



Ferdowsi  
University of  
Mashhad

# Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: [civil-ferdowsi.um.ac.ir](http://civil-ferdowsi.um.ac.ir)



Journal of Ferdowsi  
Civil Engineering

ISSN 2780-2807

Vol. 35, No. 3  
Summer 2022

## Modelling of Rutting Behavior of Modified Polymer Asphalt Mixture using Artificial Neural Network\*

Research Article

Amir Aghasi<sup>1</sup>, Mohsen Torbatinejad<sup>2</sup>, Amir Bagherzadeh<sup>3</sup>

DOI: [10.22067/jfcej.2022.76444.1135](https://doi.org/10.22067/jfcej.2022.76444.1135)

### 1. Introduction

In the past few years, the increase in the severity and extent of damage on the road surface and the increase in traffic load and the reduction of budgets allocated to the road maintenance and repair sector have caused the performance improvement of the characteristics of asphalt pavements to be considered more than before. One of the most important damages caused in asphalt pavements is the deformation of asphalt surface and lack of pavement resistance against rutting, so that the estimation of rutting behavior at the design stage could have a significant impact on the long-term performance and service life of the pavement. Rutting occurs mainly in hot weather and in the wheel track of vehicles parallel to the longitudinal axis of the road. Considering the viscoelastic behavior and the influence of various parameters on the long-term properties of asphalt concrete, the estimation of pavement behavior is a complex task and requires appropriate methods and techniques. Therefore, the issue of modeling and predicting pavement parameters under the influence of various operational and environmental conditions is being developed.

In recent years, neural networks have been proposed as one of the best and most reliable innovative methods in predicting the behavior of materials. Considering the need to evaluate pavement performance in the design and service phase and the power and ability of neural networks in estimating material properties, the main goal of this research is to predict the creep and rutting behavior of asphalt concrete modified with polymer bitumen under the influence of environmental and structural variables of the mixture by using neural networks.

### 2. Data and method

For the production of asphalt mixtures, limestone materials from Asbcheran mine with grading No. 4 of Iran's Pavement Regulations were used. According to the regulation of asphalt paving of Iranian roads, the stone

materials used were within the permissible limits of the regulation. In this research, two types of bitumen 70/60 with performance Grade 64-22 and 100/85 with performance Grade 22-58 were used as reference bitumen in the production of asphalt mixtures, which were prepared from Jey Oil Refining Company. Bitumen quality tests were also conducted according to what was recommended in Iran's Pavement Regulations and the results were controlled with the permissible limits. In this study, SBS polymer was used in amounts of 2, 4 and 6 percentage of bitumen weight. To prepare the modified polymer bitumen with SBS, bitumen was first heated to 150°C and polymer was added to the bitumen in determined percentages. Then, the mixture of bitumen and polymer was heated to 180°C and the final mixing was done using a high shear mixer at a speed of 4000 rpm for a period of 60 minutes. After calculations, the optimal bitumen percentage of asphalt mixtures was determined to be 4.5% for making HMA asphalt mixtures modified with SBS polymer. The samples used in the creep test are cylinders with a diameter of 10 cm and a height of 7 cm.

In this research, the dynamic creep test is performed on control and polymer-modified asphalt samples according to the Australian Standard: AS 2891.12.1 air void is determined of 3 and 5% and stress level was 400 kPa and test temperatures was 40, 50 and 60°C. The main purpose of this test is to investigate the resistance of asphalt mixture against rutting.

Five input variables and one output variable are used in the modeling section. Based on this, the variables of this research are the type of bitumen, the percentage of SBS polymer, the test temperature, the percentage of air void, and the number of loading cycles in the dynamic creep test, which is a variable of the type of loading and based on 6 steps 600, 1200, 1800, 2400, 3000 and 3600 loading cycles were applied. In this research, neural networks with special capabilities in deducing the concepts from complex or ambiguous information are

\* Manuscript received: 28 April 2022, Revised, 25 May 2022, Accepted, 23 July 2022.

<sup>1</sup>. Corresponding author. Assistant Professor, Islamic Azad University of West Tehran Branch, **Email:** [Aghasi.Amir@wtiau.ac.ir](mailto:Aghasi.Amir@wtiau.ac.ir).

<sup>2</sup>. Assistant Professor, Hakim Jorjani Institute of Higher Education.

<sup>3</sup>. B.Sc. Faculty of Engineering, Tehran Islamic Azad University.

used in extracting methods that are complex and difficult for humans and other computer technicians to understand.

### 3. Results and Conclusion

After investigating the creep behavior of asphalt mixtures under the influence of the investigated variables, the optimal structure of the neural network model was determined in predicting the rutting performance of asphalt mixtures under the influence of effective variables, and the accuracy of the predicted results of cumulative strain of asphalt mixtures were determined using statistical indices. The following results were obtained:

- The effect of the type of bitumen and polymer showed that the use of polymer and bitumen PG64-22 reduces the cumulative strain of asphalt mixtures and, as a result, improves the rutting resistance of the pavement, and with the increase in the percentage of polymer, the performance of the asphalt mixture against rutting improves. The best resistance is related to the sample containing 6% is polymer with PG64-22 bitumen;
  - The simultaneous investigation of the structure and loading cycle on the creep behavior of the asphalt mixture shows that with increase in the number of loadings and the intensity of rutting, resistance in the mixture containing bitumen PG64-22 improves over time due to increase in bitumen hardness;
  - Investigation the impact of the number of loading showed that with the increase of the loading cycle, the permanent deformations created in the pavement increased significantly and the resistance of the mixture against rutting decreased. Moreover, the addition of polymer with proper and positive performance reduces this rate and improves the process of reducing the resistance and increasing the creep of asphalt mixtures;
  - The values of strains between 1800 and 3600 cycles showed that the results for samples containing 2, 4 and 6 percent of polymer are 48, 28 and 16 percent, respectively. Based on these values, SBS polymer by increasing the hardness and viscosity of asphalt mastic increases the strength of the asphalt mixture, and this positive effect is better manifested by increasing the percentage of polymer and loading cycle;
  - Measuring the impact of air void on creep behavior showed that increasing the percentage of air void in asphalt mixtures increases the permanent deformations and cumulative strains in the mixture, so that with the increase of the percentage from 3 to 5, the creep graph of the asphalt mixtures increased greatly in terms of slope and the created deformations increased significantly;
  - The results of the modeling section showed that the 5-10-10-10 model has the best performance and the model performs very well in terms of predicting creep behavior and rutting resistance of polymer modified asphalt mixtures.
- The examination of the correlation coefficient between the experimental and predicted data showed that the value of  $R^2$  is 0.987, that there is a significant relationship between the data, and the structure chosen for the neural network model has been able to predict the data well in the training and testing section;
  - Examining the error percentage of the model based on the difference between the predicted and experimental values shows that the minimum, maximum and average values are 0.00076, 13.81 and 0.51 respectively. Based on the results, a small average error percentage can be observed, which can be said that the model has good power and efficiency in estimating the rutting behavior of polymer asphalt mixture under the studied variables.
-



## ارائه مدل شیارشدگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده پلیمری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی\*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcej.2022.76444.1135

امیر باقرزاده<sup>۳</sup>

محسن تربتی نژاد<sup>۲</sup>

امیر آقاسی<sup>۱</sup>

**چکیده** شیارشدگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌های ایجاد شده در روسازی‌های آسفالتی می‌باشد که خطرات جدی را برای استفاده‌کنندگان از راه ایجاد می‌کند. هدف از این تحقیق بررسی مقاومت خزشی آسفالت در شرایط مختلف از جمله درصد‌های مختلف پلیمر، درصد فضای خالی، دما و تعداد سیکل بار است. همچنین نتایج با کمک شبکه عصبی مدل‌سازی شده اند. بر اساس یافته‌های این تحقیق، قیر ۶۰-۷۰ عملکرد بهتری در برابر شیارشدگی دارد و افزایش پلیمر موجب بهبود عملکرد آن می‌شود. از طرف دیگر مقاومت شیارشدگی مخلوط رابطه معکوس با سیکل بارگذاری دارد. اما وجود پلیمر باعث کاهش نرخ افت مقاومت شیارشدگی بر اثر افزایش سیکل می‌شود. در نهایت نتایج مدل‌سازی نشان داد، مدل شبکه عصبی از نظر پیش‌بینی رفتار خزشی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده پلیمری عملکرد بسیار خوبی دارد.

**واژه‌های کلیدی** مخلوط‌های آسفالتی، قیر پلیمری، شیارشدگی، شبکه عصبی، مدل پیش‌بینی.

## Modelling of Rutting Behavior of Modified Polymer Asphalt Mixture using Artificial Neural Network

Amir Aghasi

Mohsen Torbatinejad

Amir Bagherzadeh

**Abstract** Rutting is one of the most important damages caused in asphalt pavements, which creates serious risks for road users. The purpose of this research is to investigate the creep resistance of asphalt in different conditions including different percentages of polymer, percentage of air void, temperature and number of load cycles. Also, the results have been modeled with the help of neural network. According to the findings of this research, bitumen with penetration degree 60 to 70 millimeter has a better performance against rutting and the increase of polymer improves its performance. On the other hand, the rutting resistance of the mixture has an inverse relationship with the loading cycle. But the presence of polymer reduces the rate of drop in creasing resistance due to increased cycle. Finally, the modeling results showed that the neural network model performs very well in terms of predicting creep behavior and rutting resistance of polymer modified asphalt mixtures.

**Key words** Asphalt mixtures, polymer bitumen, rutting, neural network, prediction model.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۲/۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۵/۲ می‌باشد.

Email: Aghasi.Amir@wtiau.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، راه و ترابری، استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب.

(۲) کارشناسی ارشد عمران، برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه سراسری گلستان، عضو هیئت علمی مؤسسه آموزش عالی حکیم جرجانی گرگان.

(۳) کارشناسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب.

## مقدمه

افزایش قیمت قیر و هزینه‌های ترمیم و بهسازی روسازی‌های آسفالتی در چند سال اخیر موجب شده‌است تا محققان این حوزه بر ارزیابی دقیق‌تر پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی تمرکز جدی‌تری داشته باشند. به طوری که علاوه بر افزایش قیمت قیر و هزینه‌های اجرایی، کاهش بودجه‌های عمرانی و مشکلات اقتصادی در سطح کلان نیز موجب شده‌است تا اهمیت استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته و ایده‌های جدید در صنعت روسازی بیش از گذشته احساس شود. بر همین اساس، سنجش رفتار روسازی‌های آسفالتی تحت تأثیر متغیرهای عملکردی و محیطی می‌تواند موجب بهبود شرایط اجرایی در زمان طراحی و نگهداری و کاهش هزینه‌های سنگین آزمایشگاهی شود.

یکی از مهم‌ترین خرابی‌های ایجادشده در روسازی‌های آسفالتی، تغییر شکل‌های ایجادشده در سطح آسفالت و عدم مقاومت روسازی در برابر شیارشدگی می‌باشد. به طوری که تخمین رفتار شیارشدگی در مرحله طراحی می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر عملکرد بلندمدت و عمر خدمت‌دهی روسازی داشته باشد. شیارشدگی عمدتاً در هوای گرم و در مسیر چرخ وسایل نقلیه به موازات محور طولی راه رخ می‌دهد و هزینه‌های سنگینی صرف تعمیر روسازی‌های تخریب‌شده می‌شود. شیارشدگی به دلیل تأثیر به‌سزای آن بر کیفیت خدمت‌دهی روسازی و مشکلات اساسی و ایمنی که در ساختار روسازی ایجاد می‌کند، جزو خرابی‌های سازه‌ای و بنیادی مطرح می‌شود. عوامل مختلفی از جمله تکرار بارگذاری ناشی از عبور وسایل نقلیه سنگین، کیفیت نامناسب مخلوط آسفالتی، شرایط محیطی و دمایی، جنس و نوع دانه‌بندی مصالح سنگی و خصوصیات فنی قیر مصرفی تأثیر قابل توجهی بر شدت و مقدار شیارشدگی دارند [1-4]. شیارشدگی معمولاً در لایه‌های آسفالتی و لایه‌های غیر محدود زیرین رخ می‌دهد و معمولاً به شکل فرورفتگی سطحی در مسیرهای چرخ و بر اثر تنش‌های برشی افقی ناشی از اصطکاک لاستیک در هنگام ترمزگیری مکرر خودروها و در قسمت‌های طولانی و شیب‌دار بزرگراه‌ها رخ می‌دهد [3]. تغییر شکل‌های دائمی رخ داده در روسازی از ترکیب سه مد مختلف تخریب مواد و مصالح روسازی، تراکم لایه‌های آسفالتی و تغییر شکل‌های پلاستیکی جانبی تشکیل می‌شود. تخریب مواد ناشی از وجود مصالح باکیفیت نامناسب و مقاومت پایین است و سهم کمی از عمق شیارشدگی را در بر می‌گیرد. درحالی‌که تراکم لایه آسفالتی

و تغییر شکل‌های پلاستیک دو دلیل مهم بروز تغییر شکل‌های اساسی در روسازی هستند و باعث رفتار خزشی می‌شوند [5]. تراکم لایه‌های آسفالتی عامل اولیه شیارشدگی در مراحل اولیه خدمت‌دهی روسازی آسفالتی است و فضای خالی بیشتر در روسازی با بروز تغییر شکل‌های دائمی و شیارشدگی رابطه مستقیم دارد [6].

در چند سال گذشته افزایش شدت و گستره خرابی‌ها در سطح جاده‌ها و ازدیاد بار ترافیک و کاهش بودجه‌های اختصاص‌یافته به بخش تعمیر و نگهداری راه موجب شده‌است تا اصلاح خصوصیات روسازی‌های آسفالتی بیش از قبل مورد توجه قرار گیرد. به طوری که در چند سال گذشته روش و تکنولوژی‌های مختلفی در راستای بهبود کیفیت و خدمت‌دهی روسازی‌ها استفاده شده‌است. هدف از بررسی و اجرای همه این روش‌ها، بهبود خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی از نظر فنی و عملکردی می‌باشد. این در حالی است که علاوه بر بحث فنی، جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی افزودنی‌های مصرفی در صنعت روسازی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طوری که در چند سال گذشته، استفاده از مواد مختلف تحت عنوان اصلاح‌کننده‌های خواص روسازی مطرح شده‌است و هرکدام با توجه به ویژگی‌ها و خواص منحصر به فرد خود، توانسته‌اند مورد توجه محققان و مجریان قرار گیرند

در سال‌های اخیر محققان علم روسازی، به دنبال روش‌های جایگزین با سرعت بالا و هزینه کم جهت پیش‌بینی رفتار روسازی هستند. تجربه‌های علمی نشان داده‌است استفاده از مدل‌های کارآمد و مناسب در هر سیستم می‌تواند موجب تأثیر قابل توجهی بر دقت برنامه‌ریزی‌های عملیاتی و بهینه‌سازی تخصیص بودجه داشته باشد. با توجه به رفتار ویسکوالاستیک و تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر خصوصیات بلندمدت بتن آسفالتی، تخمین رفتار روسازی کار پیچیده‌ای است و روش‌ها و تکنیک‌های مناسبی را طلب می‌کند. بنابراین، موضوع مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای روسازی تحت تأثیر شرایط مختلف اجرایی و محیطی در حال توسعه است. در سال‌های اخیر، شبکه‌های عصبی به عنوان یکی از بهترین و قابل اعتمادترین روش‌های ابتکاری در پیش‌بینی رفتار مواد مطرح شده‌است. شبکه‌های عصبی با پردازش داده‌های تجربی قانون نهفته بین متغیرهای یک مدل را شناسایی کرده و به نحوی مناسب و با سرعت بالا به ساختار شبکه انتقال می‌دهد. برخی از ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه‌های عصبی از جمله تفکیک الگوها، رباتیک، کنترل، یادگیری نگاشت خطی و یا

طریق پروتون‌های آروماتیک واکنش انجام می‌دهند. برآیند این فعل‌وانفعال موجب می‌شود تا پلیمر SBS با واکنش با قیر و جذب مالتین موجود در قیر، منجر به تشکیل زنجیره پلیمری و بهبود خواص الاستیک و شکل‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی شود [7-9]. در ادامه بخشی از مهمترین مطالعات این حوزه مورد بررسی قرار گرفته‌است.

زیاری و همکاران [10] در دانشگاه علم و صنعت، با توجه به تأثیر منفی رطوبت بر در مخلوط‌های آسفالتی گرم، به بهبود خصوصیات روسازی در برابر شرایط جوی پرداختند. آن‌ها با این رویکرد که تغییر در نوع دانه‌بندی و استفاده از قیرهای اصلاح‌شده تأثیر به‌سزایی در کاهش نفوذ آب به سنگ‌دانه‌ها و در نتیجه کاهش حساسیت رطوبتی داشته باشد، به ارزیابی تأثیر انواع پلیمر ترموپلاستیک الاستومرها بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان داد، با افزایش درصد پلیمر، مدول برجهنگی و نسبت آن، مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم، شاخص حساسیت رطوبتی و همچنین استقامت مارشال و نسبت تر به خشک آن افزایش یافته و نتایج بهتری در درصد‌های بالا نسبت به SBS 5٪ از خود نشان می‌دهند.

در تحقیقی که با رویکرد نقش مکمل و هم‌زمان مواد افزودنی توسط ساعدی و همکاران [11] سال ۱۳۹۶ انجام شد، تأثیر SBS و الیاف بر عملکرد مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه بررسی شد. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که نمونه‌های حاوی SBS به‌تنهایی ترکیب پلیمر و الیاف به طرز قابل‌توجهی تغییر شکل پلاستیک روسازی را کاهش می‌دهد و مقاومت شیارشدگی را بهبود می‌بخشد. همچنین، استفاده هم‌زمان SBS و الیاف در آسفالت می‌تواند علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، تأثیر شایانی در مقابله با پدیده شیارشدگی ایفا کند و گزینه مناسبی برای مناطق گرم و دارای ترافیک سنگین محسوب گردد.

در یکی دیگر از مطالعات بررسی خواص مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده پلیمری در سال ۱۳۹۶ که توسط صاحب‌الزمانی و همکاران [12]، این بار و باهدف تسهیل استفاده از پلیمر در مخلوط‌های آسفالتی، از گرانول پلیمری SBS در حین فرایند تولید آسفالت در کارخانه آسفالت و به‌طور مستقیم به داخل میکسر استفاده شد. برای سنجش رفتار مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر اضافه کردن خشک پلیمر، سختی و خصوصیات مقاومتی بتن آسفالتی در برابر ترک‌های حرارتی،

غیرخطی و قابلیت یادگیری، پردازش توزیعی و قابلیت تعمیر دهی موجب شده‌است تا نگاه ویژه‌ای به این روش در سطح کاربردی شود. به‌طوری‌که، استفاده از شبکه‌های عصبی در زمینه‌های مختلف مهندسی عمران و در تحلیل مسائل پیچیده به‌دلیل قابلیت بالای آن‌ها در پیش‌بینی رفتار مواد رواج زیادی پیدا کرده‌است و به‌عنوان جایگزینی مناسب نسبت به روش‌های سنتی مطرح شده‌است.

با توجه به مباحث مطرح‌شده، با توجه به نیاز ارزیابی عملکرد روسازی در مرحله طراحی و خدمت‌دهی و قدرت و توانایی شبکه‌های عصبی در تخمین خصوصیات مواد، هدف اصلی این پژوهش پیش‌بینی رفتار خزشی و شیارشدگی بتن آسفالتی اصلاح‌شده با قیر پلیمری تحت تأثیر متغیرهای محیطی و ساختاری مخلوط به کمک شبکه‌های عصبی قرار داده‌شده‌است.

### مرور بر مطالعات پیشین

افزایش وسایل نقلیه و عدم توجه جدی به ترمیم و نگهداری راه‌ها در چند سال اخیر باعث شده‌است تا خرابی‌ها جاده‌ها به شکل قابل‌توجهی افزایش یابد. به‌طوری‌که امروزه، سطح زیادی از جاده‌های کشور دچار خرابی‌های شدید و گسترده شده‌اند و این موضوع تحقیقات علمی زیادی برای برون‌رفت از مشکل را طلب می‌کند.

مواد پلیمری، از رایج‌ترین و پرکاربردترین مواد افزودنی می‌باشد که با تشکیل شبکه پلیمری موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت و استحکام روسازی‌های آسفالتی می‌شود. پلیمرها با تشکیل زنجیره سه‌بعدی پلیمری در قیر باعث می‌شود تا خواص الاستیک و شکل‌پذیری مخلوط به‌طور قابل‌توجه بهبود یابد و مقاومت شیارشدگی و عمر خستگی روسازی افزایش یابد.

در چند سال گذشته، پلیمر SBS به‌دلیل خواص منحصر به فرد و ویژه به‌طور قابل‌توجهی مورد توجه ویژه قرار گرفته و برخلاف سایر افزودنی‌ها علاوه بر تحقیقات آزمایشگاهی، به‌طور جدی در روسازی جاده و مسائل اجرایی ورود کرده و نتایج بسیار مطلوبی را نیز نشان داده‌است. این پلیمر از زنجیره سه‌بلوکی استایرن- بوتادین- استایرن با دامنه پلی استایرن سفت و محکم و پلی بوتادین انعطاف‌پذیر تشکیل می‌شود. ساختار پلیمر SBS به‌گونه‌ای می‌باشد که بلوک‌های پلی بوتادین با گروه‌های بار مثبت در قیر از طریق الکترون‌های  $\pi$  تعامل برقرار می‌کنند و بلوک‌های پلی استایرن با گروه‌های الکترونی قیر از

آب و هوایی ایران می‌شود.

در زمینه استفاده از شبکه عصبی در زمینه مدل‌سازی رفتار مخلوط‌های آسفالتی نیز مطالعاتی صورت گرفته‌است. دیواندردی و همکاران [19] سال ۱۳۹۷ در راستای استفاده از شبکه‌های عصبی و پیش‌بینی رفتار مخلوط‌های آسفالتی، این بار از شبکه‌های عصبی در تخمین مقاومت شیارشدگی استفاده کردند. آن‌ها در مطالعه خود بیان کردند که شیارشدگی یکی از شایع‌ترین انواع خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی است و افزایش میزان تغییر شکل‌های ماندگار که خود منجر به افزایش عمق شیار می‌گردد، می‌تواند مشکلات جدی در روسازی راه‌ها ایجاد نماید. بر همین اساس، هدف این مطالعه را تخمین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی و تعیین پارامترهای مستقیم و تأثیرگذار در این خصوص بیان کردند. برای طراحی مدل شیارشدگی از مصالح سنگی سیلیسی و آهکی، دانه‌بندی‌های شماره ۵ و ۴، قیر و ۶۰-۱۰۰-۷۰-۸۵ و فیلر پودر سنگ و آهک استفاده شد. یافته‌های این مطالعه نشان داد، برای مصالح سنگی سیلیسی در شرایط مشابه، عمق شیار حاصل از دستگاه ویل تراک با فیلر پودر سنگ بیشتر از نمونه‌هایی بود که فیلر آهک در ساخت آن‌ها استفاده شده بود. همچنین، مخلوط‌های حاوی مصالح آهکی با فیلر پودر آهک، به مراتب مقاومت شیارشدگی کمتری نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده از مصالح سیلیسی را داشتند. در نهایت نتایج بخش مدل‌سازی نشان داد، بهترین ساختار دارای ضریب ۰/۹۲ در مرحله آموزش و ۰/۹۰ در مرحله آزمایش می‌باشد و مدل طراحی شده با شبکه عصبی قدرت و توانایی مناسبی در پیش‌بینی رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر جنس مصالح سنگی و فیلر دارد.

سال ۱۳۹۸ خیبری و همکاران [20] با هدف بررسی خصوصیات لغزندگی روسازی‌ها تحت تأثیر متغیرهای مؤثر، از شبکه‌های عصبی استفاده کردند. آن‌ها در مطالعه خود، تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر مشخصات بافت رویه و مصالح سنگی، شرایط آب و هوایی، تغییرات فصلی و آلودگی سطح جاده را بر روی مقاومت لغزندگی موردسنجش قراردادند. در این مطالعه مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده تحت تأثیر آلاینده‌هایی نظیر، ریزگردها، ماسه‌بادی، روغن، پودر لاستیک، دوده آگروز و رنگ سرد ترافیکی در درجه حرارت و رطوبت‌های مختلف تحت آزمایش آونگ انگلیسی قرار گرفته‌اند. یافته‌های این مطالعه نشان داد، حضور آلاینده‌ها تأثیر قابل توجهی بر مقاومت لغزندگی روسازی دارد و در حالت خشک بیشترین کاهش به دست آمده در عدد

ترک‌های خستگی، شیارشدگی مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های این مطالعه نشان داد، خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گرانول پلیمری دارای نتایج مشابهی در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از قیر اصلاح شده با SBS و به طور قابل توجهی خواص مخلوط آسفالتی بهبود می‌یابد.

فخری و همکاران [13] سال ۱۳۹۷ در مطالعه‌ای با هدف سنجش مقاومت شیارشدگی و خواص خودترمیم بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر انجام شد، یافته‌ها نشان داد نتایج نشان داد که پلیمر الاستومرها SBS با افزایش خاصیت الاستیکی قیر بیشترین قابلیت بازیابی را برای نمونه‌های آسفالتی فراهم آورده‌است. در حالی که پلیمر SBS با ایجاد ۶۰ درصد قابلیت بازیابی، دارای بیشترین عمر خستگی و بالاترین مقاومت شکست در برابر بارهای ترافیکی می‌باشد.

ارزیابی عمر خستگی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پلیمر SBS همواره به عنوان یکی از چالش‌های محققان بوده‌است و تحقیقات زیادی در این خصوص انجام شده‌است. در همین خصوص، سنجش رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی با آزمایش‌های پیشرفته توسط صبوری و همکاران [14] سال ۲۰۱۸ نشان داد، SBS با ایجاد شبکه پلیمری در قیر و بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی، موجب افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. همچنین خدایی و همکاران [15] در سال ۲۰۰۹ در دانشگاه امیر کبیر نشان دادند SBS به طور قابل توجهی موجب بهبود مقاومت شیارشدگی و کاهش تغییر شکل‌های ماندگار در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و مخلوط حاوی قیر با ۵ درصد پلیمر عملکرد شیارشدگی بهتری نسبت به مخلوط‌های حاوی ۴ و ۶ درصد SBS دارد و به عنوان درصد بهینه این افزودنی می‌باشد.

در مطالعات مربوط به بررسی تأثیر پلیمر بر خواص قیرها نتایج مقالات و تحقیقات انجام شده توسط میرزاییان و همکاران [16]، افلاکی و همکاران [17] و جعفری و همکاران [18] در بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ نشان داد پلیمر SBS موجب کاهش حساسیت دمایی قیرها در دمای بالا و بهبود رده عملکردی قیر می‌شود ولی تأثیر قابل توجهی بر رفتار دمای پایین قیرها ندارد. همچنین، پلیمر SBS به قیر موجب بهبود خواص پیرشدگی و افزایش مقاومت قیر در برابر صدمات وارده ناشی از پیرشدگی می‌شود و با افزایش درجه عملکردی دمای بالا و پایین، موجب بهبود رده عملکردی قیر و در نهایت پوشش مناطق مختلف

خستگی آزمایش خستگی تیر خمشی و معیار سختی استفاده شده است. برای به دست آوردن مدل خستگی، از نتایج آزمایش‌های مدول برجهنگی و مقاومت کشش غیرمستقیم آسفالت، سختی خزشی قیر در آزمایش BBR در دمای ۱۲-، ویسکوزیته قیر و درصد قیر استفاده شده است. نتایج به دست آمده بیان کرد مدل حاصل از شبکه عصبی دقت و ضریب همبستگی بسیار بالاتری نسبت به مدل خطی دارد. هم‌چنین، نتایج بخش تحلیل حساسیت نشان داد، سختی خزشی قیر در دمای ۱۲- بیشترین تأثیر را بر سختی آسفالت در دمای ۵ درجه و مقاومت کشش غیرمستقیم آسفالت بیشترین اثر را بر سختی آسفالت در دمای ۲۰ دارد.

وو و همکاران [24] سال ۲۰۱۴ به بررسی عامل شدت تنش در ارائه مدل ترک‌های خستگی و انعکاسی ایجاد شده در روسازی به کمک شبکه عصبی پرداختند. در این مطالعه از متغیرهای مدول دینامیکی آسفالت، ضخامت آسفالت، مدول دینامیکی اساس، ضخامت اساس، مدول دینامیکی خاک بستر، طول ترک و نسبت طول ترک به ضخامت لایه رویه استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد هر دو مدل رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی دارای مقبولیت بالایی در پیش‌بینی خرابی‌های ایجاد شده در روسازی بر اثر شدت تنش وارده دارند ولی با توجه به ضریب همبستگی بالاتر و نسبت خطای کم‌تر مدل شبکه عصبی، اعتبار و کارایی این مدل نسبت به مدل رگرسیونی بیش‌تر می‌باشد.

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، با وجود مطالعات انجام شده در خصوص اصلاح مشخصات فنی آسفالت با SBS و استفاده از شبکه‌های عصبی در تخمین متغیرهای روسازی‌های آسفالتی، اما تاکنون مطالعه‌ای در خصوص پیش‌بینی رفتار شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از شبکه‌های عصبی انجام نشده است. لذا نتایج این تحقیق می‌تواند کمک شایانی در کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و افزایش سرعت و دقت مراحل طراحی داشته باشد.

## متدولوژی و روش مدل‌سازی

### مواد و مصالح

**مصالح سنگی.** جنس و دانه‌بندی مصالح سنگی تأثیر به‌سزایی بر عملکرد و باربری روسازی‌های آسفالتی دارد. به‌طوری‌که مصالح

لغزندگی هنگامی است که سطح از ماسه‌بادی پوشیده شده باشد و در حالت مرطوب نیز حضور رنگ سرد ترافیکی موجب کاهش عدد لغزندگی را در پی داشته است.

سال ۱۳۹۹ فرج‌الهی و همکاران [21] در تحقیقی از شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی شاخص وضعیت روسازی (PCI) و به‌منظور شناسایی بهینه‌ترین زمان تعمیر و نگهداری در جهت کاهش هزینه‌ها استفاده کردند. در این تحقیق به‌منظور مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی، از دو مدل رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی انتشار برگشتی استفاده شد و خرابی‌های سه آزادراه کربلا، پل زال و تهران - قم مورد بررسی قرار گرفتند. پارامترهای ورودی به شبکه عصبی شامل طول عمر قطعه در زمان بازرسی، عرض واحد نمونه، متوسط ترافیک عبوری، متوسط درصد وسایل نقلیه سنگین در طول عمر قطعه، بیشینه دما در طول عمر قطعه، کمینه دما و ضخامت روسازی انتخاب شدند. یافته‌های این پژوهش نشان داد، میزان عملکرد مدل شبکه عصبی بر اساس شاخص میانگین مربعات خطا و هم‌چنین شاخص ضریب همبستگی به ترتیب برابر است با ۰/۹۵ و ۰/۸۷ می‌باشد که در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چندگانه دارای قدرت و دقت بیشتری برای پیش‌بینی وضعیت آینده روسازی می‌باشد.

فخری و همکاران [22] سال ۱۴۰۰ در مطالعه‌ای که باهدف مدیریت و نگهداری اصولی راه‌ها برنامه‌ریزی شده بود، با استفاده از شبکه‌های عصبی شاخص بین املی ناهمواری روسازی را برحسب متغیرهای خرابی سطحی پیش‌بینی کردند. هدف اصلی این پژوهش بر مبنای تعیین تأثیر خرابی‌های سطحی بر ناهمواری روسازی و ایجاد رابطه همبستگی برای تخمین شاخص بین‌الملل ناهمواری و سرعت رشد ناهمواری قرار داده شد. با استفاده از نتایج این مطالعه، ابتدا تأثیر خرابی‌های سطحی بر شاخص بین‌المللی ناهمواری تعیین شد و هم‌چنین استفاده از شبکه عصبی مدلی کم‌هزینه برای متولیان راه برای تخمین شاخص ناهمواری و نرخ رشد ناهمواری بر اساس خرابی‌های سطحی در سطح شبکه مطرح شد تا علاوه بر دید مناسب در مرحله طراحی و نگهداری، به شناخت روند اضمحلال و سیاست‌ها و اقدامات تعمیر و نگهداری نیز کمک شایانی شود.

ژیایو و همکاران [23] سال ۲۰۰۹ با استفاده از شبکه‌های عصبی به پیش‌بینی رفتار آسفالت لاستیکی شامل مصالح سنگی بازیافتی و عمر خستگی آن‌ها بر اساس سختی آسفالت و به کمک شبکه عصبی پرداختند. در این مطالعه جهت پیش‌بینی عمر

جدول ۲ خصوصیات قیر مصرفی

عنوان آزمایش ها	قیر ۷۰-۱۰۰	قیر ۶۰	روش های آزمایش
درجه نفوذ، ۰/۱ mm، ۲۵°C @	۸۵	۶۶	ASTM D5
نقطه نرمی، °C	۴۳/۳	۴۸/۵	ASTM D36
چگالی، ۶۰°F @، Kg/M3	۱۰۰۲	۱۰۱۴	ASTM D3289
دمای نقطه اشتعال، °C	۳۱۲	۳۳۵	ASTM D92

پلیمر و قیر پلیمری تولید شده. در این پژوهش با توجه به تأثیرات مثبت پلیمر SBS در خواص اصلاح کنندگی قیر و آسفالت، برای بهبود عملکرد قیر و مخلوط های آسفالتی از آن استفاده شده است. در این مطالعه از پلیمر SBS ساخت شرکت پلیمر پیشرفته دانا در قیرها و مخلوط های آسفالتی به میزان ۲، ۴ و ۶ استفاده شده است. مقادیر انتخاب شده برای پلیمر و نیز شیوه اختلاط پلیمر در قیر بر اساس مطالعات قبلی [16, 25, 26] انتخاب شده و به دلایل زیر درصد بالاتر افزودنی توصیه نمی شود:

- قیمت بالای افزودنی و عدم توجیه مالی و اقتصادی
- افزایش قابل توجه ویسکوزیته قیر و عدم کارایی لازم در زمان اجرا و تراکم
- تأثیر منفی درصد های بالاتر افزودنی بر خواص دمای پایین و ویسکوزیته قیر
- احتمال دو فاز شدن و عدم ذخیره سازی مناسب قیر های پلیمری حاوی درصد های بالای SBS

مشخصات SBS مصرفی در جدول (۳) نشان داده شده است. برای تهیه قیر های اصلاح شده پلیمری با SBS، ابتدا قیر در حدود ۱۵۰ درجه سانتی گراد گرم شدند و پلیمر در درصد های تعیین شده به قیر اضافه شد. سپس مخلوط قیر و پلیمر تا ۱۸۰ درجه سانتی گراد گرم و با استفاده از همزن برش بالا در سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت زمان ۶۰ دقیقه اختلاط نهایی انجام شد. خصوصیات قیر های اصلاح شده بر اساس نوع و مقدار مواد افزودنی در جدول (۴) نشان داده شده است.

سنگی در واقع استخوان بندی و ساختار اصلی مخلوط آسفالتی است و نقش مهمی بر مقاومت در برابر خرابی روسازی دارد. سنگدانه های مصرفی در مخلوط های آسفالتی باید از لحاظ اندازه دانه ها در محدوده معینی باشد و نسبت معینی از هراندازه وجود داشته باشد. جهت تهیه مخلوط های آسفالتی از مصالح آهکی از معدن اسب چران رودهن با دانه بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی ایران استفاده شده است. مصالح سنگی مصرفی طبق آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران در حدود مجاز آیین نامه بوده است و از نظر حداقل میزان شکستگی، حداکثر سایش و حداکثر جذب آب را تأمین می کند. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در این مطالعه، در جدول (۱) نشان داده شده است.

قیر. در این پژوهش از دو نوع قیر ۶۰/۷۰ با رده عملکردی PG58-22 و ۸۵/۱۰۰ با رده عملکردی PG64-22 به عنوان قیر های مرجع در ساخت مخلوط های آسفالتی استفاده شده است که از پالایشگاه نفت جی تهیه شده است. آزمایش های کیفی قیر نیز مطابق آنچه در نشریه ۲۳۴ توصیه شده است، انجام و نتایج با حدود مجاز نشریه کنترل شد. خصوصیات قیر های مصرفی در این مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات مصالح سنگی مصرفی

شرح آزمایش	نتایج آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		استاندارد آزمایش
		آستر	رویه	
حداکثر سایش به روش لوس آنجلس (درصد)	۲۵	۴۰	۳۰	T 96
حداکثر ضریب تورق با روش BS812 (درصد)	۱۴	۳۰	۲۵	-
حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴	۹۶	۸۰	۹۰	D5821
حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)	۰/۹	۲/۵	۲/۵	T 85
حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)	۱/۷	۲/۸	۲/۵	T 84





شکل ۱ پلیمر SBS و نحوه اختلاط آن با قیر

جدول ۳ مشخصات پلیمر SBS مصرفی

خواص	روش آزمایش	واحد	مقدار و مشخصات	محدوده و مشخصات
حالت فیزیکی	-	-	جامد	-
رنگ	-	-	سفید	-
مقدار استایرن	ASTM D5775	%	۳۰	۲۹/۵ ~ ۳۲/۵
چگالی نسبی	ASTM D792	-	۰/۹۴	N/A
ماده فرار	ASTM D5668	%	۰/۲۵	≤ ۰/۵

جدول ۴ شرایط قیرهای اصلاح شده

کد نمونه	نوع قیر پایه	درصد قیر خالص	درصد پلیمر SBS
PG58_S0	PG 58-22	۱۰۰	۰
PG64_S0	PG 64-22	۱۰۰	۰
PG58_S2	PG 58-22	۹۸	۲
PG64_S2	PG 64-22	۹۸	۲
PG58_S4	PG 58-22	۹۶	۴
PG64_S4	PG 64-22	۹۶	۴
PG58_S6	PG 58-22	۹۴	۶
PG64_S6	PG 64-22	۹۴	۶

میانگین سه مقدار قیر متناظر با بیشترین استحکام مارشال، مقدار قیر متناظر با بیشترین وزن مخصوص و مقدار قیر متناظر با درصد فضای خالی ۳ و ۵ درصد تعیین شد. درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی پس از محاسبات، برابر ۵/۴ درصد برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی HMA اصلاح شده با پلیمر SBS تعیین شد. به منظور ساخت مخلوط‌های آسفالتی از دستگاه تراکم کننده ژیراتوری استفاده شده است. با فرض یک میلیون محور معادل هم‌ارز و میانگین بیشترین دمای هوای برابر ۴۰ درجه سانتی‌گراد در هفت روز متوالی سال، به کمک مقادیر توصیه شده توسط پژوهشکده حمل و نقل، تعداد دوران اولیه، دوران طرح و دوران حداکثر به ترتیب برابر با ۸ و ۹۵ و ۱۵۰ تعیین گردید. به منظور

ساخت نمونه‌های آسفالتی. برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی، ابتدا دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس حد وسط منحنی‌های دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران و نشریه ۲۳۴ برای لایه توپکا انتخاب شد. در گام بعدی در ساخت نمونه‌ها، تعیین درصد قیر بهینه و طرح اختلاط مخلوط آسفالتی می‌باشد. بر اساس طرح اختلاط مارشال نمونه‌های آسفالتی با شش درصد قیر مختلف ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵، ۷ و ۷/۵ درصد و با سه نمونه تکرار از هر نمونه تهیه شدند. پس از ساخت مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از دستگاه مارشال، هرکدام از نمونه‌ها تحت آزمایش استقامت مارشال قرار گرفته و عدد مارشال و عدد روانی مربوط به هر نمونه به دست آمد. سپس، مقدار قیر بهینه برای طرح اختلاط، بر اساس

بلکه با توجه به نمودار کرنش تجمعی به تعداد سیکل‌های بارگذاری می‌توان به مقایسه عملکرد شیارشدگی نمونه‌ها با یکدیگر پرداخت. لذا عدد روانی در تست خزش بیانگر مقدار مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های شدید و آستانه اضمحلال روسازی در برابر شیارشدگی است.

در این تحقیق آزمایش خزش دینامیکی نمونه‌های آسفالتی شاهد و اصلاح شده با پلیمر مطابق با استاندارد Australian: AS 2891.12.1 با بارگذاری نیمه سینوسی و به صورت ۵۰۰ میلی ثانیه بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی ثانیه استراحت انجام شده است. آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های آسفالتی با دو مقدار فضای خالی ۳ و ۵ درصد در سطح تنش انحرافی مورد استفاده ۴۰۰ کیلو پاسکال و دماهای آزمایش ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی-گراد انجام شده است. در شکل (۳) نمونه آسفالتی تحت آزمایش خزش دینامیکی نشان داده شده است.

بررسی تأثیر درصد فضای خالی آسفالت بر مقاومت شیارشدگی، در دو سطح فضای خالی ۳ و ۵ درصد ساخته شده‌اند. نمونه‌های مورد استفاده در تست خزش استوانه‌هایی به قطر ۱۰ و ارتفاع ۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. نمونه‌های آسفالتی ساخته شده در شکل (۲) نشان داده شده است.

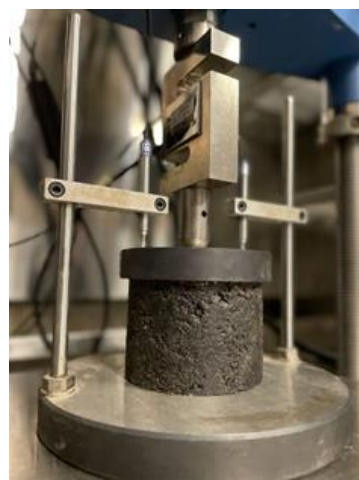
**آزمایش خزش دینامیکی.** هدف اصلی این آزمایش بررسی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌باشد. مهم‌ترین خروجی این آزمایش نمودار تغییرات کرنش تجمعی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری می‌باشد که از سه قسمت اصلی تشکیل می‌شود. تعداد سیکل بارگذاری معادل با شروع ناحیه سوم، عدد روانی نامیده می‌شود. بر اساس یافته‌های اخیر در حوزه روسازی، که عدد روانی حاصل آزمایش خزش دینامیکی با مقاومت برشی آسفالت رابطه مستقیمی دارد و برای تخمین شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. به‌طور کلی با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی نمی‌توان عمق شیارشدگی را تعیین کرد،



شکل ۲ نمونه‌های آسفالتی تولید شده

### آماده‌سازی داده‌ها

برای استفاده از نتایج آزمایشگاهی در بخش مدل‌سازی، متغیرهای ورودی به مدل بر اساس تبدیل متغیرهای کیفی به کمی آماده شده است. به‌طور کلی در بخش مدل‌سازی از پنج متغیر ورودی و یک متغیر خروجی استفاده شده است. بر این اساس، متغیر نوع قیر بیان‌کننده رده PG قیر مصرفی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی است و بر اساس رده عملکردی در دو گروه PG58-22 و PG64-22 تقسیم شد. متغیر دوم در بخش مدل‌سازی درصد پلیمر SBS می‌باشد که شامل سه مقدار ۲، ۴ و ۶ درصد می‌باشد. سومین متغیر در بخش مدل‌سازی، متغیر محیطی دمای



شکل ۳ نمونه آسفالتی تحت آزمایش خزش دینامیکی

الگوها و شناسایی گرایش‌های مختلفی که برای انسان‌ها و کامپیوتر شناسایی آن‌ها بسیار دشوار است استفاده شوند. از مهم‌ترین مزایای شبکه‌های عصبی می‌توان به یادگیری تطبیقی، خودسازمان‌دهی، عملگرهای بی‌درنگ، تحمل خطا، دسته‌بندی، تعمیم‌دهی و انعطاف‌پذیری اشاره کرد.

### تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی

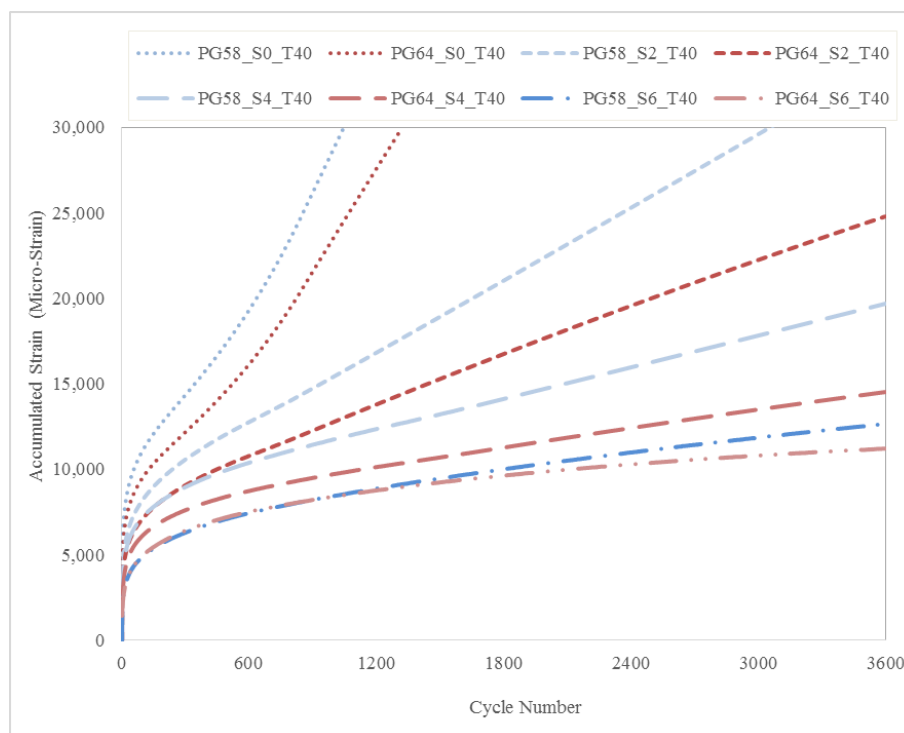
همان‌طور که پیشتر بیان شد، هدف از این تحقیق، پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی بر اساس کرنش‌های رخ داده در آزمایش خزش دینامیکی است. بر این اساس، متغیرهای رده عملکردی قیر پایه PG64-22 و PG58-22، درصد پلیمر SBS (۲ و ۴ و ۶ درصد)، دمای آزمایش (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، درصد فضای خالی (۳ و ۵ درصد) و تعداد سیکل بارگذاری به‌عنوان پارامترهای مؤثر بر رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته شدند.

**تأثیر نوع قیر و درصد پلیمر.** در شکل (۴) نتایج آزمایش خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر دو نوع قیر PG64-22 و PG58-22 و درصد‌های مختلف پلیمر SBS در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و درصد فضای خالی ۵ درصد نشان داده شده‌است. بر اساس نتایج، استفاده از پلیمر و قیر PG64-22 موجب کاهش کرنش تجمعی مخلوط‌های آسفالتی و در نتیجه بهبود مقاومت شیارشدگی روسازی شده‌است. تأثیر مثبت پلیمر با درصد استفاده‌شده از آن رابطه مستقیم دارد. به‌طوری‌که با افزایش درصد پلیمر، عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی بهبود یافته‌است و بهترین مقاومت مربوط به نمونه حاوی ۶ درصد پلیمر با قیر PG64-22 می‌باشد. همچنین، با وجود آنکه رفتار خزشی مخلوط‌های حاوی قیرهای پلیمری با رده‌های عملکردی متفاوت در سیکل‌های بارگذاری ابتدایی مشابه می‌باشند، ولی با افزایش تعداد بارگذاری و شدت یافتن شیارشدگی، مقادیر کرنش در مخلوط حاوی قیر PG64-22 به‌مرور بهتر می‌شود. این موضوع می‌تواند ناشی از سختی و ویسکوزیته بیشتر قیر باشد که به‌مرور زمان و در دوره خدمت‌دهی روسازی عملکرد بهتری در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک نشان می‌دهد.

آزمایش می‌باشد که شامل سه مقدار ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد است. پارامتر چهارم در قسمت مدل‌سازی، درصد فضای خالی می‌باشد که جز پارامترهای حجمی طرح اختلاط است و بر اساس دو درصد فضای خالی ۳ و ۵ درصد طراحی شد. برای دستیابی به درصد فضاهای خالی مدنظر، نمونه‌ها با تعداد دورهای ۹۰ و ۷۰ چرخش ژیراتوری با زاویه داخلی ۱/۱۶ و با فشار ۶۰۰ کیلو پاسکال متراکم گردید. آخرین متغیر در نظر گرفته‌شده در بخش مدل‌سازی رفتار شیارشدگی، تعداد سیکل بارگذاری در آزمایش خزش دینامیکی می‌باشد که متغیری از جنس بارگذاری است و بر اساس ۶ گام ۶۰۰، ۱۲۰۰، ۱۸۰۰، ۲۴۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۶۰۰ سیکل بارگذاری اعمال شده‌است.

### مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial neural network) ابزاری برای پردازش داده‌ها می‌باشند که مشابه شبکه‌های عصبی بیولوژیکی مثل مغز انسان، از تعداد زیادی عنصر به نام نرون با ارتباطات قوی داخلی که هماهنگ تشکیل شده‌اند. شبکه‌های عصبی مصنوعی با تحلیل داده‌های تجربی، قانون پنهان آن‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کند که به این عمل یادگیری می‌گویند و اصولاً این عمل مهم‌ترین ویژگی یک سیستم هوشمند است [27]. شبکه‌های عصبی با قابلیت ویژه در استنتاج مفاهیم از اطلاعات پیچیده یا مبهم، در استخراج روش‌هایی که آگاهی از آن‌ها برای انسان و دیگر فن‌های کامپیوتری پیچیده و دشوار است، استفاده می‌شود. الگوی و ساختار مورد استفاده در شبکه‌های عصبی با تعداد زیادی عناصر پردازشی فوق‌العاده به‌هم‌پیوسته تشکیل شده‌است و با تقلید از شبکه‌های عصبی بیولوژیکی مثل مغز انسان، برای حل یک مسئله باهم هماهنگ عمل می‌کند. شبکه‌های عصبی شامل سه جز ورودی، خروجی و پنهان است. گره‌های ورودی سیگنال‌های ورودی را از منابع خارجی دریافت می‌کنند که منابع در خارج از شبکه هستند. گره‌های خروجی سیگنال‌هایی را انتقال می‌دهند که مقادیر خروجی خارج از شبکه است. هر گره سیگنال‌هایی با قدرت‌های مختلف را به همسایگانش انتقال می‌دهد. در برخی از مدل‌های شبکه عصبی هر گره در هر لحظه در ارتباط با حالت محرک و تابع خروجی است که توسط آن حالت محرک فعلی را به سیگنال خروجی تبدیل می‌کند. شبکه‌های عصبی با توانایی قابل توجه خود در استنتاج نتایج از داده‌های پیچیده می‌توانند در استخراج



شکل ۴ نتایج آزمایش خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی با فضای خالی ۵ درصد در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

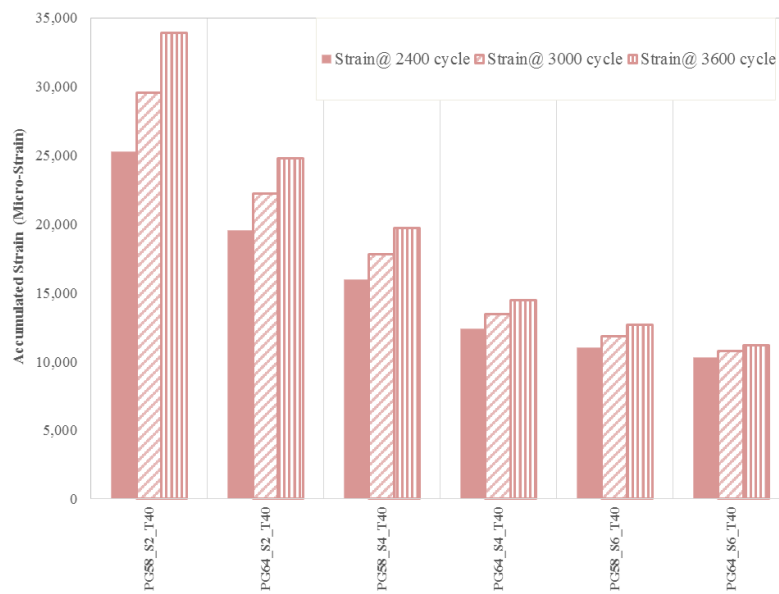
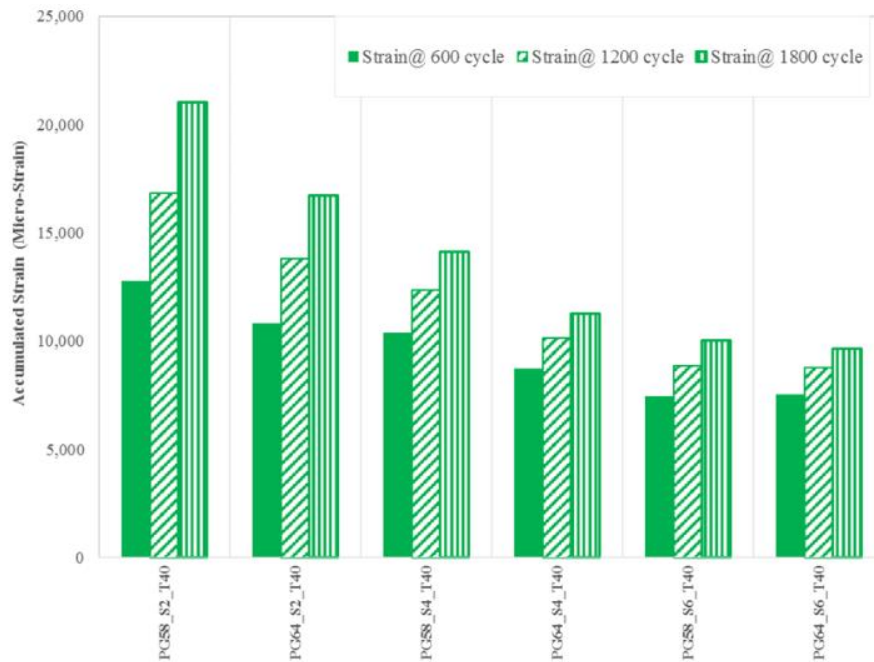
شاخص نیز با استفاده از پلیمر بهبود قابل توجهی یافته‌است و بر اساس نتایج برای نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد پلیمر به ترتیب برابر ۴۸، ۲۸ و ۱۶ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر، پلیمر SBS با افزایش سختی و ویسکوزیته ماستیک آسفالت موجب افزایش مقاومت و استحکام مخلوط آسفالتی می‌شود که این تأثیر مثبت با افزایش درصد پلیمر و سیکل بارگذاری به شکل بهتری نمایان می‌شود.

**تأثیر دما و درصد فضای خالی.** در این بخش در شکل‌های ۶ و ۷ رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی با درصد فضای خالی ۵ درصد، به ترتیب در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده‌است. بر اساس نتایج، به‌طور کلی با افزایش دما کرنش‌های ایجاد شده در روسازی افزایش یافته‌است و مقاومت شیارشدگی تضعیف می‌شود. بررسی سطوح دما نشان می‌دهد، تأثیر افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد بر رفتار شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی به مراتب بیشتر از افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد است. به عبارت دیگر، پس از ۵۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت مخلوط‌های آسفالتی به‌طور قابل توجهی

**تأثیر سیکل بارگذاری.** در این بخش رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر سیکل‌های مختلف بارگذاری با فضای خالی ۵ درصد در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده‌است. با توجه به نتایج در شکل (۵) با افزایش سیکل بارگذاری تغییر شکل‌های دائمی ایجاد شده در روسازی به شکل قابل توجهی افزایش یافته‌است و از مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی کم می‌شود. این در حالی است که افزودن پلیمر با عملکرد مناسب و مثبت موجب کاهش این نرخ شده‌است و روند کاهش مقاومت و افزایش خزش مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌بخشد. به‌طوری‌که بررسی نرخ کاهش کرنش بین سیکل‌های ۶۰۰ و ۳۶۰۰ در نمونه‌های حاوی قیر PG64-22 نشان می‌دهد، این پارامتر برای مخلوط‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد پلیمر به ترتیب برابر ۱۳۰، ۶۶ و ۴۹ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر، بررسی این شاخص نشان می‌دهد، با افزایش درصد پلیمر روند اضمحلال روسازی بر اثر شیارشدگی کاهش یافته و SBS به علت ساختار پلیمری و تشکیل زنجیره‌های قدرتمند موجب افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی شده‌است. هم‌چنین سنجش مقادیر کرنش‌های بین سیکل‌های ۱۸۰۰ تا ۳۶۰۰ نشان می‌دهد که این

مخلوط‌های خالص بهتر باشد. همچنین همان‌طور که از نمودارهای شکل (۶) مشخص است، تأثیر کاهش میزان شیارشدگی به واسطه درصد‌های مختلف افزودنی در دماهای بالاتر، کمتر بوده است و به عبارت دیگر پلیمر SBS در دماهای پایین‌تر عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

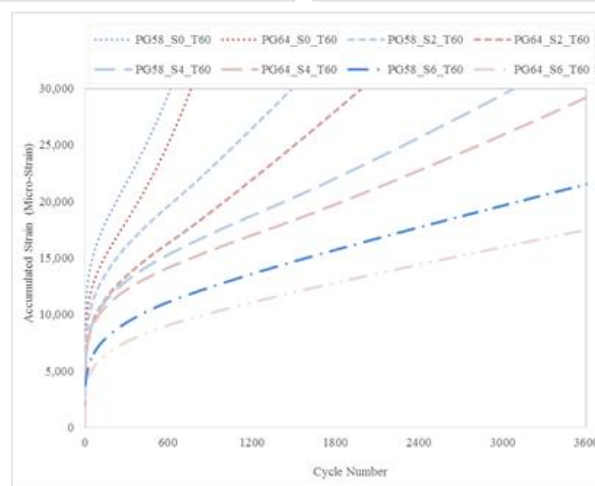
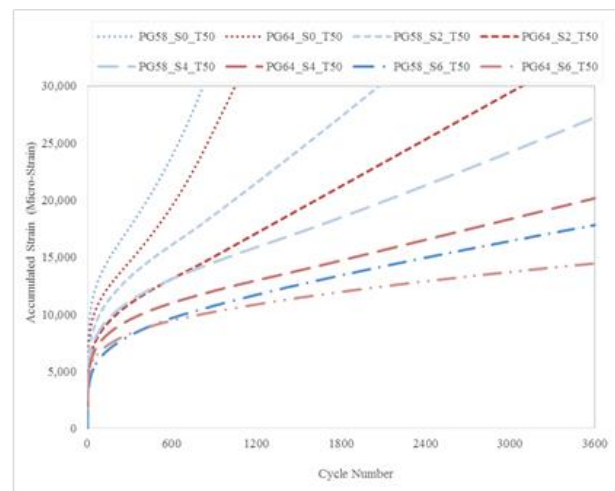
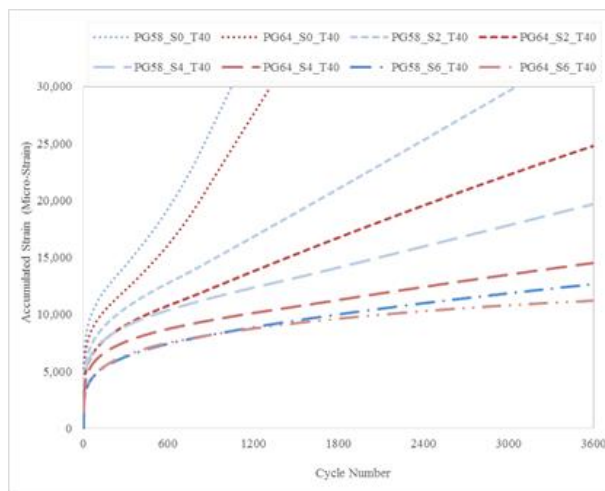
کاهش یافته است و این تأثیر موجب رفتار خزشی قابل توجه بر نمونه‌های آسفالتی شده است. درحالی‌که، بررسی تأثیر مواد پلیمری در این خصوص نشان می‌دهد استفاده از پلیمر SBS با بهبود رفتار قیر و افزایش سختی و مقاومت آن موجب شده است تا عملکرد مخلوط‌های اصلاح شده در برابر افزایش دما نسبت به



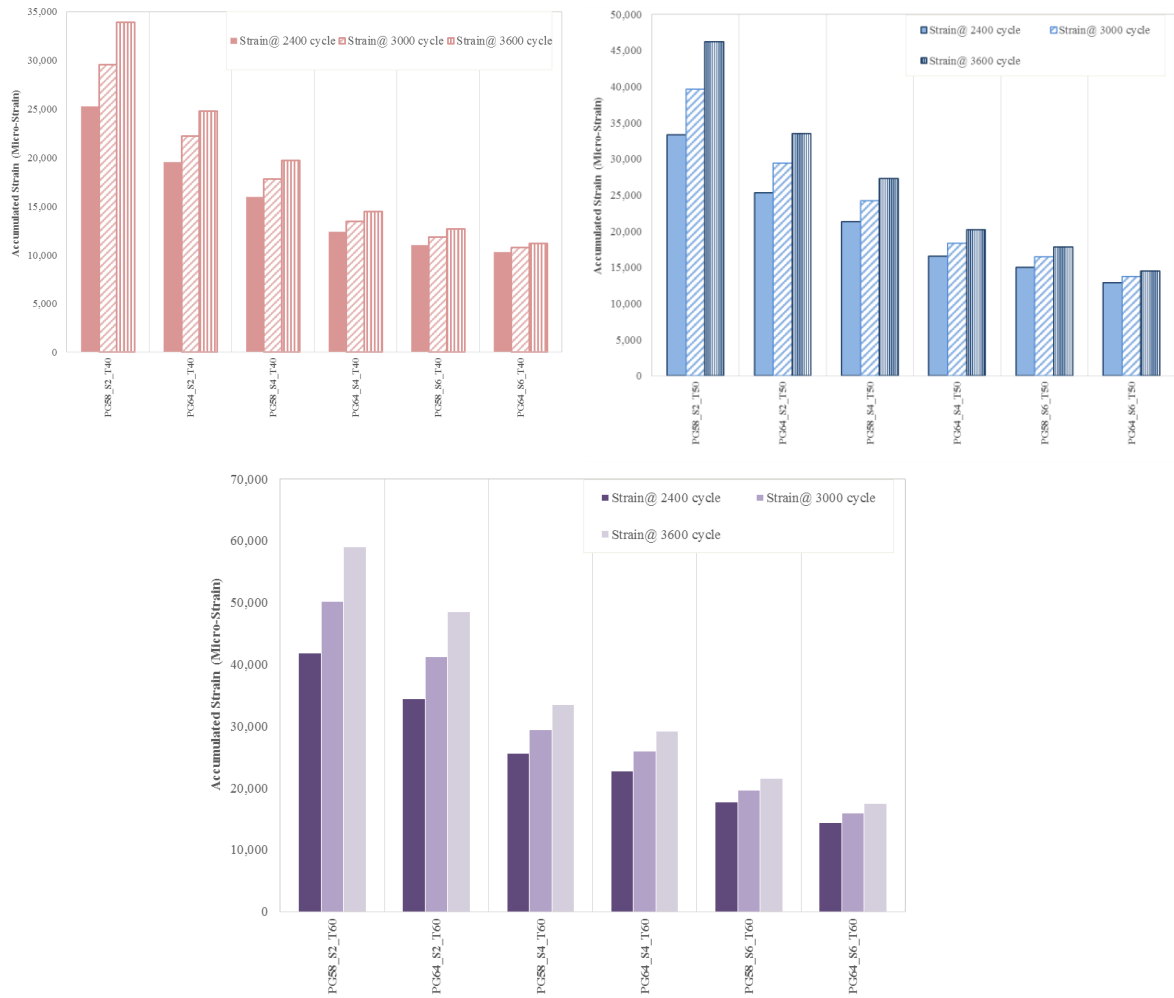
شکل ۵ مقادیر کرنش‌های تجمعی در انتهای سیکل‌های مختلف برای مخلوط‌های آسفالتی با فضای خالی ۵ درصد در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

قابل توجهی بر کرنش‌های ایجاد شده در روسازی به خصوص در ابتدای دوره بارگذاری دارد. این موضوع در نمونه‌های پلیمری نیز به طور مشابه دیده می‌شود که نشان می‌دهد تأثیر افزایش درصد فضای خالی بر رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر نوع قیر و مواد پلیمری نمی‌باشد و در هر صورت این تأثیر مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج، کمترین مقدار کرنش و تغییر شکل‌های پلاستیک در فضاهایی خالی ۳ و ۵ درصد مربوط به مخلوط حاوی پلیمری PG64-22 با ۶ درصد SBS می‌باشد که نشان می‌دهد با وجود افزایش درصد فضای خالی، ولی ساختار پلیمری تشکیل شده در قیر هم‌چنان به‌عنوان یک عامل مؤثر در افزایش مقاومت شیارشدگی عمل می‌کند.

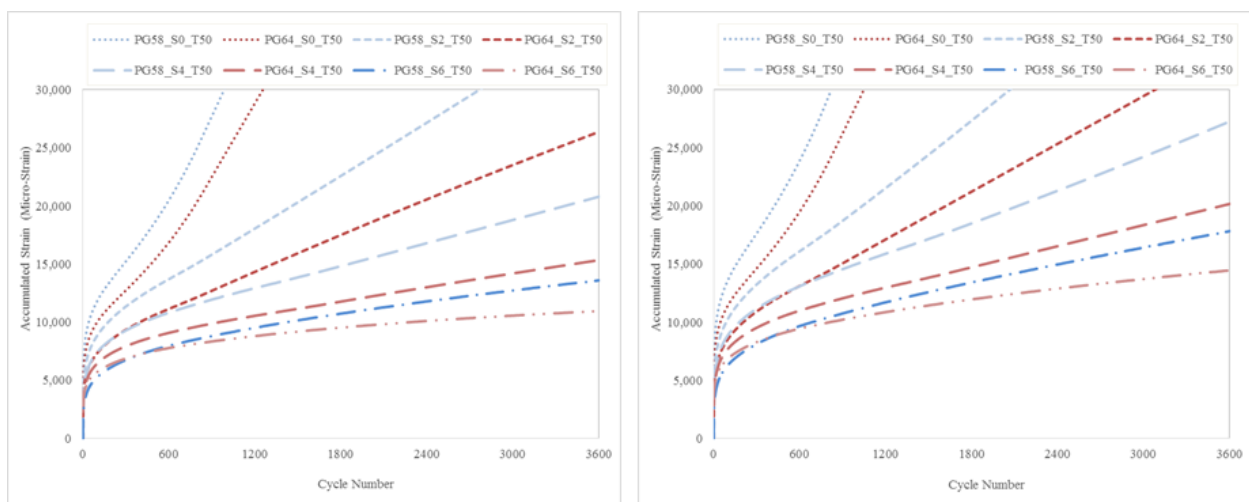
در شکل‌های (۸) و (۹) تأثیر درصد فضای خالی ۳ و ۵ بر رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش درصد فضای خالی در مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش تغییر شکل‌های دائمی و کرنش‌های تجمعی در مخلوط می‌شود. به طوری که با افزایش درصد از ۳ به ۵ نمودار خزشی مخلوط‌های آسفالتی از نظر شیب به شدت رشد کرده و تغییر شکل‌های ایجاد شده به طور قابل توجهی افزایش یافته است. به طوری که بررسی مقادیر کرنش در سیکل‌های ۲۴۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۶۰۰ نشان می‌دهد با افزایش درصد فضای خالی از ۳ به ۵ مقادیر کرنش‌ها به ترتیب و در حدود ۲۳، ۲۵ و ۲۸ درصد افزایش یافته است. این موضع نشان می‌دهد که تراکم و درصد فضای خالی تأثیر



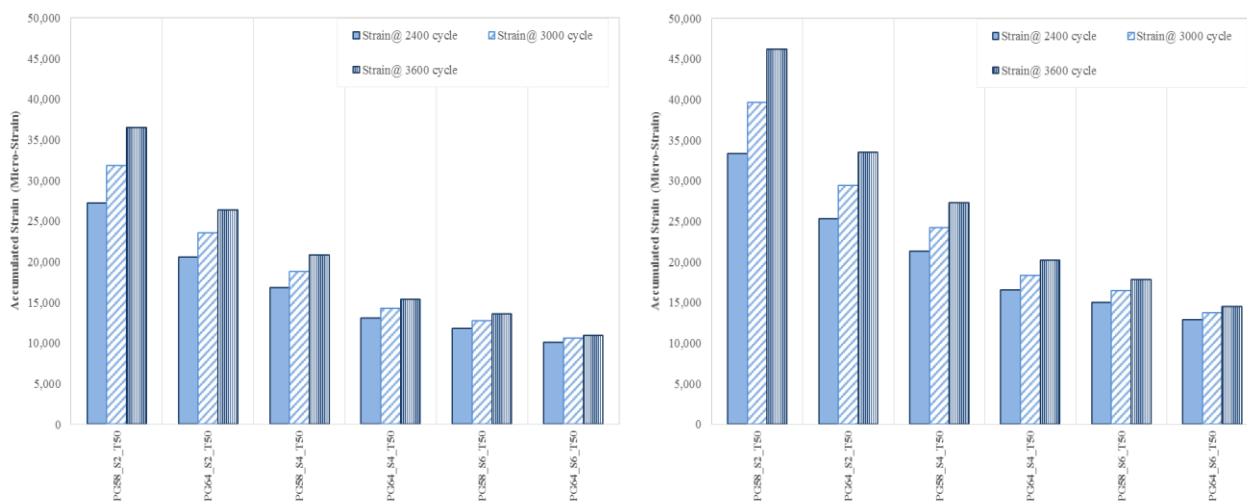
شکل ۶ نتایج آزمایش خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی با فضای خالی ۵ درصد در دماهای ۴۰ (شکل بالا چپ)، ۵۰ (شکل بالا راست) و ۶۰ (شکل پایین) درجه سانتی‌گراد



شکل ۷ مقادیر کرنش‌های تجمعی در انتهای سیکل‌های ۲۴۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۶۰۰ در دماهای ۴۰ (شکل بالا چپ)، ۵۰ (شکل بالا راست) و ۶۰ (شکل پایین) درجه سانتی‌گراد



شکل ۸ نتایج آزمایش خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی با فضاهای خالی ۳ (شکل چپ) و ۵ (شکل راست) درصد در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۹ مقادیر کرنش‌های تجمعی در انتهای سیکل‌های ۲۴۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۶۰۰ برای مخلوط‌های آسفالتی با فضاهای خالی ۳ (شکل چپ) و ۵ (شکل راست) درصد در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد

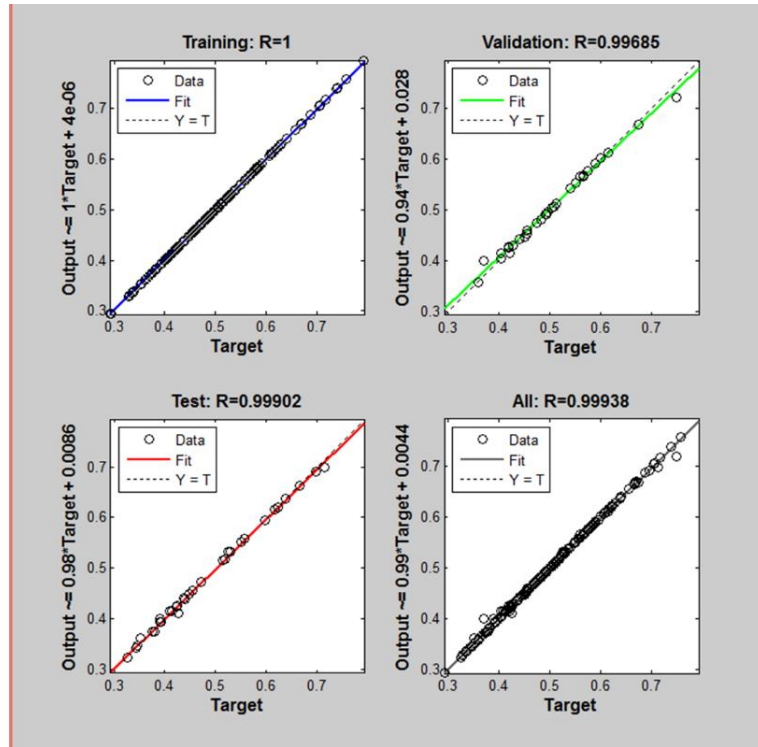
متغیرهای RMSE، VAF، MAPE، COV و R2 به ترتیب برابر ۰/۹۹۶، ۲/۷۹، ۰/۵۰۶، ۹۹/۷، ۴۸۸/۸ می‌باشد. بر اساس نتایج، شاخص‌های RMSE، MAPE و COV نشان‌دهنده خطا و پراکندگی نتایج پیش‌بینی شده می‌باشند که با کاهش این مقادیر دقت مدل در پیش‌بینی افزایش می‌یابد. همچنین، شاخص VAF و R2 پارامترهای همبستگی و دقت می‌باشند که با افزایش این مقادیر صحت نتایج پیش‌بینی شده به نتایج آزمایشگاهی افزایش می‌یابد. بر همین اساس، بهینه‌ترین ساختار طراحی شده برای تخمین رفتار خزشی مخلوط آسفالتی تحت تأثیر متغیرهای مورد بررسی، مدل ۱-۱۰-۱۰-۱۰-۵ با سه لایه مخفی و تعداد ده نورون در هر لایه دارای بهترین عملکرد می‌باشد.

در شکل (۱۰) عملکرد مدل پیشنهادی بر اساس داده‌های نرمال شده نشان داده شده است. هم‌چنین در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) عملکرد مدل برتر با ساختار ۱-۱۰-۱۰-۱۰-۵ در پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی بر اساس داده‌های واقعی حاصل آزمایش خزش دینامیکی و پیش‌بینی شده کرنش تجمعی با استفاده از شبکه عصبی نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود، همبستگی بسیار مناسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و تخمین زده شده برای مقادیر کرنش‌های ایجاد شده در روسازی وجود دارد. به طوری که داده‌ها به خط ۴۵ درجه بسیار نزدیک می‌باشند و این به مفهوم دقت بالای نتایج به دست آمده و خطای کم مدل پیشنهادی می‌باشد.

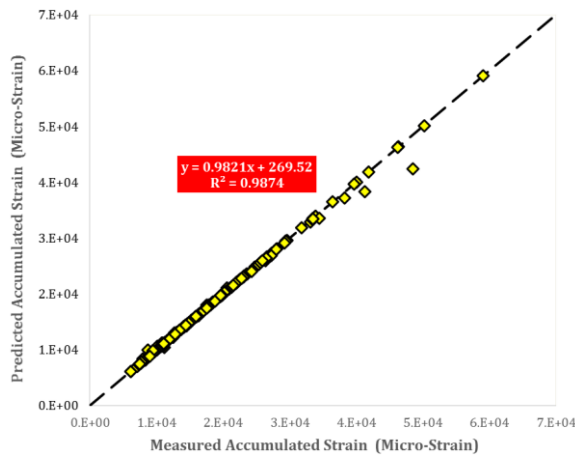
### نتایج مدل پیش‌بینی شبکه عصبی مصنوعی

در این مطالعه برای بررسی تأثیر ساختار و معماری شبکه بر قدرت مدل، مدل‌های مختلف ANN با تعداد متفاوت لایه‌ها و گره‌های مخفی طراحی شده است تا بهینه‌ترین معماری شبکه برای پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی تعیین شود. در همین راستا، ۱۲ ساختار متفاوت از شبکه‌های عصبی با تعداد یک تا سه لایه مخفی و با تعداد مختلفی از گروه‌های مخفی بین ۳ تا ۲۵ گره در هر لایه طراحی و ارزیابی شده است. تعداد گره‌های ورودی به شبکه شامل پنج متغیر درصد SBS، رده عملکردی قیر، دمای آزمایش، درصد فضای خالی و سیکل بارگذاری می‌باشد و خروجی شبکه مقادیر کرنش تجمعی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. به عنوان مثال، ساختار ۱-۱۰-۱۰-۱۰-۵ نشان‌دهنده یک شبکه عصبی با تعداد ۵ گره ورودی، ۲ لایه مخفی با تعداد گره‌های مخفی ۱۰ گره و یک لایه خروجی با یک گره است. برای تعیین معماری برتر شبکه نیاز است تا اختصاص وزن‌های به شبکه در چندین مرتبه تکرار شود و بهترین وزن‌های نهایی شبکه با کمترین خطا در کل شبکه به دست آید. بر همین اساس، هر یک از ۱۰ ساختار شبکه با ۵ بار تکرار مورد سنجش قرار داده شده است تا معماری برتر شبکه با بهترین عملکرد و کمترین تعیین شود. به منظور بررسی عملکرد ساختارهای مختلف، از معیارهای R2، RMSE، VAF، MAPE و COV استفاده شده است. مقادیر آماری به دست آمده در این ساختار برای

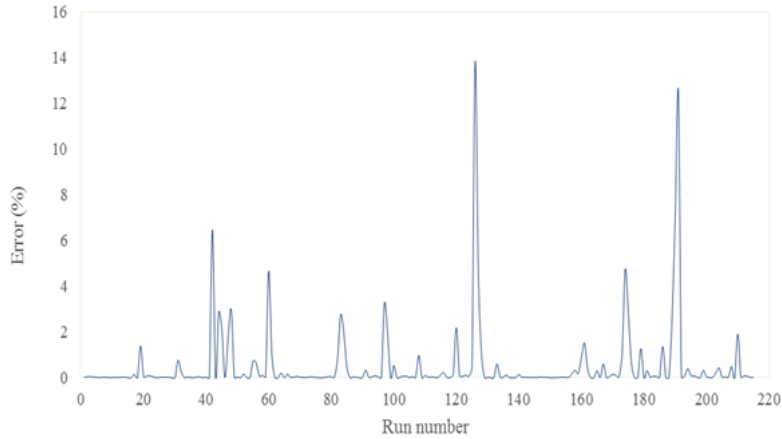




شکل ۱۰ عملکرد مدل شبکه عصبی در چهار بخش آموزش، اعتبارسنجی، آزمون و کل مدل بر اساس داده نرمال شده



شکل ۱۱ مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده کرنش تجمعی مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۱۲ بررسی درصد خطای مقادیر پیش‌بینی شده بر اساس مقادیر واقعی

## نتیجه گیری

برابر ۴۸، ۲۸ و ۱۶ درصد می باشد. بر اساس این مقادیر، پلیمر SBS با افزایش سختی و ویسکوزیته ماستیک آسفالت موجب افزایش مقاومت و استحکام مخلوط آسفالتی می شود که این تأثیر مثبت با افزایش درصد پلیمر و سیکل بارگذاری به شکل بهتری نمایان می شود.

سنجش تأثیر فضای خالی بر رفتار خزشی نشان داد افزایش درصد فضای خالی در مخلوط های آسفالتی باعث افزایش تغییر شکل های دائمی و کرنش های تجمعی در مخلوط می شود. به طوری که با افزایش درصد از ۳ به ۵ نمودار خزشی مخلوط های آسفالتی از نظر شیب به شدت رشد کرده و تغییر شکل های ایجاد شده به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

نتایج بخش مدل سازی نشان داد، مدل ۱-۱۰-۱۰-۱۰-۵ با سه لایه مخفی و تعداد ده نورون در هر لایه دارای با داشتن مقادیر  $0.996$ ،  $2/79$ ،  $0.0506$ ،  $99/7$ ،  $488/8$ ،  $RMSE$ ،  $MAPE$ ،  $COV$  و  $R2$  دارای بهترین عملکرد و کمترین خطا می باشد و مدل ارائه شده از نظر پیش بینی رفتار خزشی و مقاومت شیارشدگی مخلوط های آسفالتی اصلاح شده پلیمری عملکرد بسیار خوبی دارد.

بررسی ضریب همبستگی بین داده های آزمایشگاهی و پیش بینی شده نشان داد که مقدار  $R2$  برابر  $0.987$  می باشد که ارتباط قوی و معناداری بین داده ها وجود دارد و ساختار انتخاب شده برای مدل شبکه عصبی به خوبی توانسته است در بخش آموزش و آزمون داده ها را پیش بینی کند.

بررسی درصد خطای مدل بر اساس اختلاف مقادیر پیش بینی شده و آزمایشگاهی نشان می دهد که مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین به ترتیب برابر  $0.00076$ ،  $13/81$  و  $0/51$  می باشد. بر اساس نتایج، درصد خطای متوسط کمی مشاهده می شود که می توان گفت مدل قدرت و کارایی مناسبی در تخمین رفتار شیارشدگی مخلوط آسفالتی پلیمری تحت متغیرهای مورد بررسی را دارد.

در این مقاله تلاش شد تا رفتار خزشی و شیارشدگی بتن آسفالتی اصلاح شده با قیر پلیمری تحت تأثیر متغیرهای محیطی و ساختاری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یکی از روش های قدرتمند پیش بینی شود. در این راستا، تأثیر دما، تعداد سیکل بارگذاری، درصد فضای خالی به عنوان متغیرهای مؤثر بر رفتار خزشی و تغییر شکل های ایجاد شده در مخلوط های آسفالتی بررسی شد. همچنین، با در نظر گرفتن دو نوع قیر PG64-22 و PG58-22 و درصد های مختلف پلیمر SBS، تأثیر رده عملکردی قیر و مقدار پلیمر اصلاح کننده بر خصوصیات شیارشدگی مورد سنجش قرار داده شد. در نهایت، پس از بررسی رفتار خزشی مخلوط های آسفالتی تحت تأثیر متغیرهای مورد بررسی، ساختار بهینه مدل شبکه عصبی در پیش بینی عملکرد شیارشدگی مخلوط های آسفالتی تحت تأثیر متغیرهای مؤثر تعیین شود و دقت و صحت نتایج پیش بینی شده کرنش تجمعی مخلوط های آسفالتی با استفاده از شاخص های آماری تعیین شد. در ادامه، نتایج به دست آمد:

- تأثیر نوع قیر و پلیمر نشان داد، استفاده از پلیمر و قیر PG64-22 موجب کاهش کرنش تجمعی مخلوط های آسفالتی و در نتیجه بهبود مقاومت شیارشدگی روسازی می شود و با افزایش درصد پلیمر، عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی بهبود می یابد و بهترین مقاومت مربوط به نمونه حاوی ۶ درصد پلیمر با قیر PG64-22 می باشد.
- بررسی هم زمان ساختار و سیکل بارگذاری بر رفتار خزشی مخلوط آسفالتی نشان می دهد، با افزایش تعداد بارگذاری و شدت یافتن شیارشدگی، مقاومت در مخلوط حاوی قیر PG64-22 به دلیل افزایش سختی قیر به مرور بهتر می شود.
- بررسی تأثیر تعداد بارگذاری نشان داد با افزایش سیکل بارگذاری تغییر شکل های دائمی ایجاد شده در روسازی به شکل قابل توجهی افزایش یافته است و از مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی کم می شود. این در حالی است که افزودن پلیمر با عملکرد مناسب و مثبت موجب کاهش این نرخ شده است و روند کاهش مقاومت و افزایش خزش مخلوط های آسفالتی را بهبود می بخشد.
- مقادیر کرنش های بین سیکل های ۱۸۰۰ تا ۳۶۰۰ نشان داد، نتایج برای نمونه های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد پلیمر به ترتیب

## مراجع

1. Ziari, H., Moniri, A., and Norouzi, N., "The effect of nanoclay as bitumen modifier on rutting performance of asphalt mixtures containing high content of rejuvenated reclaimed asphalt pavement", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 37(17), pp. 1-6, (2019).
2. Ziari, H., Amini, A., Goli, A., and Mirzaiyan, D., "Predicting rutting performance of carbon nano tube (CNT) asphalt binders using regression models and neural networks", *Construction and Building Materials*, Vol. 160, pp. 415-426, (2018).
3. Ameri, M., Mirzaiyan, D., and Amini, A., "Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 30, No. 11, pp. 04018292, (2018).
4. Arabani, M., and Yousefpour Taleghani, M., "Rutting behavior of hot mix asphalt modified by polyvinyl chloride powder", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 35(15), pp. 1621-1626, (2017).
5. Ali, Y., Irfan, M., Ahmed, S., and Ahmed, Sh., "Empirical correlation of permanent deformation tests for evaluating the rutting response of conventional asphaltic concrete mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 29(8), pp. 04017059, (2017).
7. Coleri, E., Harvey, JT., Yang, K., and Boone, JM. "Investigation of asphalt concrete rutting mechanisms by X-ray computed tomography imaging and micromechanical finite element modeling", *Materials and structures*, Vol. 46(6), pp. 1027-1043, (2013).
8. Mirzaiyan, D., Amini, A., and Jalali, F., "Investigating the Influence of SBS and Gilsonite on the Rheological Properties of Asphalt Binder Using Statistical Analysis", *International Journal of Scientific and Technical Research in Engineering*, Vol. 4(1), pp. 31-42, (2019).
9. Vonk, W., Korenstra, J., Bodt, D., and Heimerikx, G., "SBS copolymers for road binders with improved processing characteristics and heat stability", *EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS*, Vol. 3, (1996).
10. Chen, JS., and Huang, CC., "Fundamental characterization of SBS- modified asphalt mixed with sulfur", *Journal of applied polymer science*, Vol. 103(5), pp. 2817-2825, (2007).
۱۱. زیاری، ح، بهبهانی، ح، و ارجمندپور، ج، «بررسی تأثیر انواع پلیمر ترموپلاستیک الاستومر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، شماره ۶(۳)، ص. ۴۱۳-۴۲۸، (۲۰۱۵).
۱۲. ساعدی، س، صادقیان اصل، گ، و یشیری، س.ح، «تأثیر توأم استایرن بوتادین استایرن و پروپلاست در بهبود عملکرد آسفالت ماستیکی درشت‌دانه»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، شماره ۱۰(۲)، ص. ۳۸۵-۳۹۹، (۲۰۱۸).
۱۳. صاحب‌الزمانی، س.ح، ضیاء علوی، س. م.و، و فرزانه، ا، «مقایسه‌ی خواص عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با قیر پلیمری و گرانول خشک پلیمری»، پژوهشنامه حل و نقل، شماره ۱۵(۳)، ص. ۳۶۹-۳۸۰، (۲۰۱۸).
۱۴. فخری، م، شاه ابراهیمی، ا، و چاوشیان نائینی، س. ف، «بررسی شیارشدگی و اثر خودترمیمی بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده»، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۱۷(۱)، ص. ۱۴۳-۱۵۶، (۲۰۱۹).
15. Sabouri, M., Mirzaeian, D., and Moniri, A., "Effectiveness of Linear Amplitude Sweep (LAS) asphalt binder test in predicting asphalt mixtures fatigue performance", *Construction and Building Materials*, Vol. 171, pp. 281-290, (2018).
16. Khodaii, A., and Mehrara, A., "Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt

- mixtures using dynamic creep test", *Construction and Building Materials*, Vol. 23(7), pp. 2586-2592, (2009).
17. Mirzaiyan, D., Ameri, M., Amini, A., Sabouri, M., and Norouzi, A., "Evaluation of the performance and temperature susceptibility of gilsonite-and SBS-modified asphalt binders", *Construction and Building Materials*, Vol. 207, pp. 679-692, (2019).
18. Aflaki, S., and Tabatabaee, N., "Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran", *Construction and Building Materials*, Vol. 23(6), pp. 2141-2150, (2009).
19. Jafari, M., Babazadeh, M., and Aflaki, S., "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*, Vol. 2505(1), pp. 15-23, (2015).
۲۰. دیواندری، ح.، و سادات خلردی، س.، «مدل سازی عمق شیارشدگی آسفالت با استفاده از نتایج آزمایش خزش دینامیکی»، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۲۰(۱۵)، ص. ۱۵-۳۳، (۲۰۱۸).
۲۱. خبیری، م.، ذات اکرم، م.، و میرابی مقدم، م.، «بررسی آزمایشگاهی و تحلیل آماری اثر آلاینده‌ها بر مقاومت لغزندگی روسازی آسفالتی»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، شماره ۸(۴)، ص. ۵۸۹-۶۰۲، (۲۰۱۹).
۲۲. فرج‌اللهی، ا.، احدی، م.، و طایفی نصرآبادی، ع.، «مدل‌سازی شاخص وضعیت روسازی (PCI) با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی انتشار برگشتی»، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۱۷(۱)، ص. ۴۷-۶۰، (۲۰۲۰).
۲۳. فخری، م.، کریمی، س.، و قربانی نیک، م.، «تخمین ناهمواری روسازی بر اساس خرابی‌های سطحی با استفاده از شبکه عصبی (مطالعه موردی: محورهای شریانی ایران)»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، شماره ۱۲(۳)، ص. ۶۹۷-۷۱۳، (۲۰۲۱).
24. Xiao, F.T and Amirkhanian, S.N., "Effects of binders on resilient modulus of rubberized mixtures containing RAP using artificial neural network approach", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 37(2), p. 129-13, (2009).
25. Wu, Z., Hu, S., and Zhou, F., "Prediction of stress intensity factors in pavement cracking with neural networks based on semi-analytical FEA", *Expert Systems with Applications*, Vol. 41(4), pp. 1021-1030, (2014).
26. Rooholamini, H., Imaninasab, R., and Vamegh, M., "Experimental analysis of the influence of SBS/nanoclay addition on asphalt fatigue and thermal performance", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 20(6), pp. 628-637, (2019).
27. Ziari, H., Amini, A., and Goli, A., "The effect of different aging conditions and strain levels on relationship between fatigue life of asphalt binders and mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 244, pp. 118345, (2020).