، تغییرات خزش دینامیکی مربوط به پودر لاستیک و PET می‌باشد که نشان دهنده این مهم می‌باشد که حداکثر تغییر خزش دینامیکی مرتبط با مقادیر ۵۰٪ پودر لاستیک و ۵۰٪ PET می‌باشد و با کاهش مقدار پودر لاستیک و PET تغییرات سطحی خزش دینامیکی کاهش می‌یابد، اما هنگامی که مقدار پودر لاستیک ۱۰۰٪ یا PET ۱۰۰٪

حاوی افزودنی با ۷۵ درصد پودر لاستیک و ۲۵ درصد PET بیشترین مقدار مقاومت خزشی را دارند. همچنین در این نوع از اصلاح کننده مخلوط حاوی ۱۵ درصد افزودنی مقاومت بیشتری دارد؛ و در حالت کلی جایگزینی بیشتر از این مقدار PET در مخلوط، به جای پودر لاستیک از مقدار مقاومت خزشی مخلوط می‌کاهد. به گونه‌ای که در مخلوط‌های حاوی ۱۰۰ درصد PET مقدار مقاومت خزشی کمی کمتر از نمونه شاهد به دست می‌آید.

- از نتایج آزمایش مدول نیز می‌توان نتیجه گرفت که کلیه افزودنی‌ها در هر دو درصد ۱۰ و ۱۵ باعث افزایش مدول استاتیکی مخلوط می‌شوند؛ و بهبود مدول استاتیکی با جایگزینی PET به جای پودر لاستیک روندی صعودی را طی می‌کند. به طوری که نسبت مدول استاتیکی نمونه حاوی ۱۵ درصد افزودنی PET تنها به نمونه شاهد حدود ۵۰ درصد می‌باشد.

- به کارگیری شبکه عصبی بر روی نتایج آزمایشگاهی در دهه اخیر مورد استقبال محققان قرار گرفته است و نتایج تحقیقات پیشین به منظور به کارگیری انواع شبکه‌های عصبی در بتن و آسفالت نشان داده است که استفاده از این شبکه می‌تواند در تخمین نتایج عددی مؤثر باشد، به کارگیری شبکه انفیس در این تحقیق نیز به منظور تخمین تمامی آزمایش‌ها انجام شده در بتن آسفالتی گرم، نشان داده است که می‌توان با به کارگیری شبکه‌های عصبی با خطای نسبتاً پایینی داده‌های آزمایشگاهی را تخمین زد.
- در نهایت با در نظر گرفتن کلیه نتایج بیان شده می‌توان ترکیب بهینه برای ساخت افزودنی دوگانه را ترکیبی از ۷۵ درصد پودر لاستیک و ۲۵ درصد PET بیان کرد که به مقدار ۱۵ درصد با قیر ترکیب می‌شوند.

- استفاده از افزودنی دوگانه پیشنهاد شده در تحقیق در کنار بازیافتی بودن دارای قیمت بسیار ناچیزی در مقابل قیمت قیر است و همین امر می‌تواند در کنار بهبود برخی از خصوصیات مخلوط آسفالتی حاصله، از نظر اقتصادی استفاده از این افزودنی را مقرون به صرفه نماید.

## منابع

- [1]. Xiao F, Zhao W, Gandhi T, Amirkhani SN. Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2010 Oct;22(10):1047-55.
- [2]. Jahanian HR, Shafabakhsh GH, Divandari H. Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite. *Construction and Building Materials*. 2017 Jan 30;131:156-64.

آسفالتی اصلاح شده افزودنی دوگانه از جنس PET و پودر لاستیک و تعیین درصد بهینه اختلاط این مواد می‌باشد. هدف از قرار دادن این دو ماه در کنار هم به عنوان افزودنی به دلیل خاصیت سخت شدگی توسط پلاستومر PET و نرم شدگی توسط الاستمر می‌باشد که بهینه‌ترین درصد استفاده از این دو ماده به عنوان جایگزین قیر معرفی می‌گردد. سپس، با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی به تخمین نتایج آزمایشگاهی پرداخته می‌شود و کارایی مدل‌های شبکه عصبی در تخمین نتایج ارزیابی می‌گردد. نتایج کلی این تحقیق عبارت‌اند از:

- نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می‌دهد که مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک در همه مخلوط‌های اصلاح شده نسبت به نمونه شاهد بهبود یافته است. در بهترین حالت، مقاومت کششی در حالت خشک مخلوط حاوی ۱۵ درصد افزودنی PET، نسبت به مخلوط شاهد حدود ۲۰ درصد بهبود یافته است. در حالی که مقاومت کششی غیرمستقیم برای نمونه‌هایی که یک دوره ذوب و انجماد را گذرانده‌اند، کمی متفاوت‌تر است. به این گونه که با افزایش درصد PET در افزودنی، مقدار مقاومت کمتر شده و در حالتی که در افزودنی بیشتر از ۵۰ درصد PET وجود داشته باشد، مقاومت کششی غیرمستقیم در این حالت کمتر از نمونه شاهد می‌شود؛ و در این شرایط بالاترین مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به نمونه حاوی ۱۵ درصد افزودنی پودر لاستیک تنها است که نسبت به نمونه شاهد ۱۴ درصد بهبود داشته است.

- نتایج مربوط به مقایسه مقاومت‌تر و خشک نشان می‌دهد مخلوط‌های حاوی افزودنی پودر لاستیک تنها و همچنین مخلوط‌های حاوی افزودنی ۷۵ درصد پودر لاستیک و ۲۵ درصد PET حساسیت رطوبتی مطلوبی دارند.

- نتایج آزمایش آب جوشان نشان داد که برای مخلوط‌های حاوی پودر لاستیک تنها، آب شستگی کمتری مشاهده می‌شود. ولی با اضافه شدن درصد PET در افزودنی، آب شستگی نیز افزایش یافته و سنگ‌دانه‌هایی که دچار عریان شدگی بیشتری هستند در این نمونه‌های بیشتر مشاهده می‌شوند. مقدار آب شستگی در افزودنی پودر لاستیک تنها در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد افزودنی کمتر از نمونه‌های با ۱۰ درصد افزودنی مشاهده می‌شود. ولی این مورد برای نمونه‌هایی که بیش از ۵۰ درصد PET دارند روند متفاوت‌تری را طی می‌کند به طوری که برای این نمونه‌ها تفاوت چندانی بین نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد افزودنی مشاهده نمی‌شود.

- نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان می‌دهد که مخلوط‌های

- Materials. 2009 Jul 1;23(7):2701-8.
- [13]. K k BV,  olak H. Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*. 2011 Aug 1;25(8):3204-12.
- [14]. Hamad GS, Jaya RP, Hassan NA, Aziz MM, MohdYusak MI. Influences of Crumb Rubber Size on Hot Mix Asphalt Mixtures (Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia).
- [15]. Wulandari PS, Tjandra D. Use of crumb rubber as an additive in asphalt concrete mixture (Doctoral dissertation, Petra Christian University).
- [16]. Wang H, Liu X, Zhang H, Apostolidis P, Scarpas T, Erkens S. Asphalt-rubber interaction and performance evaluation of rubberised asphalt binders containing non-foaming warm-mix additives. *Road Materials and Pavement Design*. 2018 Dec 28:1-22.
- [17]. Yusof NA, Ibrahim A, Noor MH, Tahir NM, Yusof NM, Abidin NZ, Osman MK. Deep convolution neural network for crack detection on asphalt pavement. *InJournal of Physics: Conference Series* 2019 Nov (Vol. 1349, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- [18]. Nivedya MK, Mallick RB. Artificial neural network-based prediction of field permeability of hot mix asphalt pavement layers. *International Journal of Pavement Engineering*. 2018 Sep 15:1-2.
- [19]. Hoang ND, Nguyen QL. Automatic recognition of asphalt pavement cracks based on image processing and machine learning approaches: a comparative study on classifier performance. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018;2018.
- [20]. Asi IM. Laboratory comparison study for the use of stone matrix asphalt in hot weather climates. *Construction and Building Materials*. 2006 Dec 1;20(10):982-9.
- [21]. Ishigami, A., Kodama, Y., Wagatsuma, T., & Ito, H. (2017). Evaluation of Structures and Morphologies of Recycled PC/PET Blends Fabricated by High-Shear Kneading Processing. *International Polymer Processing*, 32(5), 568-573.
- [4]. Ameri M, Nemati M, Shaker H. Experimental and numerical investigation of the properties of the Hot Mix Asphalt Concrete with basalt and glass fiber. *Frattura ed Integrit  Strutturale*. 2019 Aug 30;13(50):149-62.
- [5]. Ameri M, Nasr D. Performance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures. *Petroleum Science and Technology*. 2017 Jan 2;35(1):99-104.
- [6]. Naskar M, Chaki TK, Reddy KS. Effect of waste plastic as modifier on thermal stability and degradation kinetics of bitumen/waste plastics blend. *Thermochimica Acta*. 2010 Sep 20;509(1-2):128-34.
- [7]. Ahmadinia E, Zargar M, Karim MR, Abdelaziz M, Ahmadinia E. Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*. 2012 Nov 1;36:984-9.
- [8]. Ameri M, Nasr D. Properties of asphalt modified with devulcanized polyethylene terephthalate. *Petroleum Science and Technology*. 2016 Aug 17;34(16):1424-30.
- [9]. Ameri A, Ameri M, Shaker H, Karamroudi M. Laboratory Evaluating of Physical and rheological properties of modified bitumen Containing Crumb rubber and EVA. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*. 2020 Oct 22;6(3):1-2.
- [10]. Farazmand P, Hayati P, Shaker H, Rezaei S. Relationship between microscopic analysis and quantitative and qualitative indicators of moisture susceptibility evaluation of warm-mix asphalt mixtures containing modifiers. *Frattura ed Integrit  Strutturale*. 2020;14(51):215-24.
- [11]. Ameri M, Mohammadi R, Mousavinezhad M, Ameri A, Shaker H, Fasihpour A. Evaluating Properties of Asphalt Mixtures Containing polymers of Styrene Butadiene Rubber (SBR) and recycled Polyethylene Terephthalate (rPET) against Failures Caused by Rutting, Moisture and Fatigue. *Frattura ed Integrit  Strutturale*. 2020 May 19;14(53):177-86.
- [12]. Liu S, Cao W, Fang J, Shang S. Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt. *Construction and Building*

- Tang W, Cui H. Effect of nano-CuO on engineering and microstructure properties of fibre-reinforced mortars incorporating metakaolin: experimental and numerical studies. *Materials*. 2017 Oct;10(10):1215.
- [27]. Khotbehsara, M. M., Miyandehi, B. M., Naseri, F., Ozbakkaloglu, T., Jafari, F., & Mohseni, E. (2018). Effect of SnO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, and CaCO<sub>3</sub> nanoparticles on water transport and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash: Experimental observations and ANFIS predictions. *Construction and Building Materials*, 158, 823-834.
- [28]. Badarloo, B., Kari, A., & Jafari, F. (2018). Experimental and Numerical Study to Determine the Relationship between Tensile Strength and Compressive Strength of Concrete. *Civil Engineering Journal*, 4(11), 2787-2800.
- [29]. Ameri, M., Shaker, H., Badarloo, B., & Jafari, F. (2020). Numerical and Experimental Investigation on the Modified of Hot Mix Asphalt Concrete Containing Crumb Rubber and Waste Pet. *Tehnicki vjesnik*, 27(4), 1186-1193.
- [22] Peinado, V., Castell, P., García, L., & Fernández, Á. (2015). Effect of extrusion on the mechanical and rheological properties of a reinforced poly (lactic acid): reprocessing and recycling of biobased materials. *Materials*, 8(10), 7106-7117.
- [23]. Al-Qadi IL, Yoo PJ, Elseifi MA, Nelson S. Creep behavior of hot-mix asphalt due to heavy vehicular tire loading. *Journal of engineering mechanics*. 2009 Nov;135(11):1265-73.
- [24]. ASTM D. 4123-82,“. Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures. 1995.
- [25]. Tjaronge MW, Irmawaty R, Hustim M. Effect of portland composite cement and buton granular asphalt on indirect tensile strength of emulsified asphalt cold mix using limestone aggregate. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020 Jan (Vol. 419, No. 1, p. 012048)*. IOP Publishing.
- [26]. Ghanei A, Jafari F, Khotbehsara MM, Mohseni E,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ameri, M. Ameri, H. Shaker, F. Jafari, B. Badarloo, Evaluation of the dual additive effect of rubber powder and PET numerically and laboratory in Hot asphalt mixture, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 209-228.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18530.6887



