



تاریخ برگزاری
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2ND NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در تخمین قابلیت خودترمیمی مخلوط آسفالتی

نیمه گرم

إسراء عمر محمد صالح^{۱*}، میثم عفتی^۲، سیدمحمد میرعبدالعظیمی^۳

^۱دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان، رشت israumer00475163@gmail.com

^۲دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان، رشت meysameffati@guilan.ac.ir

^۳دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان، رشت mirabdzimolai@guilan.ac.ir

این مطالعه در استان گیلان-شهر رشت در دانشگاه گیلان انجام شده است.

*نویسنده مخاطب: israumer00475163@gmail.com

چکیده

فناوری‌هایی مانند مخلوط آسفالت نیمه گرم می‌توانند مزایای اقتصادی و زیست محیطی متعددی را به همراه داشته باشند. از طرف دیگر مخلوط‌های آسفالتی به دلیل خرابی‌های مختلف مانند شیارشدگی، خستگی، پیرشدگی و ... به صورت مرتب باید تحت تعمیر و نگهداری قرار گیرد. به همین دلیل استفاده از فرآیند خودترمیمی امکان دارد فرآیندهای تعمیر و نگهداری را کاهش دهد و یا حتی مقدمات حذف آن را مهیا کند. از این رو در این پروژه عملکرد خودترمیمی مخلوط آسفالت نیمه گرم مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور از افزودنی ساسوبیت و زایکوترم استفاده شد. نمونه‌های آسفالتی با دو طول ترک ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر آماده شد و در ادامه نمونه‌ها تحت گرمایش القایی در دو فرکانس ۸۷ و ۸۸ کیلوهرتز و سه زمان القا ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه قرار گرفتند. سپس با استفاده از آزمون خمش سه نقطه و در دو دمای ۲۵ و ۱۶- درجه سانتی‌گراد نمونه‌ها تحت آزمایش قرار گرفتند. در ادامه شاخص‌های چقرمگی شکست، انرژی شکست و بار بحرانی برای هر کدام از حالت‌ها تعیین شد. برای تخمین از روش شبکه عصبی پرسپترون با دو لایه پنهان استفاده شد. متغیرهای ورودی در این مطالعه شامل چقرمگی شکست، انرژی شکست بعد از القا، نوع افزودنی، دمای آزمایش، زمان القا، انرژی شکست قبل از القا، طول ناچ، مساحت و فرکانس بود. برای بررسی اثر تغییر متغیرهای ورودی آن‌ها در چهار مدل مختلف با تعداد و ویژگی‌های مختلف دسته‌بندی شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که در شبکه عصبی پرسپترون با دو لایه در بخش آزمون مقادیر RMSE از ۱۰/۴۶ در مدل اول با سه متغیر ورودی به ۴/۲۷ در مدل چهارم به نه متغیر ورودی رسیده است. مشاهده شد که دامنه تغییرات آماره NS در شبکه عصبی پرسپترون چند لایه بین ۰/۵۲ تا ۰/۹۸ بود، هرچه مقدار این آماره به یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده دقت بیشتر مدل تخمین زده شده است.

واژه‌های کلیدی: آسفالت نیمه گرم- خودترمیمی- شبکه عصبی مصنوعی- ساسوبیت

۱- مقدمه

آسفالت مخلوطی از قیر، سنگدانه و فیلر بوده که از جمله معمول‌ترین روسازی مورد استفاده در جهان است. این نوع روسازی با عوامل متعددی همچون بارگذاری ترافیکی، شرایط آب‌وهوایی نامساعد و... دچار خرابی‌هایی می‌گردد که



شروع عمده این خرابی‌ها با بروز ترک‌های ریزی به همراه است. ترک یک مد شکست مهم در آسفالت است. ترک‌های ریز در طی اعمال بارهای تکراری به آسفالت پدید می‌آید و به وسیله تنش‌های محیطی و ترافیکی رشد کرده و به ترک‌های بزرگ تبدیل می‌شوند و در نهایت منجر به پدید آمدن خرابی‌های متداول روسازی می‌گردند (Menozzi et al., 2015). براین اساس، ضرورت انجام اقدامات پیشگیرانه برای افزایش عمر روسازی آسفالتی حائز اهمیت می‌باشد. امروزه مطالعات نشان داده است که مخلوط آسفالتی می‌تواند بدون دخالت انسان، خودبه‌خود ترمیم شود (García et al., 2013). این پدیده خودترمیمی نام دارد که عوامل مؤثر بر آن در مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است (Fakhri et al., 2020). خودترمیمی معمولاً در بازه‌های زمانی عدم عبور ترافیک و تحت شرایط دمایی بالا (بین ۳۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد بسته به نوع قیر مورد استفاده) اتفاق می‌افتد. از این رو آسفالت یک ماده خودترمیم نام گرفته است (García et al., 2011a).

به‌طور کلی مطالعاتی به صورت پراکنده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی عملکرد مخلوط آسفالتی استفاده شده است به طوری که ریمان سلیمان و نهدی (Ramadan Suleiman and Nehdi, 2017) روشی برای پیش‌بینی خودترمیم ذاتی در بتن با استفاده از الگوریتم ترکیبی ژنتیکی - شبکه عصبی مصنوعی (ANN - GA) ارائه دادند که الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی تصادفی برای وزن‌دهی اولیه در شبکه پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی ANN - GA قادر به ارزیابی اثرات پیچیده عوامل مختلف خودترمیم (به عنوان مثال، مواد بیوشیمیایی، مواد افزودنی بر پایه سیلیس، مواد کریستالی و ...) بر عملکرد خودترمیم در مواد بر پایه سیمان را دارا است. گول و همکارانش (Gul et al., 2018) به منظور بررسی ویژگی‌های گرمایش و بازده ترمیم ناشی از مخلوط آسفالت حاوی الیاف فولادی تحت گرمایش القایی و گرمایش ماکروویو یک مخلوط آسفالتی را با روش‌های مختلف گرمایش با مادون قرمز مورد مطالعه قرار دادند. بادروودی و همکارانش (Badroodi et al., 2020) یک مدل برای فرآیندهای مختلف آزمایش بر اساس تکنیک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی رفتار نمونه‌های آسفالتی گرم با درصد‌های مختلف مواد نانو و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی مدل ارائه دادند.

سیلان و همکاران (Ceylan et al., 2006) در سال ۲۰۰۶، به منظور ابداع یک روش مکانیستیک، از شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی استفاده کردند؛ زیرا پیش‌بینی کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی، با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی ممکن نبود. نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها گامی مهم برای توسعه روش مکانیستیک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی را نشان داد. در سال ۲۰۰۷، لی و همکارانش (Lee et al., 2007)، در ادامه تحقیقاتی که در راستای تحلیل و طراحی روسازی و همچنین تحقیقاتی که در راستای پیش‌بینی تغییر شکل‌های روسازی‌های شبیه‌سازی شده بود، مطالعات و پژوهش‌هایی انجام دادند. هدف آن‌ها بهبود دقت پیش‌بینی تغییر شکل روسازی‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و آنالیزهای رگرسیونی بود. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی مقادیر مدول عکس‌العمل بستر با استفاده از داده‌های میدانی از کیفیت و دقت مناسب‌تری برخوردار هستند. بادروودی و همکارانش (Badroodi et al., 2020) پژوهشی به منظور ارزیابی و پیش‌بینی پدیده خستگی در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم اصلاح شده با نانو سیلیس و همچنین حاوی تراشه آسفالت بازیافتی شده انجام دادند. آن‌ها با استفاده از رفتار خود ترمیمی مخلوط‌های آسفالتی، نتایج آزمایشگاهی را از طریق شبکه عصبی مصنوعی مدل‌سازی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزودن نانوسیلیس می‌تواند بر سطح خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم تأثیر بگذارد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی رفتار نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم شامل محتویات مختلف نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد به طوری که مقایسه آن‌ها با نتایج



آزمایشگاهی دقت بالای مدل را در سطح ۹۵ درصد را نشان داد. ژو و همکاران (Zhu et al., 2020) تأثیر فریت^۱ در انتشار ترک و بهبود کارایی یک مخلوط آسفالت تحت زمان‌های مختلف گرمایش میکروویو حاوی فریت را با استفاده از روش همبستگی تصویر دیجیتال^۲ DIC بررسی کردند. آنان از تست خستگی خمشی سه نقطه‌ای به منظور بررسی تأثیر زمان گرمایش میکروویو و زمان ترمیم بر خود ترمیمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی فریت و بدون فریت استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد افزودن فریت می‌تواند ترک خوردگی ثانویه را به میزان قابل توجهی به تأخیر اندازد و میزان انتشار ترک در مخلوط‌های آسفالتی را کاهش دهد. بر اساس مشاهدات DIC، زمان بهینه گرمایش میکروویو برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۵ درصد فریت، ۸۰ ثانیه می‌باشد. در عین حال، هرچه زمان بهبود طولانی‌تر باشد، اثر خودترمیمی قوی‌تر است. هدف از انجام این مطالعه بررسی تغییر متغیرهای ورودی بر دقت تخمین شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه برای پیش بینی قابلیت خودترمیمی مخلوط آسفالتی نیمه گرم است.

۲- مواد و روش‌ها

۱.۲. مصالح مورد استفاده

مصالح استفاده شده در این پژوهش شامل سنگدانه‌های سیلیسی، قیر ۷۰-۶۰، ساسوبیت، زایکوترم، پودر آهن و کربن فعال می‌باشد. دانه‌بندی مصالح سنگی مطابق با حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای آستر و رویه است. جنس مصالح سنگی مورد استفاده سیلیسی می‌باشد و از کارخانه آسفالت باهنر رشت تهیه گردید. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ بر اساس استانداردهای موجود ارائه شده است. فیلر مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها، متشکل از پودر آهن، کربن فعال و پودر سیمان می‌باشد. با توجه به مشخصات هر دانه‌بندی، الک‌های مورد نیاز مشخص شده و سپس به ترتیب اندازه روی هم قرار می‌گیرند. سنگدانه‌ها بر روی بالاترین الک ریخته شده و دستگاه لرزاننده به مدت پنج تا هفت دقیقه فعالیت می‌کند. این عمل آن قدر تکرار می‌گردد تا میزان مانده مورد نیاز بر روی هر الک حاصل گردد. به‌طور کلی قیرها معمولاً بر اساس عملکردشان طبقه‌بندی می‌شوند. در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ مربوط به پالایشگاه نفت جی اصفهان استفاده شده است. مشخصات کلی ساسوبیت و زایکوترم در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات ساسوبیت و زایکوترم مورد استفاده در این مطالعه

ویژگی	زایکوترم	ساسوبیت
اجزا سازنده	سولفوآمید مایع	هیدروکربنپلی اتیلن
حالت فیزیکی	مایع	آلفانیک
رنگ	تیره	پاستیل و پرپل
بو	بی‌بو	بی‌بو
چگالی حجمی (Kg/m ³)	۹۰۰	۵۹۰-۶۲۲
حلالیت در آب	غیرقابل حل	غیرقابل حل
مقدار مصرفی	۰/۴-۰/۲ درصد قیر جدید	۱-۳ درصد قیر

طرح اختلاط استفاده شده در این پژوهش بر اساس طرح اختلاط مارشال (D1559 ASTM) انجام گرفت. جهت تعیین درصد بهینه قیر مورد نیاز، نمونه‌هایی با ۵ درصد مختلف (۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵) قیر تهیه گردیده و مناسب‌ترین درصد قیر بر اساس منحنی‌های آزمایش مارشال تعیین گردید. برای هر کدام از حالت‌ها ۲ نمونه مارشال ساخته شد. در نهایت مقدار درصد

¹ Ferrite

² Digital image correlation



تاریخ برگزاری
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2ND NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

قیر بهینه مخلوط آسفالتی قشر بین در ۱۹-۰ میلی‌متر، با توجه به نتایج آزمایش مارشال و منحنی‌های رسم شده و همچنین بر اساس پیشنهادات نشریه MS۲- انستیتو آسفالت و مندرجات بند ۲۰-۸-۳ نشریه شماره ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور تعیین گردید. بدین صورت که درصد قیر نمونه‌های آسفالتی حاوی ساسوبیت ۵/۵ درصد و نمونه‌های حاوی زایکوترم ۵/۸ درصد به دست آمد.

به‌منظور انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای و تعیین منحنی بار-جابجایی از دستگاه خمش سه نقطه‌ای موجود در آزمایشگاه دانشگاه گیلان مطابق استفاده شد. بارگذاری نمونه‌ها به نحوی انجام گردید که بار در مرکز نمونه‌ها و دقیقاً در بالای ترک مصنوعی موجود در نمونه‌ها اعمال گردید. سرعت بارگذاری در آزمایش SCB برابر با ۵۰/۸ میلی‌متر در دقیقه تنظیم گردید. برای انجام نمونه‌های موجود در دمای ۱۶، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در این دما قرار گرفته تا دمای همه قسمت های نمونه به این دما برسند. هدف از ایجاد این کار جلوگیری از تغییر شکل خزشی زیاد و ایجاد شکست ترد و یکنواخت در سطح نمونه‌ها بود. سپس نمونه‌ها بلافاصله در دستگاه قرار داده می‌شود و بارگذاری انجام می‌گیرد. تا زمانی که در نمونه ترک ایجاد گردد، نیرو افزایش داده می‌شود و به محض ایجاد ترک در نمونه، نیرو ثابت گردیده و بارگذاری نیز به صورت خودکار قطع می‌گردد. به‌منظور محاسبه خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی، ابتدا نمونه‌ها تحت نیرو دچار ترک خوردگی می‌گردند، سپس نمونه‌ها پس از خارج شدن از زیر دستگاه فشرده می‌شوند تا ترک ایجاد شده تا حد ممکن بسته شود. سپس نمونه‌های ترک خورده تحت گرمایش القایی در سه زمان مختلف ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه قرار گرفته و دوباره تحت آزمایش قرار می‌گیرند. نسبت مقاومت ثانویه به مقاومت اولیه، میزان خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی را نشان می‌دهد.

چقرمگی شکست مود I به عنوان معیار مقاومت در برابر شکست مخلوط‌های آسفالتی تعریف می‌شود. این پارامتر با استفاده از معادله (۱) برای نمونه‌هایی با عمق بریدگی ۱۰ و ۲۰ میلی‌متری که در دمای ۲۵ و ۱۶- درجه سانتی‌گراد آزمایش شده بودند، محاسبه شد.

$$KIC = \frac{F_{cr}}{2Rt} Y1\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

که در آن F_{cr} ، بار بحرانی برحسب (kN) است. R و t به ترتیب شعاع و ضخامت نمونه (m)، a عمق بریدگی (m) و Y ضریب شکل است که برای نمونه‌های مختلف SCB با استفاده از تحلیل اجزا محدود توسط آیت‌اللهی و علیها تعیین شد (Ziari et al., 2020).

نرخ آزادسازی انرژی بحرانی که با G_f نشان داده می‌شود، انرژی خارجی مورد نیاز برای رشد ترک را نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن مساحت زیر منحنی بار-تغییر شکل محاسبه می‌شود. سطح زیر نمودار از طریق انتگرال عددی و به روش دوزنقه ای محاسبه می‌گردد. با استفاده از نسبت مقدار کار انجام شده بر مساحت لیگمنت نمونه، مقدار انرژی شکست محاسبه می‌گردد (معادله ۲).

$$G_f = \frac{Wf}{Alig} \times 10^6 \quad (2)$$

که در آن G_f انرژی شکست برحسب ژول بر مترمربع، Wf میزان کار انجام شده برحسب ژول و $Alig$ مساحت لیگمنت و برحسب میلی مترمربع می‌باشد.



تاریخ برگزاری
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

دوین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2ND NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

به منظور دستیابی به درصد خود ترمیمی مخلوط‌های آسفالتی، انرژی شکست قبل و بعد از القا را محاسبه کرده و با استفاده از معادله ۳ مقدار خود ترمیمی محاسبه گردید.

$$\text{درصد خود ترمیمی} = \frac{\text{انرژی شکست بعد از القا}}{\text{انرژی شکست قبل از القا}} \times 100 \quad (3)$$

۲.۲. شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی از نوع پرسپترون چند لایه است. لایه ورودی ۹ نرون دارد و لایه خروجی دارای ۱ نرون است. تعداد لایه‌های میانی مخفی دو مقدار متفاوت دارند. در شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی با دو لایه پنهان انجام شد. در شبکه عصبی مصنوعی ساخته شده، روش آموزش از نوع لوبنبرگ-مارکوارت می‌باشد. همچنین جهت بررسی بازدهی شبکه از خطای مربع میانگین استفاده شده است. پارامترهای بهینه‌سازی در این الگوریتم تعداد نرون‌های لایه‌های مخفی است. تابع هدف در این الگوریتم، مقدار خطای مربع میانگین است و هدف، کمینه‌سازی این مقدار است. با توجه به رفتار پیچیده مواد روسازی آسفالت در شرایط بارگیری مختلف، ساختار روسازی و شرایط محیطی، پیش بینی دقیق تغییر شکل دائمی روسازی آسفالت دشوار است. نه پارامتر در الگوهای مختلف به عنوان ورودی به مدل در نظر گرفته شدند (جدول ۲). این نه پارامتر در چهار مدل مختلف تقسیم شدند تا اثر تغییر پارامترها نیز مشاهده شود.

جدول ۲- مدل‌های مختلف متغیرهای ورودی شبکه عصبی مصنوعی

مدل	متغیرهای ورودی
مدل ۱	نوع افزودنی+چقرمگی شکست+انرژی شکست قبل از القا
مدل ۲	مدل اول+انرژی شکست بعد از القا+طول
مدل ۳	مدل دوم+فرکانس+زمان القا
مدل ۴	مدل سوم+دما+مساحت

۳.۲. معیارهای ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل

برای بررسی دقت و قابلیت اعتماد مدل‌های ساخته شده از معیارهای زیر بهره‌گیری شد.

$$R^2 = \frac{n(\sum(HI_{obs} \cdot HI_{model}) - (\sum HI_{obs}) \cdot (\sum HI_{model}))}{\sqrt{[n \sum HI_{obs}^2 - (\sum HI_{obs})^2][n \sum HI_{model}^2 - (\sum HI_{model})^2]}} \quad (4)$$

$$ME = \frac{\sum(HI_{obs} - HI_{model})}{N} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(HI_{obs} - HI_{model})^2}{N}} \quad (6)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (HI_{obs} - HI_{model})^2}{\sum_{i=1}^n (HI_{obs} - HI_{mean})^2} \quad (7)$$



R^2 : ضریب تعیین؛ RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا؛ ME: میانگین خطا؛ NS: نش ساتکلیف

HI_{obs} , HI_{mean} و HI_{model} به ترتیب قابلیت خود ترمیمی متوسط اندازه‌گیری‌ها، اندازه‌گیری و تخمینی و N تعداد نقاط اندازه‌گیری هستند.

۳- نتایج و بحث

در جدول ۳ مشخصات پارامترهای مورد آزمایش در دو تیمار مورد بررسی آمده است. همانگونه که مشخص است میانگین مساحت در دو تیمار مورد بررسی نزدیک به هم بوده و دارای اختلاف زیادی نیستند. مشاهده می‌شود که هر دو آزمایش در دو دمای ۱۶- و ۲۵ درجه سانتی‌گراد و دو فرکانس ۸۷ و ۸۸ کیلوهرتز انجام شده است.

جدول ۳- مشخصات پارامترهای مورد بررسی در آسفالت حاوی ساسوبیت و زایکوترم

تیمار	درصد افزودنی	درصد قیر بهینه	میانگین مساحت (mm^2)	طول ناچ (mm)	دمای آزمایش ($^{\circ}C$)	فرکانس (kHz)	زمان القا (s)
آسفالت حاوی ساسوبیت	۳	۵/۵	۱۰۷۹/۱۷	۱۰ و ۲۰	۱۶- و ۲۵	۸۷ و ۸۸	۶۰، ۹۰ و ۱۲۰
آسفالت حاوی زایکوترم	۰/۱	۵/۸	۱۰۷۸/۶۴	۱۰ و ۲۰	۱۶- و ۲۵	۸۷ و ۸۸	۶۰، ۹۰ و ۱۲۰

در جدول ۴ مشخصات آماری چهار پارامتر چقرمگی شکست، انرژی شکست قبل از القا، انرژی شکست بعد از القا و قابلیت خودترمیمی در دو نوع آسفالت نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که میانگین چقرمگی شکست در آسفالت حاوی ساسوبیت (۰/۲۳) بیشتر از آسفالت حاوی زایکوترم (۰/۱۴) بود. چقرمگی شکست مخلوط‌های حاوی زایکوترم نسبت به مخلوط‌های حاوی ساسوبیت مقدار کمتری دارند؛ به عبارت دیگر زایکوترم موجود در مخلوط‌های آسفالتی نمونه‌های سست‌تری را تولید کردند و چقرمگی شکست کمتری داشتند. همچنین میانگین پارامتر انرژی شکست قبل از القا در تیمار ساسوبیت (۱۴۰/۷۵) کمتر زایکوترم (۱۸۷/۸۳) بود؛ اما میانگین پارامتر انرژی شکست بعد از القا در تیمار زایکوترم (۴۰/۳۲) نسبت به ساسوبیت (۳۳/۲۹) کمتر بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که میانگین مقدار قابلیت خودترمیمی در تیمار ساسوبیت معادل ۳۲/۵۲ بود که نسبت به تیمار زایکوترم با میانگین ۲۷/۵۲ بیشتر است. این موضوع نشان دهنده افزایش خاصیت خودترمیمی آسفالت توسط ساسوبیت در مقایسه با زایکوترم است. در مطالعات دیگری نیز نتایج مشابه به دست آمده است (Kie Badroodi et al., 2020).

جدول ۴- مشخصات آماری پارامترهای مورد بررسی در دو آسفالت

تیمار	پارامتر	کمترین	میانگین	بیشترین	انحراف استاندارد
آسفالت حاوی ساسوبیت	چقرمگی شکست	۰/۰۵	۰/۲۳	۰/۶۵	۰/۱۷
آسفالت حاوی ساسوبیت	انرژی شکست قبل از القا	۴/۲۷	۱۴۰/۷۵	۷۷۹/۱۴	۱۵۹/۴۹
آسفالت حاوی ساسوبیت	انرژی شکست بعد از القا	۴/۵۹	۴۰/۳۲	۱۰۲/۰۸	۲۷/۹۳
آسفالت حاوی ساسوبیت	HI	۵/۰۰	۳۲/۵۲	۷۵/۰۰	۱۹/۵۳
آسفالت حاوی ساسوبیت	چقرمگی شکست	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۰۳
آسفالت حاوی ساسوبیت	انرژی شکست قبل از القا	۱۵/۳۴	۱۸۷/۸۳	۴۷۰/۹۹	۱۳۵/۶۰



۳۶/۴۱	۱۳۲/۴۷	۳۳/۲۹	۵/۱۴	انرژی شکست بعد از القا	زایکوترم
۱۴/۲۴	۶۰/۰۰	۲۷/۵۲	۱۲/۵۰	HI	

در جدول ۵ مشخصات آماری دقت پیش‌بینی شاخص خودترمیمی در مدل‌های مختلف شبکه عصبی پرسپترون با تعداد لایه‌های پنهان برابر دو نمایش داده شده است. همانگونه که در جدول ۵ مشخص است نتایج سه بخش آموزش، آزمون و اعتبارسنجی نزدیک به هم بوده و یادگیری شبکه طراحی شده نسبتاً پایدار بوده است. برای بررسی دقت و صحت مدل‌های طراحی شده از چهار آماره R^2 , ME, RMSE و NS استفاده شده است که هر کدام از این آماره‌های دارای مفهوم ویژه و کاربرد متفاوتی دارند. آماره R^2 نشان دهنده میزان هم‌راستایی اطلاعات تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد، اما با استفاده از این آماره به وضوح نمی‌توان به میزان خطای رخ داده در مدل پی برد؛ بنابراین برای تعیین و تشخیص دقت میزان خطا از دیگر آماره استفاده شده است. از آماره ME برای تعیین کم تخمینی و بیش تخمینی مدل استفاده می‌شود، به این صورت که اگر مقادیر ME مثبت باشد نشان دهنده بیش تخمینی در مدل بوده است و بلعکس اگر مقادیر ME منفی باشد نشان کم تخمینی در مدل بوده است که بسته به اندازه ME این پدیده رخ داده است. دو آماره RMSE و NS از بهترین آماره‌های برای شناسایی و تعیین خطا در مدل هستند که در تحقیقات بسیار زیادی از آن‌ها استفاده شده است. این دو آماره به وضوح بیشتری نسبت به دیگر آماره‌ها به میزان اختلاف بین مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده می‌پردازند. در بسیاری از مطالعات پیشنهاد شده است که آماره NS به دلیل اثر تعداد پارامترهای در مقادیر نهایی نسبت به RMSE برتری دارد. مقدار R^2 هر چقدر به سمت یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده هم‌راستایی بهتر نتایج تخمین و اندازه‌گیری است، همچنین آماره NS نیز هر چقدر به سمت یک نزدیک باشد نشان از دقت خود در تخمین است. RMSE چون بیان کننده میزان خطا در مدل است، مقدار آن هر چقدر کمتر باشد نشان دهنده عملکرد بهتر مدل است و در خصوص ME نیز هر چقدر از هر دو سمت مثبت و منفی به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهنده تخمین با دقت بیشتر است.

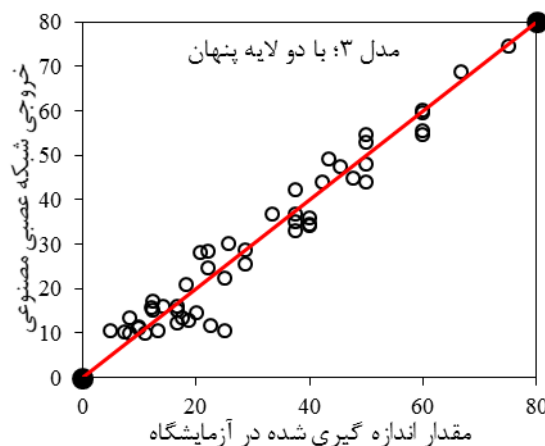
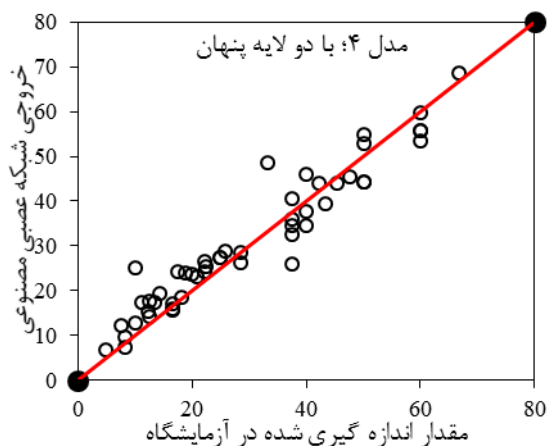
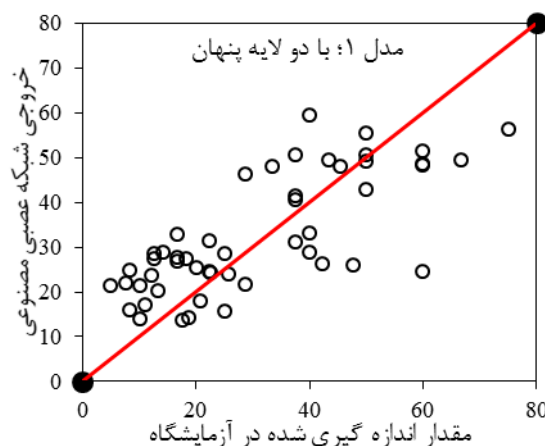
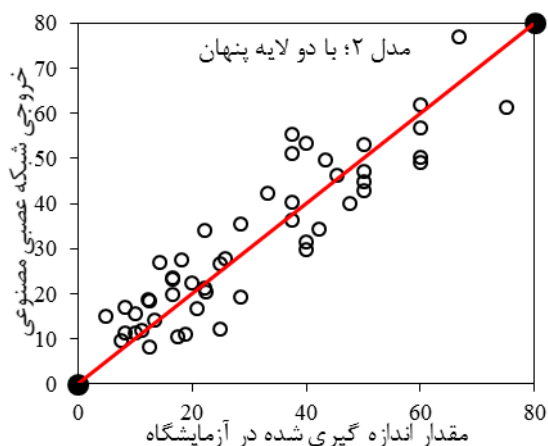
نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پارامترهای ورودی به مدل مقدار R^2 افزایش چشمگیری داشته است. به این صورت که در شبکه با دو لایه در بخش آزمون و اعتبارسنجی به ترتیب R^2 از ۰/۵۷ به ۰/۹۴ و ۰/۴۷ به ۰/۹۵ رسیده است (جدول ۵). مشاهده می‌شود که در جدول ۵ کمترین مقدار RMSE بخش آزمون در مدل ۳ برابر با ۳/۷۴ به دست آمده است. همچنین در همین حالت بیشترین مقدار آماره NS نیز معادل ۰/۹۲ به دست آمده است. بررسی آماره ME نشان می‌دهد که کم تخمینی و بیش تخمینی زیادی در اجرای شبکه‌های مختلف رخ نداده است. اضافه شدن پارامترهای مانند دما سبب افزایش دقت شده است، چراکه این پارامترهای از عوامل موثر بر خود ترمیمی هستند. از این‌رو لینگ و همکاران (Liang et al., 2021) بیان کردند که دما و زمان از عوامل بسیار مهم در قابلیت خودترمیمی آسفالت است. لیو و همکاران (Liu et al., 2013) و منوزی و همکاران (Menozzi et al., 2015) نیز به اهمیت موضوع دما و زمان در قابلیت خودترمیمی پرداختند. نوع افزودنی تاثیر بسیار زیادی بر چقرمگی آسفالت دارد (Behbahani et al., 2013; Podolsky et al., 2016)، علیها و همکاران (Aliha et al., 2015) بیان کردند که چقرمگی شکست یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر شکست در مخلوط آسفالتی است. از این‌رو این دو ویژگی به عنوان پایه قابلیت خودترمیمی در نظر گرفته شدند و در تمام مدل‌های مورد بررسی حضور دارند. پودولسکی و همکاران (Podolsky et al., 2016) بیان کردند که دما تاثیر بسیار زیادی بر روی چقرمگی شکست آسفالت دارد. وجود رابطه فیزیکی و مفهومی بین متغیرها باعث می‌شود ارتباط قوی‌تری ایجاد شده و این ارتباط مفهومی سبب کارایی بهت برآورد می‌شود.

جدول ۵- مشخصات صحت و دقت آماری شبکه عصبی پرسپترون طراحی شده با دو لایه پنهان در چهار مدل مختلف



مدل	آموزش				آزمون				اعتبارسنجی			
	NS	RMSE	ME	R ²	NS	RMSE	ME	R ²	NS	RMSE	ME	R ²
مدل ۱	۰/۷۵	۱۲/۲۴	۰/۰۲	۰/۵۷	۰/۴۵	۱۰/۴۶	-۷/۴۲	۰/۷۲	۰/۳۶	۱۲/۶۱	-۳/۸۲	۰/۴۷
مدل ۲	۰/۸۳	۷/۵۳	۰/۱۱	۰/۵۶	۰/۶۹	۷/۸۵	-۲/۴۳	۰/۷۵	۰/۷۲	۸/۲۴	-۴/۵۵	۰/۸۲
مدل ۳	۰/۹۴	۴/۵۰	۰/۶۲	۰/۹۴	۰/۹۲	۳/۷۴	۱/۳۳	۰/۹۴	۰/۹۰	۴/۸۸	-۱/۴۲	۰/۹۳
مدل ۴	۰/۹۳	۴/۸۶	-۱/۷۴	۰/۹۴	۰/۹۰	۴/۲۷	۰/۵۷	۰/۹۴	۰/۹۵	۳/۴۱	-۰/۷۲	۰/۹۵

در شکل ۱ نمودارهای یک به یک مربوط به شبکه عصبی پرسپترون در حالت‌های مختلف نمایش داده شده است. علاوه بر آماره ME و دیگر آماره‌ها، از شکل ۱ نیز می‌توان به صورت عینی جهت تشخیص دقت مدل و کم تخمینی و بیش تخمینی استفاده کرد. به این صورت که اگر پراکنش نقاط بالاتر از خط یک به یک باشد نشانگر بیش تخمینی و اگر این پراکنش پایین‌تر از خط یک به یک باشد نشان دهنده کم تخمینی است. همانگونه در شکل‌ها و جدول ۵ نشان داده شده است کم و بیش تخمینی به مقدار کمی رخ داده است و پراکنش عمده نقاط حول محور خط یک به یک است. این موضوع نشان دهنده تخمین نسبتاً خوب از خاصیت خودترمیمی آسفالت است.



شکل ۱- نمودار یک به یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه در مدل‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری



تاریخ برگزاری
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2ND NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

نتایج تحلیل شبکه عصبی نشان داد که اضافه شدن تعداد متغیرهای ورودی سبب افزایش دقت تخمین شد. بالاترین دقت در تخمین قابلیت خودترمیمی آسفالت در مدل چهار ورودی که شامل نه پارامتر بود و در تعداد چهار لایه پنهان به دست آمد. نتایج شبکه عصبی نشان داد که استفاده از مدل‌های شبکه عصبی می‌تواند با تقریب مناسبی خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی را تحت شرایط مختلف پیش‌بینی نماید. استفاده از شبکه عصبی با توجه به تقریب مناسب آن در پیش‌بینی خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی، مزایای زیست محیطی و اقتصادی زیادی را به همراه خواهد داشت.

منابع

1. Aliha, M.R.M., Behbahani, H., Fazaeli, H., Rezaifar, M.H. 2015. "Experimental study on mode I fracture toughness of different asphalt mixtures". *Scientia Iranica*. A 22(1):120-130.
2. Behbahani, H., Mohammad Aliha, M.R., Fazaeli, H., Aghajani, S. 2013. "Experimental fracture toughness study for some modified asphalt mixtures. In *Advanced Materials Research*" (Vol. 723, pp. 337-344). Trans Tech Publications Ltd.
3. Ceylan, H., Coree, B.J., Gopalakrishnan, K., Kota, T., Mathews, R. 2006. "Development of Mechanistic-Empirical Structural Design Program for Hot-Mix Asphalt Overlaid Rubblized Portland Cement Concrete Pavements".
4. Fakhri, M., Hahebrahimia, E., Chavoshian Naini, F. 2020. "Study Rutting and Effect of Self-healing on Fatigue Behavior of Modified Asphalt Mixtures". *Journal of Transportation Research*. 17(1):143-156
5. García, A., Bueno, M., Norambuena-Contreras, J., Partl, M.N. 2013. "Induction healing of dense asphalt concrete". *Construction and Building Materials*. 49:1-7
6. García, Á., Schlangen, E., Van de Ven, M. 2011. "Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete". *Fuel*. 90 (2):583-591
7. Gul, M.A., Irfan, M., Ahmed, S., Ali, Y., Khanzada, S. 2018. "Modelling and characterising the fatigue behaviour of asphaltic concrete mixtures". *Construction and Building Materials*. 184:723-732
8. Kie Badroodi, S., Keymanesh, M.R., Shafabakhsh, G. 2020. "Laboratory Study and Investigation on Significance Level of Fatigue Phenomenon in Warm Mix Asphalt Modified with Nano-Silica". *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*. 8 (2):92-113
9. Lee, Y.H., Liu, Y.B., Ker, H.W. 2007. "Application of modern regression techniques and artificial neural networks to pavement prediction modeling". In: 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
10. Liang, B., Lan, F., Shi, K., Qian, G., Liu, Z., Zheng, J. 2021. "Review on the self-healing of asphalt materials: Mechanism, affecting factors, assessments and improvements". *Construction and Building Materials*. 266: 120453.
11. Menozzi, A., Garcia, A., Partl, M., Tebaldi, G., Schuetz, P. 2015. "Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples". *Construction and Building Materials*. 74:162-8.
12. Podolsky, J.H., Buss, A., Williams, R.C., Cochran, E. 2016. "Comparative performance of bio-derived/chemical additives in warm mix asphalt at low temperature". *Materials and Structures*. 49(1):563-575.
13. Ramadan Suleiman, A., Nehdi, M.L. 2017. "Modeling self-healing of concrete using hybrid genetic algorithm-artificial neural network". *Materials* 10 (2):135
14. Zhu, X., Ye, F., Cai, Y., Birgisson, B., Yu, Y. 2020. "Digital image correlation-based investigation of self-healing properties of ferrite-filled open-graded friction course asphalt mixture". *Construction and Building Materials*. 234:117378
15. Ziari, H., Aliha, M., Moniri, A., Saghafi, Y. 2020. "Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber". *Construction and Building Materials*. 230:117015