

کاربرد سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی به منظور مدل‌سازی شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار

علیرضا غنی‌زاده*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۹۴/۰۴/۲۲ - پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۶

چکیده

معیارهای زیادی به منظور تعیین وضعیت خدمت‌دهی روسازی توسعه یافته است که یکی از مهم‌ترین این شاخص‌ها، شاخص ناهمواری بین‌المللی^۱ است. علاوه بر کاربرد شاخص ناهمواری بین‌المللی در تعیین وضعیت روسازی و سنجش نیازمندی‌های مرمت و نگهداری روسازی، در روش‌های جدید مکانیستیک- تجربی طراحی روسازی‌های صلب مانند روش MEPDG 2002 نیز پس از محاسبه تک‌تک خرابی‌ها باید با استفاده از یک مدل ریاضی، خرابی‌های مختلف روسازی به شاخص ناهمواری بین‌المللی تبدیل شوند تا بتوان مقدار ناهمواری روسازی را در سال‌های مختلف عمر بهره‌برداری پیش‌بینی نمود. بنابراین، تعیین شاخص ناهمواری بین‌المللی بر اساس خرابی‌های مشاهده شده در روسازی‌های صلب از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این تحقیق، از روش سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی^۲ به منظور مدل‌سازی شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار^۳ با استفاده از داده‌های برنامه بلندمدت عملکرد روسازی^۴ استفاده شده است. متغیرهای مستقل در مدل- سازی شامل عمر روسازی برحسب سال، شاخص ناهمواری بین‌المللی اولیه برحسب متر در هر کیلومتر، درصد دال‌های با ترک‌های عرضی، درصد خردشدگی درزها، مساحت وصله‌های انعطاف‌پذیر و صلب برحسب درصد، مجموع پلکانی شدن درزها برحسب متر در هر کیلومتر، شاخص یخبندان برحسب درجه سانتی‌گراد- روز، درصدی از مصالح بستر روسازی که از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متری عبور می‌کند و متغیر وابسته به صورت شاخص ناهمواری بین‌المللی برحسب متر در هر کیلومتر در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب رگرسیون بین شاخص ناهمواری بین‌المللی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه NCHRP و سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی بر اساس داده‌های آزمون به ترتیب برابر با ۰/۶۰۱ و ۰/۷۵۸ است. بنابراین، می‌توان دید که استفاده از مدل توسعه داده شده بر اساس سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی امکان پیش‌بینی دقیق‌تر شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار را نسبت به معادله ارائه شده توسط NCHRP فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، شاخص ناهمواری بین‌المللی، شبکه عصبی مصنوعی.

-
- 1- International Roughness Index (IRI)
 - 2- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)
 - 3- Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)
 - 4- Long Term Pavement Performance (LTPP)

۱. مقدمه

جاده‌های ناهموار، عدم رضایت استفاده‌کنندگان، افزایش زمان‌های سفر و افزایش هزینه‌های عملکردی وسایل نقلیه را در پی دارند و بار مالی بسیار زیادی را به اقتصاد کشورها وارد می‌کنند. گرچه عملکرد سازه‌ای روسازی برای مهندسين راه‌سازی بسیار مهم است، اما بخش قابل توجهی از فعالیت‌های مرمت و بهسازی، پیامدهای بروز ناهمواری در جاده‌ها است.

ناهمواری، از زمان آزمایش راه اش‌تو به‌عنوان معیاری برای قابلیت خدمت‌دهی و عملکرد روسازی مطرح بوده است. مفهوم نرخ قابلیت خدمت‌دهی فعلی^۱ به‌عنوان معیاری برای قابلیت روسازی جهت خدمت-دهی به ترافیک عبوری پذیرفته شده است. برای مقاصد عملی، شاخص خدمت‌دهی فعلی^۲ (PSI) به‌عنوان معیاری عینی جهت تعیین عملکرد روسازی بر اساس اندازه‌گیری فیزیکی خرابی‌ها در سطح روسازی ارائه شده است (کری و آیریک، ۱۹۹۰). هرچند اندازه‌گیری‌های فیزیکی مورد استفاده در محاسبه PSI شامل خرابی‌هایی نظیر ترک‌خوردگی و لکه‌گیری است، اما این پروفیل طولی یا ناهمواری روسازی است که همبستگی زیادی با PSI دارد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ناهمواری مقیاس مناسبی برای قابلیت خدمت‌دهی روسازی است و بسیاری از مؤسسات برای تخمین قابلیت خدمت‌دهی از اندازه‌گیری ناهمواری استفاده می‌کنند (اش‌تو، ۱۹۸۷؛ یانوف و لانهام، ۱۹۹۱؛ العمری و دارتر، ۱۹۹۲؛ اسمیت و همکاران، ۱۹۹۷).

ناهمواری به‌صورت نوسانات تراز ارتفاعی سطح جاده که سبب لرزش وسایل نقلیه عبوری می‌شوند، قابل تعریف است (سایرز و گیلسی، ۱۹۸۶). هرچند روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ناهمواری روسازی وجود دارد، ولی یکی از پرکاربردترین و مقبول‌ترین شاخص‌ها در حال حاضر، شاخص ناهمواری بین-

المللی^۳ است (کی‌روز و هادسون، ۱۹۸۴). شاخص ناهمواری بین‌المللی، حرکت عمودی تجمعی محور تعلیق خودرو تقسیم بر مسافت پیموده شده است که بر اساس مدل ریاضی یک ماشین نیمرخ‌سنج شبیه‌سازی شده که پروفیل مورد نظر را با سرعت ۸۰ km/h می‌پیماید، به دست می‌آید.

شاخص ناهمواری بین‌المللی به دلایل زیر به‌عنوان معیاری استاندارد برای سنجش ناهمواری روسازی پذیرفته شده است:

- در طول زمان ثبات دارد و چون فقط یک رابطه آماری از نیمرخ جاده است، به‌سادگی می‌توان آن را از ترازهای ارتفاعی نیمرخ طولی مجدداً محاسبه نمود.
- با خروجی‌های دیگر ابزارهای اندازه‌گیری ناهمواری، در سرعت‌های مختلف، همبستگی زیادی دارد.
- با درک استفاده‌کننده از قابلیت خدمت‌دهی همبستگی خوبی دارد.

در حال حاضر، بانک جهانی، شاخص ناهمواری بین‌المللی را به‌عنوان معیاری قابل اطمینان برای سنجش ناهمواری پیشنهاد نموده است (سایرز و همکاران، ۱۹۸۶a؛ سایرز و همکاران، ۱۹۸۶b؛ NQI، ۱۹۹۶). همچنین، اداره راه فدرال (FHWA) شاخص ناهمواری بین‌المللی را به‌عنوان استاندارد جهت اندازه‌گیری ناهمواری پذیرفته است و از سال ۱۹۸۹ به بعد تمامی ایالت‌های آمریکا را ملزم کرده که ناهمواری روسازی راه‌های شریانی برون‌شهری، آزادراه‌های شهری و بین‌ایالتی را برحسب شاخص ناهمواری بین‌المللی گزارش کنند (کی‌روز و هادسون، ۱۹۸۴). در ایران نیز بر اساس دستورالعمل تحویل موقت راه‌ها (شورای عالی فنی امور زیربنایی حمل‌ونقل، ۱۳۸۵)، یکی از شاخص‌های تحویل موقت راه، شاخص ناهمواری بین‌المللی است که مقادیر آن برای آزادراه‌ها، بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی در جدول ۱ داده شده است.

1- Present Servisibility Rating (PSR)
2- Present Servisibility Index (PSI)

3- International Roughness Index (IRI)

جدول ۱. شاخص ناهمواری بین‌المللی پیشنهادی جهت تحویل موقت آزادراه‌ها، بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی (شورای عالی فنی امور زیربنایی حمل‌ونقل، ۱۳۸۵)

مقدار شاخص IRI (m/km)	وضعیت روسازی و نحوه اظهار نظر
IRI < 1.2	بسیار خوب، قابل تحویل و تشویق
1.2 < IRI < 1.6	خوب، قابل تحویل
1.6 < IRI < 2.2	متوسط، قابل تحویل مشروط
2.2 < IRI < 3	خراب، غیرقابل تحویل
IRI > 3	خیلی خراب

قابلیت خدمت‌دهی (PSR) و ناهمواری (IRI) بررسی شد. در این بررسی، بر اساس پلکانی شدن تجمعی درز (in/mile)، تعداد ترک‌های عرضی در هر مایل، درصد درزهای شکسته شده و شدت ترک‌خوردگی‌های طولی (ft/mile) مدلی برای نرخ PSR روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار (JPCP) ارائه گردید. در این بررسی، برای هر دو نوع روسازی بتنی غیرمسلح درزدار یک مدل IRI ارائه شد که IRI را به پلکانی شدن تجمعی درز (in/mile)، تعداد ترک‌های عرضی در هر مایل و درصد درزهای شکسته ربط می‌داد.

العمری و دارتر (۱۹۹۴)، تأثیر خرابی‌های منفرد و ترکیبی از خرابی‌ها را بر شاخص ناهمواری بین‌المللی روسازی‌های صلب بررسی کردند. آن‌ها به‌منظور پیش‌بینی IRI بر اساس پلکانی شدن درز یک مدلی خطی ارائه کردند که ضریب رگرسیون آن ۰/۵ بود. این محققین پایین بودن ضریب رگرسیون را به وجود خرابی‌های دیگر در سطح روسازی نسبت دادند. آن‌ها همچنین تأثیر ترک‌های عرضی شدید و خردشدگی درزهای عرضی را بر IRI بررسی کردند. نتایج نشان داد هنگامی که تعداد دال‌های ترک‌خورده از ۰ به ۵۰ درصد می‌رسد، شاخص ناهمواری بین‌المللی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این بررسی نشان داد که بین IRI و درصد درزهای خردشده رابطه‌ای تقریباً خطی وجود دارد.

شخاران (۲۰۰۰)، برای پیش‌بینی شرایط روسازی‌های مختلف شامل روسازی‌های انعطاف‌پذیر اولیه

علاوه بر کاربرد شاخص ناهمواری بین‌المللی در سنجش نیازمندی‌های مرمت و نگهداری روسازی، در روش‌های مکانیستیک - تجربی طراحی روسازی‌های صلب، پس از محاسبه تک‌تک خرابی‌ها باید با استفاده از یک مدل ریاضی خرابی‌های مختلف روسازی به شاخص ناهمواری بین‌المللی تبدیل شوند تا بتوان مقدار ناهمواری روسازی را در سال‌های مختلف عمر بهره‌برداری پیش‌بینی نمود (NCHRP، ۲۰۰۴). بنابراین، تعیین شاخص ناهمواری بین‌المللی بر اساس خرابی‌های مشاهده شده در روسازی‌های صلب از اهمیت بسیاری برخوردار است.

۲. پیشینه تحقیق

تاکنون محققین زیادی به بررسی رابطه بین خرابی‌های روسازی‌های صلب و شاخص ناهمواری بین‌المللی این روسازی‌ها پرداخته‌اند. دارتر و برنبرگ (۱۹۷۶) با مطالعه روسازی‌های بدون نگهداری بر پایه داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش راه‌اشتبو، مدلی را برای پیش‌بینی نرخ قابلیت خدمت‌دهی روسازی‌های صلب ارائه نمودند. در این مدل، PSR بر اساس پلکانی شدن مسیر عبور چرخ (in/1000ft)، سطوح خرد شده با قطر بیش از ۳ اینچ (ft²/1000ft²)، ترک‌خوردگی‌های نوع ۳ و ۴ (ft²/1000ft²) و لکه‌گیری (ft²/1000ft²) بیان گردید.

یو و همکاران (۱۹۹۸) عملکرد روسازی‌های بتنی را بررسی نمودند. در این مطالعه، تأثیر خرابی‌ها روی

کاربرد سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به منظور مدل‌سازی شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار

شبکه عصبی با دقت خوبی می‌تواند شاخص ناهمواری بین‌المللی را پیش‌بینی نمایند. در این تحقیق، ضریب تبیین برای مجموعه آموزش برابر با ۰/۸۴ و برای مجموعه تست برابر با ۰/۸۱ به دست آمد. مجموعه آموزش رکوردهایی از پایگاه داده را تشکیل می‌داد که پارامترهای شبکه عصبی بر اساس آن‌ها تنظیم می‌شدند و مجموعه تست شامل رکوردهایی از پایگاه داده بود که به‌منظور اعتبار سنجی مدل شبکه عصبی مورد استفاده قرار می‌گرفت.

عبدالحمید و البداوی (۲۰۱۳)، شاخص ناهمواری بین‌المللی روسازی‌های بتنی درزدار را با استفاده از شبکه‌های عصبی مدل کردند. نتایج نشان داد که شبکه عصبی با دقت خوبی می‌تواند شاخص ناهمواری بین‌المللی را پیش‌بینی نماید. در این تحقیق، ضریب R^2 برای کل داده‌ها برابر با ۰/۸۲۸ به دست آمد.

موروا و همکاران (۲۰۱۳)، شاخص خدمت‌دهی فعلی روسازی‌های صلب را با یک مدل مبتنی بر شبکه عصبی پیش‌بینی کردند. آن‌ها برای ساخت این مدل از ۴۹ داده به دست آمده از آزمایش AASHTO استفاده کردند. این داده‌ها شامل واریانس شیب، شیارشدگی، ترک‌خوردگی، خردشدگی و لکه‌گیری می‌شد. در مقایسه با رابطه PSI به دست آمده از آزمایش AASHTO، نتایج مدل شبکه عصبی ارائه شده به درک استفاده‌کنندگان از شرایط روسازی (PSR) نزدیک‌تر بود.

لو (۲۰۱۴)، با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی، خرابی‌های روسازی بزرگراه‌ها و پارکینگ‌های بین‌ایالتی کنتاکی را بررسی نمود و برای خرابی‌های روسازی یک شاخص ترکیبی پیشنهاد کرد. داده‌های استفاده شده در این بررسی شامل نوع روسازی، مشخصات اجرایی، عمر روسازی، ترک-خوردگی، شیارشدگی و کناررفتگی^۱ می‌شد. این داده‌ها برای انواع مختلف روسازی‌ها شامل روسازی‌های

(بدون روکش)، روسازی‌های انعطاف‌پذیر روکش شده، روسازی‌های مرکب، روسازی‌های بتنی درزدار و پیوسته، مدل‌هایی مبتنی بر شبکه عصبی ارائه کرد. متغیرهای توصیفی شامل مشخصات سازه‌ای روسازی، عمر روسازی و بارهای ترافیکی برحسب محور منفرد هم‌ارز ۱۸ کیلو پوندی، کیفیت فعالیت‌های نگهداری و حجم ترافیک عبوری به‌عنوان ورودی مدل‌های شبکه عصبی استفاده گردید. برای اطمینان از قابلیت پیش‌بینی شبکه‌های عصبی، از همان متغیرهای توصیفی برای ساخت مدل‌های رگرسیونی استفاده شد و نتایج مدل‌های شبکه عصبی و مدل‌های رگرسیونی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که شبکه عصبی بهتر از مدل رگرسیونی عمل می‌کند؛ چون شبکه عصبی شکل قابل تغییری از رابطه سببی ارائه داده و می‌تواند هر شکل تابعی از رابطه را محاسبه نماید.

فلکر و همکاران (۲۰۰۴)، برای پیش‌بینی ناهمواری روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار ساخته شده در ایالت کانزاس، مدل‌های دقیق و قابل اطمینانی با استفاده از شبکه عصبی ارائه کردند. آن‌ها داده‌های ورودی شبکه عصبی را در ۶ گروه دسته‌بندی کردند: داده‌های مربوط به طرح روسازی شامل ضخامت دال و استفاده از لایه اساس با قابلیت زهکشی یا لایه اساس بدون قابلیت زهکشی، مشخصات مصالح بتنی، بارهای ترافیکی غالب، شرایط غالب محیطی، ویژگی‌های خاک بستر و کیفیت اجرا. نتایج نشان داد که این مدل با دقت بسیار خوبی ناهمواری روسازی را پیش‌بینی می‌کند ($R^2=0.89$).

تئومت و همکاران (۲۰۰۴)، شاخص ناهمواری بین‌المللی روسازی‌های بتنی درزدار را با استفاده از شبکه‌های عصبی فراابتکاری مدل کردند. داده‌های ورودی شبکه عصبی شامل مقدار IRI اولیه، عمر روسازی، پلکانی‌شدن، ویژگی‌های ترافیک عبوری و ترک-خوردگی‌های عرضی برای سه سطح مختلف کم، متوسط و شدید می‌شد. نتایج نشان داد که مدل‌های

1- Shoving

در راهنمای طراحی مکانیستیک- تجربی روسازی (MEPDG) برای پیش‌بینی ناهمواری روسازی‌های بتنی غیرمسلح در زردار (JPCP) رابطه زیر پیشنهاد شده است (NCHRP، ۲۰۰۴):

$$IRI = IRI_1 + 0.013 \times TC + 0.007 \times SPALL + 0.005 \times PATCH + 0.0015 \times TFAUL + 0.45 \times SF \quad (1)$$

مدل‌سازی ناهمواری روسازی‌های انعطاف‌پذیر (ترزی)، تا کنون از این روش برای مدل‌سازی شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح در زردار استفاده نگردیده است.

در این مقاله، بر اساس داده‌های برداشت شده در مقاطع LTPP و با بهره‌گیری از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی، مدلی به‌منظور پیش‌بینی دقیق شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح در زردار توسعه داده شده و نتایج آن با داده‌های میدانی و رابطه ارائه شده توسط NCHRP (۲۰۰۴) مقایسه گردیده است.

۳. سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی

سیستم‌های استنتاج تطبیقی عصبی- فازی برای اولین بار توسط جانگ با آموزش یک سیستم استنتاج فازی^۱ در چارچوب یک شبکه عصبی تطبیقی معرفی گردید (جانگ، ۱۹۹۳). ساختار یک شبکه عصبی تطبیقی شامل تعدادی گره در لایه‌های مختلف است که با یکدیگر ارتباط دارند. خروجی این شبکه وابسته به پارامترهای قابل تنظیم این گره‌ها است. قواعد یادگیری شبکه تعیین می‌کند که چگونه این پارامترها به‌منظور کمینه کردن خطا به‌روز شوند.

ساختار یک سیستم استنتاج فازی شامل سه جزء اصلی شامل پایگاه قواعد، پایگاه داده و یک مکانیسم استدلال است. یک پایگاه قواعد فازی شامل قواعد اگر- آنگاه فازی است. به‌عنوان مثال، یک قاعده می‌تواند به‌صورت "اگر سن روسازی کم باشد آنگاه مقدار

آسفالتی، بتنی (PCC)، روسازی‌های بتنی- آسفالتی (AC/PCC) جمع‌آوری گردید. نتایج نشان داد که مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی می‌توانند خرابی‌های روسازی را با دقت خوبی پیش‌بینی کنند ($R^2=0.8$) و خطای کم).

که در این رابطه:

IRI_1 = شاخص ناهمواری بین‌المللی اولیه اندازه-گیری شده، m/km

TC = درصدی از دال‌ها با ترک‌های عرضی (تمامی شدت‌ها)

SPALL = درصد درزهای خردشده (تمامی شدت‌ها)

PATCH = سطوحی از روسازی با لکه‌گیری‌های انعطاف‌پذیر و صلب (تمامی شدت‌ها)، برحسب درصد TFAULT = کل نشست تجمعی درزها در هر کیلومتر، mm

SF = ضریب منطقه‌ای که برابر است با $SF = Age \times (1 + FI) \times (1 + P_{200}) / 1000000$

Age = عمر روسازی، سال

FI = شاخص یخبندان

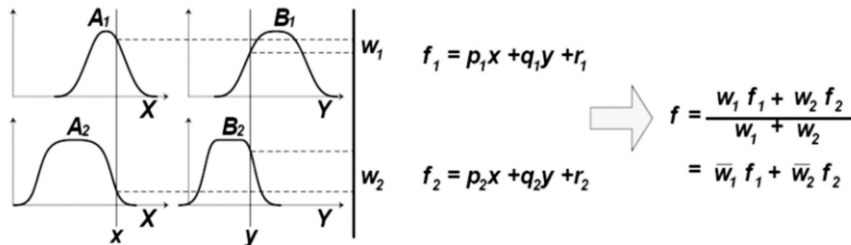
P_{200} = درصدی از مصالح بستر روسازی که از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متری عبور می‌کند.

این معادله بر اساس ۱۸۳ داده برداشت شده در مقاطع LTPP به‌دست آمده است و دارای ضریب $R^2=0.6$ است.

سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به‌عنوان یک ابزار قوی مدل‌سازی در سال‌های اخیر مطرح گردیده و محققین مختلف به‌صورت موفق از آن در مدل‌سازی‌های مختلف در مهندسی روسازی استفاده نموده‌اند (تیگ‌دمیر و همکاران، ۲۰۰۲؛ گویالاکریشنان و خایتان، ۲۰۱۰؛ طباطبایی و همکاران، ۲۰۱۳؛ ترزی، ۲۰۱۳؛ شفابخش و تناکی‌زاده، ۲۰۱۵؛ پورطهماسب و همکاران، ۲۰۱۵). با وجود بهره‌گیری از این روش در

کاربرد سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به منظور مدلسازی شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار

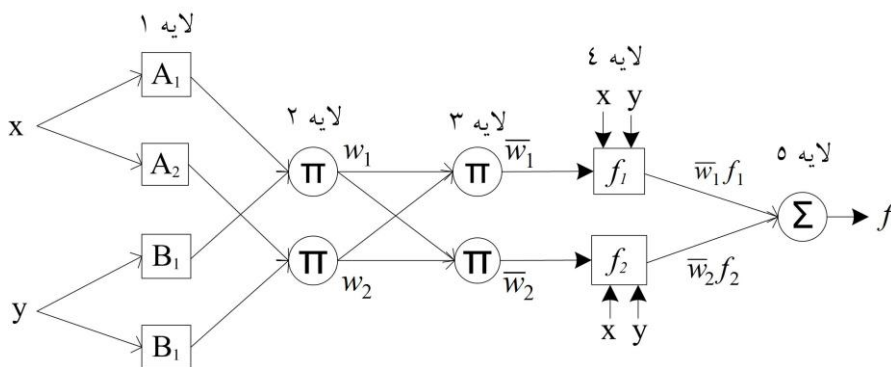
دو متغیر X و Y ورودی و یک متغیر خروجی Z باشد. بعلاوه، پایگاه قواعد شامل دو قاعده اگر- آنگاه فازی مشابه قواعد شرح داده شده توسط تاکاجی و سوگنو مطابق شکل ۱ خواهد بود.



شکل ۱. مدل استنتاج فازی سوگنو مرتبه اول با دو ورودی و دو قاعده

توابع به‌کار برده شده برای هر گره در یک لایه مشابه می‌باشند. $O_{1,i}$ خروجی i امین گره از I امین لایه است. خروجی هر لایه می‌تواند به‌صورت زیر محاسبه شود (جانگ و همکاران، ۱۹۹۷):

در شکل ۱، f_i یک چندجمله‌ای درجه یک است و به همین دلیل این مدل به مدل فازی درجه یک سوگنو معروف است. معماری سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی در شکل ۲ نشان داده شده است. به‌طوری که نوع



شکل ۲. معماری سیستم ANFIS معادل با سیستم استنتاجی شکل ۱

دوزنقه‌ای (رابطه ۵) و تابع مثلثی (رابطه ۶) تعریف شود:

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad (3)$$

$$\mu_{A_i}(x) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2} \quad (4)$$

لایه ۱: گره‌ها در این لایه، گره‌های تطبیقی هستند. خروجی هر گره می‌تواند به‌صورت رابطه (۲) محاسبه شود:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad (2)$$

به‌طوری که x مقدار ورودی به گره A_i ، i برحسب متغیر کلامی مربوطه و $O_{1,i}$ تابع عضویت متغیر کلامی A_i می‌باشند. تابع عضویت می‌تواند به‌صورت تابع زنگوله‌ای شکل (رابطه ۳)، تابع گوسی (رابطه ۴)، تابع

مرحله آموزش ANFIS به‌منظور تنظیم همه پارامترهای قابل تنظیم (پارامترهای تابع هدف و نتیجه‌گیری) و با هدف به‌دست آوردن مقادیر پارامتر خروجی از سیستم ANFIS که بیشترین تطابق را با داده‌های آموزش داشته باشند، انجام می‌شود. پس از آموزش ANFIS می‌توان با معرفی داده‌های مختلف ورودی، خروجی را به دست آورد.

با فرض ثابت بودن پارامترهای تابع هدف، خروجی ANFIS می‌تواند با استفاده رابطه (۱۱) به دست آید (جانگ و همکاران، ۱۹۹۷):

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \quad (11)$$

$$= \bar{w}_1(p_1x + q_1y + r_1) + \bar{w}_2(p_2x + q_2y + r_2)$$

در حقیقت، f یک ترکیب خطی از پارامترهای نتیجه‌گیری $p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2$ است. به‌منظور تعیین پارامترهای فوق، از آنجایی که خروجی سیستم نسبت به پارامترها خطی است، روش کمترین مربعات با هدف حداقل کردن خطای پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم ترکیبی یادگیری در هر تکرار شامل دو مسیر است که عبارت‌اند از:

۱- مسیر رفت. در مسیر رفت، بردار متغیرهای ورودی ارائه شده و مقدار گره خروجی هر لایه تا لایه ۲ محاسبه می‌شود. پارامترهای نتیجه‌گیری با استفاده از روش کمترین مربعات تعیین می‌شوند. بعد از تعیین پارامترهای قسمت نتیجه‌گیری با روش کمترین مربعات، خطا تعیین شده و سپس مقدار خطا برای همه داده‌های آموزشی محاسبه می‌شود.

۲- مسیر برگشت. در مسیر برگشت، خطاهای خروجی پخش شده و پارامترهای توابع عضویت با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی به‌روز می‌شوند. لازم به ذکر است که پارامترهای نتیجه‌گیری تحت شرط ثابت بودن پارامترهای توابع عضویت بهینه می‌شوند. از این‌رو، همگرایی نگرش ترکیبی یادگیری بسیار سریع‌تر از روش اصلی پس‌انتشار است.

$$\mu_{A_i}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_i \\ \frac{x - a_i}{b_i - a_i} & a_i \leq x \leq b_i \\ 1 & b_i \leq x \leq c_i \\ \frac{d_i - x}{d_i - c_i} & c_i \leq x \leq d_i \\ 0 & d_i \leq x \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{B_i}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_i \\ \frac{x - a_i}{b_i - a_i} & a_i \leq x \leq b_i \\ \frac{c_i - x}{c_i - b_i} & b_i \leq x \leq c_i \\ 0 & c_i \leq x \end{cases} \quad (6)$$

در روابط فوق a_i, b_i, c_i, d_i و σ_i مجموعه پارامترهایی هستند که شکل تابع با تغییر آن‌ها تغییر خواهد کرد. این پارامترها در طول فرایند آموزش تنظیم می‌شوند.

لایه ۲: مقدار هر گره در این لایه ثابت بوده و نشان‌دهنده شدت خروجی قاعده \bar{A}_m است. خروجی این لایه حاصل ضرب سیگنال‌های همه ورودی‌ها بوده و به‌صورت رابطه (۷) قابل محاسبه است:

$$o_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(x) \quad i=1,2,\dots \quad (7)$$

لایه ۳: هر گره در این لایه ثابت بوده و نسبت شدت \bar{A}_m قاعده را محاسبه می‌کند و به‌صورت رابطه (۸) قابل محاسبه است:

$$o_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i=1,2,\dots \quad (8)$$

لایه ۴: گره‌ها در این لایه اجراکننده خروجی هر قاعده هستند و به‌صورت رابطه (۹) می‌باشند:

$$o_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i) \quad i=1,2,\dots \quad (9)$$

پارامترهای p_i, q_i, r_i به‌عنوان پارامترهای بخش نتیجه هستند و در طی مرحله آموزش واسنجی می‌شوند.

لایه ۵: تک گره موجود در این لایه یک گره ثابت است که مقدار نهایی پارامتر خروجی را به‌عنوان مجموعی از سیگنال‌های ورودی نشان می‌دهد و به‌صورت رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$o_{5,i} = \sum \bar{w}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i} \quad i=1,2,\dots \quad (10)$$

کاربرد سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به منظور مدل‌سازی شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار

ایالات متحده و کانادا بود (FHWA، ۱۹۹۶؛ روشن و هریس، ۱۹۹۳ و SHRP، ۱۹۹۲).

مجموعه داده‌های به‌دست‌آمده از سیستم مدیریت اطلاعات LTPP که برای ساخت مدل استفاده شدند عبارت‌اند از داده‌های مربوط به خرابی‌های روسازی (جمع‌آوری شده با وسایل دستی یا خودکار) و داده‌های مربوط به پروفیل طولی. داده‌های خرابی جمع‌آوری شده با وسایل دستی یا خودکار، نمایانگر شرایط خرابی روسازی، به‌ویژه خرابی‌های سطحی، می‌باشند. این داده‌ها فراوانی و شدت خرابی‌هایی مانند ترک‌خوردگی-ها (طولی، عرضی و دوام)، پمپ‌شدگی، پلکانی شدن، خرابی‌های اطراف درز، خرابی‌های سطح روسازی و تغییر شکل‌های رویه روسازی را نشان می‌دهند. بعلاوه، فعالیت‌های ترمیم و نگهداری نیز مانند لکه‌گیری ثبت شده‌اند (FHWA، ۱۹۹۶؛ روشن و هریس، ۱۹۹۳ و SHRP، ۱۹۹۲).

در سیستم مدیریت اطلاعات LTPP برای استخراج داده‌های خرابی سطحی از بازرسی چشمی سطح روسازی یا تفسیر چشمی عکس‌های ۳۵ میلی-متری گرفته شده از سطح روسازی (با کیفیت بالا) استفاده گردیده است. این داده‌ها هر ۱ یا ۲ سال جمع‌آوری شده است (روشن و هریس، ۱۹۹۳ و SHRP، ۱۹۹۲).

داده‌های مربوط به پروفیل طولی، ارتفاع نسبی سطح روسازی در طول مسیر چرخ را نشان می‌دهند. داده‌های خام شامل داده‌های پروفیل X-Y مسیر عبور هر چرخ می‌شد که طی حداقل ۵ تکرار برای هر مسیر چرخ به دست آمده بودند (FHWA، ۱۹۹۶؛ روشن و هریس، ۱۹۹۳ و SHRP، ۱۹۹۲). ادارات منطقه‌ای LTPP مسئول جمع‌آوری داده‌های پروفیل طولی با استفاده از نیم‌رخ‌سنج‌ها بودند (FHWA، ۱۹۹۶). پروفیل طولی هر مقطع آزمایش LTPP تقریباً هر سال یک‌بار بررسی شده است. برای بررسی اثرات فصلی (تأثیر تغییر فصل)

به‌منظور بررسی عملکرد سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی و مقایسه آن با معادله پیشنهادی توسط NCHRP از معیارهای MAE، RMSE، MAPE و R^2 استفاده گردید. این پارامترها با استفاده از روابط (۱۲) الی (۱۵) قابل محاسبه می‌باشند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2} \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{\left(N \sum_{i=1}^N d_i y_i - \sum_{i=1}^N d_i \sum_{i=1}^N y_i \right)^2}{\left(N \sum_{i=1}^N d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N d_i \right)^2 \right) \left(N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right)} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |d_i - y_i|}{N} \quad (14)$$

$$MAPE = 100 \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{d_i - y_i}{d_i} \right| \quad (15)$$

که N تعداد رکوردها جهت تست شبکه عصبی، d_i مقدار مطلوب برای داده i ام، y_i مقدار پیش‌بینی شده برای داده i ام، RMSE میانگین ریشه مربع خطا، MAE میانگین قدر مطلق خطا، MAPE میانگین درصد قدر مطلق خطا و R^2 ضریب رگرسیون است.

۴. داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی

۴-۱. آماده‌سازی پایگاه داده

داده‌های لازم برای آموزش و آزمون ANFIS از بانک اطلاعاتی GPS-3 LTPP به دست آمدند. روسازی‌های GPS به‌طور کلی متشکل از مقاطع روسازی شده موجود می‌باشند که توسط ادارات حمل‌ونقل استانی و ایالتی کانید شده‌اند و توسط هیئت SHRP و FHWA برای انجام برنامه جمع‌آوری اطلاعات برنامه عملکرد بلندمدت روسازی (LTPP) انتخاب گردیده‌اند. مصالح مورد استفاده در ساخت این روسازی‌ها و طرح‌های سازه‌ای آن‌ها بر اساس روش‌های استاندارد متداول در

که x_{ik} مقدار متغیر مستقل i ام برای داده k ام و y_k مقدار متغیر وابسته برای داده k ام (نظیر x_{ik}) و m تعداد کل داده‌ها است. در صورتی که R_i عددی مثبت شود، ورودی مورد نظر روی خروجی تأثیر مثبت دارد و در صورتی که R_i عددی منفی شود، ورودی مورد نظر روی خروجی تأثیر منفی دارد. همچنین، در صورت عدم ارتباط پارامتر خروجی و ورودی، مقدار R_i برابر با صفر خواهد بود.

شکل ۳ درجه اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی را برای تعیین شاخص ناهمواری روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار نشان می‌دهد. این تحلیل حساسیت بر اساس ۱۸۳ داده اندازه‌گیری شده در برنامه عملکرد بلندمدت روسازی (LTPP) انجام شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، پارامتر ورودی شاخص ناهمواری بین‌المللی اولیه دارای بیشترین درجه اهمیت و پارامتر ورودی سطوحی از روسازی با لکه‌گیری‌های انعطاف‌پذیر و صلب دارای کمترین اهمیت در تعیین شاخص ناهمواری بین‌المللی روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار می‌باشند.

مقاطع هر سال چهار بار مورد بررسی قرار گرفته‌اند (FHWA, ۱۹۹۶).

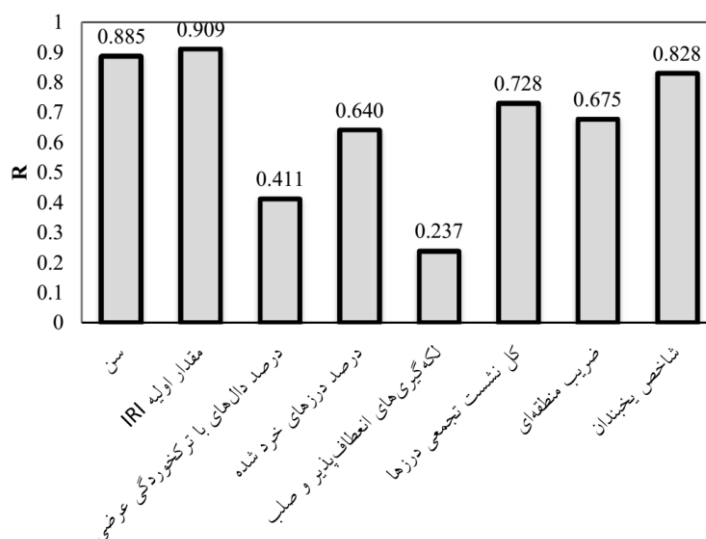
در مجموع، داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی شاخص ناهمواری بین‌المللی متشکل از ۱۸۳ رکورد داده است. هر رکورد این پایگاه داده شامل شاخص ناهمواری بین‌المللی اولیه اندازه‌گیری شده برحسب m/km درصدی از دال‌ها با ترک‌های عرضی (تمامی شدت‌ها)، درصدی از درزهای خرد شده (تمامی شدت‌ها)، سطوحی از روسازی با لکه‌گیری‌های انعطاف‌پذیر و صلب (تمامی شدت‌ها)، برحسب درصد، پلکانی شدن تجمعی درزها در هر کیلومتر برحسب mm عمر روسازی برحسب سال، شاخص یخبندان و درصد عبوری مصالح خاک بستر از الک 0.075 میلی‌متر است.

۴-۲. تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت معمولاً به منظور تعیین درجه اهمیت تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی (متغیرهای مستقل) بر پارامتر خروجی (متغیر وابسته) انجام می‌شود. تعیین درجه اهمیت هر یک از ورودی‌ها به انتخاب مدل مناسب جهت برقراری ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی کمک می‌کند. یکی از روش‌های تحلیل حساسیت، روش CAM^۱ است که می‌تواند به منظور بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی مورد استفاده قرار گیرد (یانگ و ژانگ، ۱۹۹۷). در این روش، درجه حساسیت پارامتر ورودی با تعیین درجه همبستگی بین جفت داده‌های ورودی و خروجی و با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$R_i = \frac{\sum_{k=1}^m x_{ik} y_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{ik}^2 \sum_{k=1}^m y_k^2}} \quad (16)$$

1 - Cosine Amplitude Method



شکل ۳. درجه همبستگی بین پارامترهای مختلف و شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی بتنی غیر مسلح درزدار

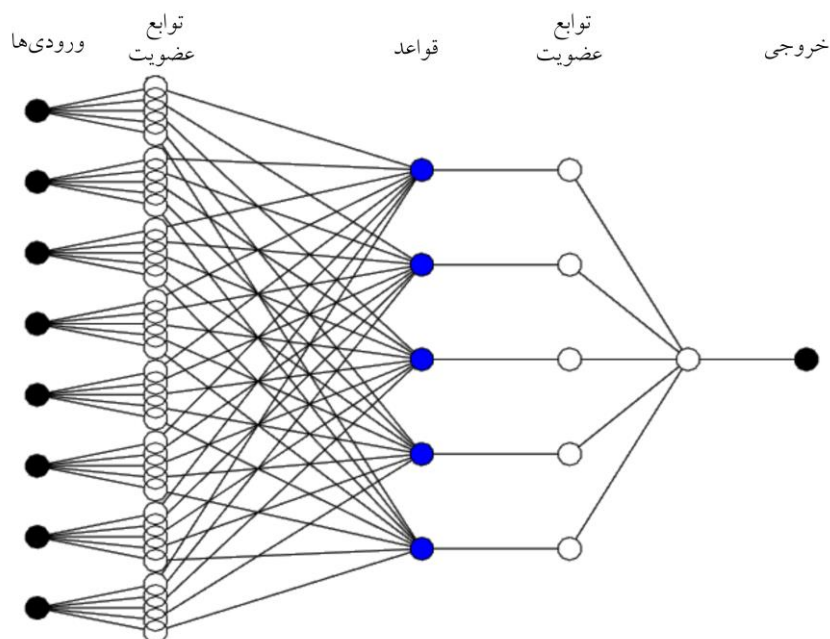
۵. مدل‌سازی

۵-۱. مدل‌سازی شاخص ناهمواری بین‌المللی با

استفاده از ANFIS

به‌منظور تعیین معماری بهینه شبکه عصبی مصنوعی، یک شبکه عصبی مصنوعی با یک لایه مخفی در نظر گرفته شد و با تغییر تعداد نرون‌ها در لایه مخفی، معماری بهینه این شبکه عصبی تعیین گردید. به‌منظور آموزش و تست شبکه عصبی از مجموع ۱۸۳ داده استفاده گردید که ۷۷ درصد از داده‌ها (۱۴۱ رکورد) به‌عنوان مجموعه آموزش و ۲۳ درصد (۴۲ رکورد) از داده‌ها به‌عنوان مجموعه تست مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور تعیین معماری بهینه ANFIS و تعمیم‌پذیری مناسب آن، اجراهای مختلفی با استفاده از تغییر پارامترهای مختلف برای ANFIS انجام شد و در نهایت تعداد بهینه توابع عضویت برابر با ۵ عدد و توابع عضویت از نوع گوسی در نظر گرفته شد. معماری بهینه ANFIS به‌منظور پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های غیر مسلح درزدار در شکل ۴ نشان داده شده است.

به‌منظور پیش‌بینی شاخص ناهمواری روسازی‌های بتنی غیر مسلح درزدار بر اساس سایر خرابی‌های این نوع روسازی‌ها، از یک سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی بهره‌گیری شد. ورودی‌های ANFIS شامل عمر روسازی برحسب سال، شاخص ناهمواری بین‌المللی اولیه برحسب متر در هر کیلومتر، درصد دال‌های با ترک‌های عرضی، درصد خردشدگی درزها، مساحت وصله‌های انعطاف‌پذیر و صلب برحسب درصد، مجموع پلکانی‌شدن درزها برحسب متر در هر کیلومتر، شاخص یخبندان برحسب درجه سانتی‌گراد-روز و خروجی ANFIS به‌صورت شاخص ناهمواری بین‌المللی برحسب متر در هر کیلومتر در نظر گرفته شد. داده‌های مورد استفاده برای آموزش و تست ANFIS متشکل از ۱۸۳ داده حاصل از مقاطع GPS-3 برنامه عملکرد طولانی‌مدت روسازی (LTPP) بوده است.



شکل ۴. معماری سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به منظور پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی

از روش ANFIS برای مجموعه آموزش، مجموعه آزمون و کل داده‌ها به ترتیب برابر با ۰/۷۵۳، ۰/۹۳۱ و ۰/۸۹۴ است که نشان‌دهنده تعمیم‌پذیر بودن روش ANFIS به منظور پیش‌بینی شاخص ناهمواری روسازی‌های بتنی غیر مسلح در زردار است.

پارامترهای مختلف مربوط به عملکرد ANFIS با توجه به داده‌های آموزش، داده‌های آزمون و کل داده‌ها در جدول ۲ داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، ضریب رگرسیون بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده شاخص ناهمواری بین‌المللی با استفاده

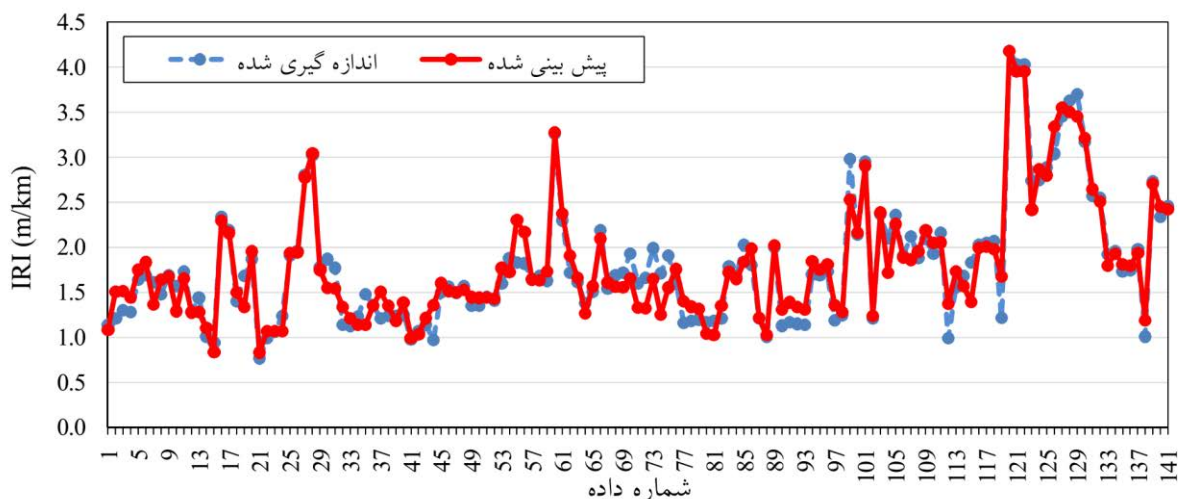
جدول ۲. خلاصه نتایج حاصل از آموزش و آزمون با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی

مجموعه داده	مجموعه آموزش	مجموعه آزمون	کل داده‌ها
RMSE	۰/۱۷۷	۰/۳۲۵	۰/۲۱۸
R ²	۰/۹۳۱	۰/۷۵۳	۰/۸۹۴
MAE	۰/۱۳۴	۰/۲۳۷	۰/۱۵۸
MAPE	۸/۵	۱۲/۷۵۶	۹/۴۷۸

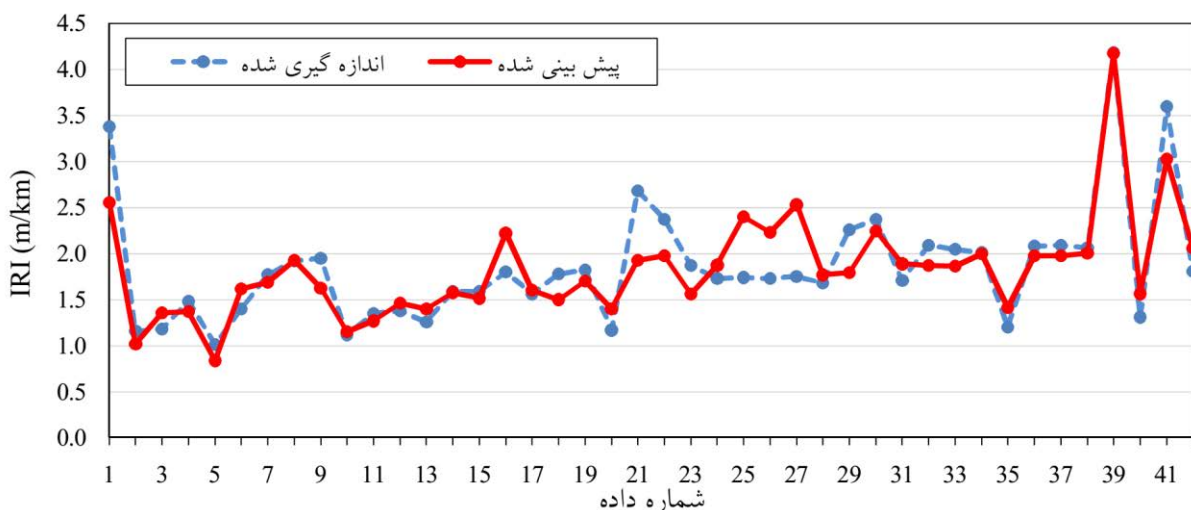
کمتر است. با این وجود، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، روش شبکه عصبی دارای دقت قابل قبولی در پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی با توجه به داده‌های تست است. در جدول ۲، خلاصه نتایج حاصل از آموزش و آزمون شبکه عصبی مصنوعی داده شده است.

عملکرد ANFIS جهت پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی با توجه به مجموعه آموزش و تست به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، دقت ANFIS با توجه به مجموع داده‌های آموزش بسیار بالا است و دقت پیش‌بینی ناهمواری با استفاده از داده‌های تست

کاربرد سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به منظور مدل‌سازی شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار



شکل ۵. عملکرد ANFIS در پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی با توجه به مجموعه آموزش



شکل ۶. عملکرد ANFIS در پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی با توجه به مجموعه تست

مطابق با مجموعه آزمون به‌کاررفته در توسعه ANFIS محاسبه شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار R^2 به‌دست آمده برای داده‌های آزمون با استفاده از رابطه NCHRP برابر با ۰/۶۰۱ است که بسیار کمتر از مقدار به‌دست آمده از روش ANFIS (۰/۷۵۳) است. مقایسه سایر پارامترهای عملکردی نیز تأیید می‌کنند که دقت روش ANFIS بسیار بیشتر از رابطه رگرسیون ارائه شده توسط NCHRP است.

۲-۵. مقایسه روش سیستم استنتاج تطبیقی

عصبی- فازی با روش رگرسیون غیرخطی

پارامترهای مختلف مربوط به عملکرد رابطه پیشنهادی توسط NCHRP با توجه به داده‌های آزمون و کل داده‌ها در جدول ۳ داده شده است. با توجه به اینکه رابطه پیشنهادی توسط NCHRP بر اساس کل داده‌ها (۱۸۳ داده) توسعه داده شده است، لذا در اینجا تنها برای مقایسه پارامترهای عملکردی برای مجموعه آزمون

جدول ۳. پارامترهای عملکردی رابطه NCHRP با توجه به داده‌های آزمون و کل داده‌ها

مجموعه داده	مجموعه آزمون	کل داده‌ها
-------------	--------------	------------

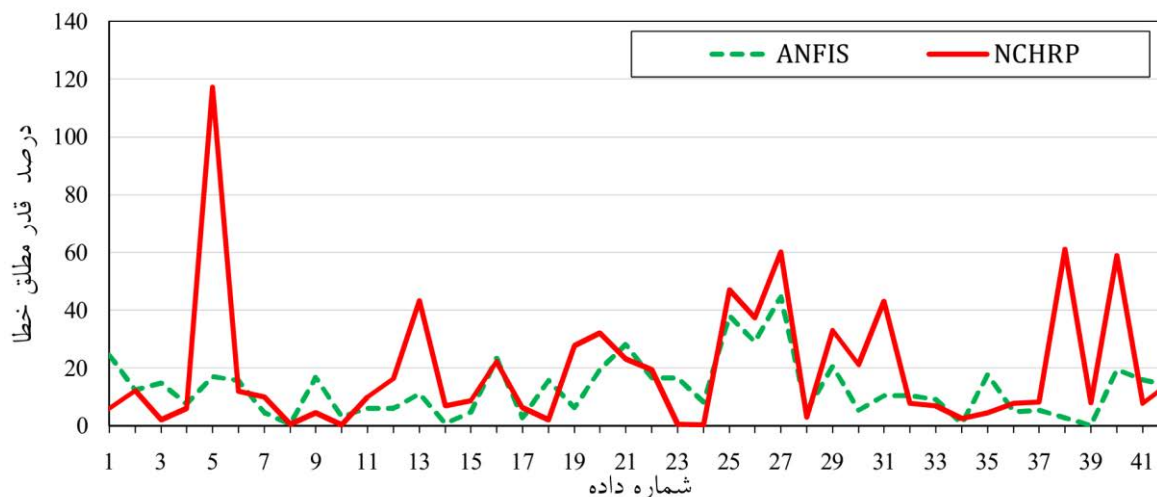
۰/۵۶۹	۰/۴۸۷	RMSE
۰/۶۰۰	۰/۶۰۱	R ²
۰/۳۹۱۷	۰/۳۵۱	MAE
۲۱/۵۱۱	۲۰/۳۲	MAPE

شکل ۷ درصد خطای پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی را با استفاده از روش‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، خطای پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی با استفاده از روش ANFIS در اکثر موارد بسیار کمتر از شاخص ناهمواری بین‌المللی پیش‌بینی شده با استفاده از معادله NCHRP است. مورد اخیر از مقایسه میانگین ریشه مربع خطا نیز قابل استنتاج است. به طوری که مقدار این پارامتر با استفاده از هر یک از روش‌های NCHRP و ANFIS به ترتیب برابر با ۰/۴۸۷ و ۰/۳۲۵ به دست آمده است.

به منظور مقایسه نتایج پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی با استفاده از روش ANFIS با نتایج به دست آمده از معادله پیشنهاد شده توسط NCHRP (معادله ۱)، درصد خطای حاصل از پیش‌بینی با استفاده از هر یک از این دو روش برای داده‌های آزمایش تعیین شد. درصد قدر مطلق خطا برای هر داده با استفاده از رابطه زیر به دست آمده است:

$$EP = \left| \frac{IRI_P - IRI_O}{IRI_O} \right| \times 100 \quad (17)$$

که در این رابطه EP درصد قدر مطلق خطا، IRI_P مقدار پیش‌بینی شده شاخص ناهمواری بین‌المللی و IRI_O مقدار اندازه‌گیری شده شاخص ناهمواری بین‌المللی است.



شکل ۷. درصد خطای روش‌های مختلف در پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی با استفاده از مجموعه آزمون

۱. انجام تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که پارامتر ورودی شاخص ناهمواری بین‌المللی اولیه دارای بیشترین درجه اهمیت (درجه همبستگی برابر با ۰/۹۰۹) و پارامتر ورودی سطوحی از روسازی با لکه‌گیری‌های

۶. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر قابل بیان می‌باشند:

کاربرد سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به منظور مدل‌سازی شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار

۴. ضریب رگرسیون بین شاخص ناهمواری بین‌المللی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه NCHRP و روش ANFIS بر اساس ۴۲ داده آزمون به ترتیب برابر با ۰/۶۰۱ و ۰/۷۵۳ است. همچنین، مقایسه سایر پارامترهای عملکردی نیز تأیید می‌کنند که دقت روش ANFIS بسیار بیشتر از رابطه رگرسیون ارائه شده توسط NCHRP است.

۵. با توجه به اینکه در حال حاضر در راهنمای طراحی روسازی به روش مکانیستیک- تجربی از رابطه NCHRP به‌منظور پیش‌بینی شاخص ناهمواری بین‌المللی روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار استفاده می‌شود، توصیه می‌شود که به‌منظور افزایش دقت از مدل مبتنی بر روش ANFIS بهره‌گیری شود.

انعطاف‌پذیر و صلب دارای کمترین اهمیت (درجه همبستگی برابر با ۰/۲۳۷) در تعیین شاخص ناهمواری بین‌المللی روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار می‌باشند.
۲. روش مبتنی بر سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی با دقت مناسب توانایی مدل‌سازی شاخص ناهمواری روسازی را دارد. دقت حاصل از این روش بسیار بیشتر از دقت حاصل از رابطه پیشنهادی توسط NCHRP است. در سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به‌کار رفته در این تحقیق، تعداد بهینه توابع عضویت برابر با ۵ عدد و توابع عضویت از نوع گوسی انتخاب شدند.
۳. ضریب رگرسیون بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده شاخص ناهمواری بین‌المللی با استفاده از روش ANFIS برای مجموعه آموزش، مجموعه آزمون و کل داده‌ها به ترتیب برابر با ۰/۷۵۳، ۰/۹۳۱ و ۰/۸۹۴ است.

۷. مراجع

شورایعالی فنی امور زیربنایی حمل و نقل. ۱۳۸۵. "دست‌العمل تحویل موقت و قطعی راه‌ها". وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری.

- Abd El-Hakim R. and El-Badawy, S. 2013. "International roughness index prediction for rigid pavements: An artificial neural network application". *Adv. Mater. Res.* 723: 854-860.
- Al-omari, B. and Darter, M. I. 1992. "Relationships between IRI and PSR. University of Illinois at Urbana-Champaign".
- Al-Omari, B. and Darter, M. I. 1994. "Relationships between International Roughness Index and Present Serviceability Rating". *Transportation Research Record*, 1435.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 1987. "Summary results of 1987 AASHTO rideability survey".
- Cary, Jr, W. and Irick, P. 1960. "The Pavement Serviceability- Performance Concept". *Highway Research Board Bulletin*, 250.
- Darter, M. I. and Barenberg, E. J. 1976. "Zero-Maintenance Pavements: Results of Field Studies on the Performance Requirements and Capabilities of Conventional Pavement". *Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-76-105*, Washington, DC.
- Federal Highway Administration. 1993. "Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Project". SHRP-P-338, Strategic Highway Research Program, Washington, DC.
- Federal Highway Administration. 1996. "Long-Term Pavement Performance Information Management System Data Users Reference Manual". Washington, DC.
- Felker, V., Najjar, Y. M. and Hossain, M. 2004. "Modeling the Roughness Progression on Kansas Portland Cement Concrete (PCC) Pavements". *Kansas Department of Transportation*.
- Gopalakrishnan, K. and Khaitan, S. K. 2010. "Finite element based adaptive neuro-fuzzy inference technique for parameter identification of multi-layered transportation structures". *Transport* 25(1): 58-65.
- Jang, J. S. R. 1993. "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Trans. on*, 23(3), 665-685.
- Jang, J. S. R., Sun, C. T. and Mizutani, E. 1997. "Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence". Prentice Hall, N. J.
- Janoff, M. S. and Lanham, M. D. 1991. "Pavement Smoothness". *National Asphalt Pavement Association (NAPA)*.

- Luo, C. 2014. "Pavement deterioration modeling and design of a composite pavement distress index for Kentucky interstate highways and parkways". MSc. Thesis, University of Louisville, Kentucky.
- Morova, N., Serin, S., Terzi, S. and Saltan, M. 2013. "Prediction of the pavement serviceability ratio of rigid highway pavements by artificial neural networks". *J. Adv. Technol. Sci.*, 2(1): 12-25.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). 2001. "Guide for Mechanistic- Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structure". Appendix PP: Smoothness prediction for rigid pavements, Final document, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).
- National Quality Initiative (NQI). 1996. "National Highway Users Survey". Coopers and Lybrand, L.L.P. Opinion Research Cooperation.
- Pourtahmasb, M. S., Karim, M. R. and Shamshirband, S. 2015. "Resilient modulus prediction of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregate using an adaptive neuro-fuzzy methodology". *Constr. Buil. Mater.* 82: 257-263.
- Queiroz, C. A. V. and Hudson, W. R. 1984. "A stable, consistent and transferable roughness scale for worldwide standardization". *Transport. Res. Rec.* 997: 46-55.
- Rowshan, S. and S. Harris 1993. "Long Term Pavement Performance Information Management System". FHWA-RD-93-094, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Sayers, M. W. and Gillespie, T. D. 1986. "The International road roughness experiments: A basis for establishing a standard scale for road roughness measurements". *Transport. Res. Rec.* 1084: 76-85.
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D. and Paterson, W. D. O. 1986a. "Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements". Technical Paper 46, The World Bank, Washington, DC.
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D. and Queiroz, C. A. V. 1986b. "The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements". Technical Paper 45, The World Bank, Washington, DC.
- Shafabakhsh, G. and Tanakizadeh, A. 2015. "Investigation of loading features effects on resilient modulus of asphalt mixtures using adaptive neuro-fuzzy inference system". *Constr. Buil. Mater.* 76: 256-263.
- Shekharan, A. R. 2000. "Pavement Performance Prediction by Artificial Neural Network". Proc. 2nd International Workshop, Computational Intelligence Applications in Pavement and Geomechanical Systems, A. A. Balkema.
- Smith, K., Smith, K. D., Evans, L. D., Hoerner, T. E. and Darter, M. I. 1997. "Smoothness Specifications for Pavements". Final Report NCHRP 1-31.
- Strategic Highway Research Program. 1992. "SHRP Database Structure Reference Manual". Washington, DC.
- Tabatabaei, S. A., Khaledi, S. and Jahantabi, A. 2013. "Modeling the Deduct value of the pavement condition of asphalt pavement by adaptive neuro fuzzy inference system". *Int. J. Pavement Res. Technol.* 6(1): 59-65.
- Teomete, E., Bayrak, M. B. and Agarwal, M. 2004. "Use of Artificial Neural Networks for Predicting Rigid Pavement Roughness". Transportation Scholars Conference, Iowa State University, Ames, Iowa, USA.
- Terzi, S. 2013. "Modeling for pavement roughness using the ANFIS approach". *Adv. Eng. Software* 57: 59-64.
- Tigdemir, M., Karasahin, M. and Sen, Z. 2002. "Investigation of fatigue behaviour of asphalt concrete pavements with fuzzy-logic approach". *Int. J. Fatigue*, 24(8): 903-910.
- Yang, Y. and Zhang, Q. 1997. "Analysis for the Results of Point Load Testing with Artificial Neural Network". Proc. Int. Conf. Comp. Methods and Adv. in Geomech., A. A. Balkema, Rotterdam.
- Yu, H. T., Darter, M. I., Smith, K. D., Jiang, J. and Khazanovich, L. 1998. "Performance of Concrete Pavements". Volume III, Improving Concrete Pavement Performance, Report No. FHWA-RD-95-111, Federal Highway Administration, Washington, DC.