ارائه روش جدید برای پیش‌بینی مدل اضمحلال و بهبود شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی انعطاف‌پذیر

رضا سپاس‌پور، دانشجو، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه امیرکبیر، تهران
مهرداد احسانی، دانشجو، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه امیرکبیر، تهران
حامد ناصری، دانشجو، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه امیرکبیر، تهران
فریدون مقدس نژاد*، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه امیرکبیر، تهران

Email: Moghadas@aut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۹ – پذیرش: ۱٤۰۰/۰۷/۰۷

چکیده

شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی وضعیت روسازی است که در سیستم‌های مدیریت و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری روسازی استفاده می‌شود. در این مطالعه، به کمک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی تفاضلی و توسعه آن به روش یادگیری ماشین و با استفاده از پایگاه داده‌های برنامه بلندمدت روسازی، دو مدل برای پیش‌بینی اضمحلال شاخص بین‌المللی ناهمواری و بهبود عملکرد روسازی تحت اعمال روکش ارائه شده است. برای توسعه مدل اضمحلال روسازی، متغیرهای آب و هوایی، ترافیکی و سازه‌ای در نظر گرفته شده‌اند و رابطه‌ای برای پیش‌بینی افزایش شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی ارائه شده است. همچنین، میزان بهبود شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی تحت تأثیر روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری مرسوم در ایران بررسی شد و رابطه‌ای برای پیش‌بینی میزان کاهش این شاخص تحت اعمال روکش ارائه شده است. تعداد ۵۲۰ و ۳۳٦ ردیف داده برای توسعه مدل‌های اضمحلال و بهبود عملکرد روسازی استفاده شده است. مدل‌های پیش‌بینی شده از دقت بسیار خوبی برخوردارند. ضریب تعیین مدل اضمحلال روسازی ارائه شده برابر با ۰/۹۹ و میانگین خطای مطلق معادله ارائه شده برای داده‌های آموزش و آزمایش کمتر از ۰/۱ می‌باشد که دقت آن در مقایسه با سایر مدل‌های ارائه شده تا کنون به دلیل در نظر گرفتن متغیرهای متنوع و روش توسعه داده شده، بسیار زیاد است. ضریب تعیین مدل بهبود توسعه‌یافته برای داده‌های آموزش و آزمایش برابر ۰/۹۷ و جذر میانگین مربعات خطا تقریباً برابر ۰/۲ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی، اضمحلال روسازی انعطاف‌پذیر، مدل‌سازی، بهبود عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر، الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی تفاضلی

۱. مقدمه

امروزه، تنها توجه به مسائل نگهداری روسازی کافی نیست و در کنار آن، بهره‌گیری از سیستم‌های مدیریت روسازی[۱] یک نیاز به شمار می‌رود. وظیفه یک سیستم مدیریت روسازی تعیین روشی منسجم برای انتخاب الزامات تعمیر و نگهداری، تعیین اولویت‌ها و زمان بهینه اجرای تعمیرات از طریق پیش‌بینی وضعیت روسازی در آینده است (شاهین، ۱۹۹٤). در حقیقت، سیستم مدیریت روسازی، ابزاری تحلیلی و روشی آماری است که به مدیران در تصمیم‌گیری برای نگه‌داشتن روسازی در شرایط عملکردی و خدمت‌پذیری مناسب در طول چرخه عمر آن کمک می‌کند (زیاری و همکاران، ۲۰۱٦). شرط لازم برای یک سیستم کامل مدیریت روسازی، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی اضمحلال و بهبود عملکرد وضعیت روسازی می‌باشد. مدل‌های پیش‌بینی وضعیت روسازی در دو سطح شبکه و پروژه برای تحلیل وضعیت روسازی و تصمیم‌گیری درباره فعالیت‌های تعمیر و نگهداری استفاده می‌شوند؛ زیرا رویکرد هر دو سطح مدیریت، بهبود عملکرد روسازی بوده و اقدامات مربوط به حفظ و نگهداری روسازی در مقایسه با اقداماتی همچون بازسازی در اولویت است (لو و تولیور، ۲۰۱۲). از طرفی، مدل‌های بهبود عملکرد روسازی نیز به دو دسته کوتاه-مدت و بلندمدت تقسیم می‌شوند. مدل‌های بهبود عملکرد کوتاه‌مدت روسازی بسیار رایج هستند، زیرا علاوه بر مشخص نمودن میزان تأثیر عملیات تعمیر و نگهداری مدنظر بر رفتار و شرایط کوتاه‌مدت روسازی، می‌توانند به محققین در تحلیل تأثیر روش‌های تعمیر و نگهداری مختلف به ازای هزینه آن‌ها در بلندمدت و همچنین به مدیران در اتخاذ تصمیم درست برای اجرای روش تعمیر و نگهداری بهینه کمک کنند (لابی و سینها، ۲۰۰۳).

شاخص‌هایی برای توصیف و ارزیابی شرایط عملکردی روسازی موجود هستند که از جمله پرکاربردترین آن‌ها می‌توان به شاخص بین‌المللی ناهمواری[۲] (IRI) اشاره نمود. این شاخص علاوه بر اینکه اطلاعاتی راجع به وضعیت روسازی بیان می‌کند، نمایانگر کیفیت سواری و سطح راحتی استفاده‌کنندگان از راه نیز می‌باشد (عبدالعزیز و همکاران، ۲۰۱۸). افزایش ناهمواری راه می‌تواند تبعاتی همچون افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، افزایش مصرف سوخت، کاهش کارایی خودروها و اختلال در سیستم زهکشی راه‌ها را در پی داشته باشد (لو و تولیور، ۲۰۱۲؛ عبدالعزیز و همکاران، ۲۰۱۸؛ لین و همکاران، ۲۰۰۳). با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر خرابی‌های روسازی و بررسی اثر همزمان آن‌ها به کمک مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی، می‌توان پیش‌بینی دقیقی از نرخ افزایش شاخص‌های خرابی روسازی از جمله شاخص بین‌المللی ناهمواری به‌دست آورد.

هدف مدل‌های بهبود عملکرد روسازی، بررسی میزان تأثیر گزینه‌های تعمیر و نگهداری بر روسازی می‌باشد. مدل‌های کوتاه‌مدت بهبود عملکرد روسازی، تأثیر روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری را بر میزان کاهش شاخص بین‌المللی ناهمواری راه‌ها بررسی کرده و میزان بهبود وضعیت روسازی را پس از اعمال هر روش مشخص می‌نماید (لو و تولیور، ۲۰۱۲؛ لابی و سینها، ۲۰۰۳). در مطالعات انجام شده، به مدل‌سازی و پیش‌بینی شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی پرداخته شده است. علت این امر آن است که جمع‌آوری داده‌ها برای تحلیل سایر خرابی‌های روسازی بسیار پرهزینه و زمان‌بر بوده و از آنجا که این شاخص با سایر خرابی‌های روسازی ارتباط متقابل دارند، پس منطقی است که به پیش‌بینی این شاخص برای تشخیص نرخ اضمحلال روسازی بسنده شود. همچنین، با پیش‌بینی این شاخص

[۱]- Pavement management systems

[۲]- International Roughness Index

می‌توان با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی، میزان بهبود عملکرد روسازی را تحت اعمال روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری تخمین زد. در این مدل‌ها، تأثیر روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری و اثر کوتاه‌مدت آن‌ها بر شاخص بین‌المللی ناهمواری به صورت جداگانه بررسی می‌شود و میزان بهبود عملکرد روسازی به ازای اعمال میزان مشخصی از هر روش مشخص می‌گردد. این امر می‌تواند به مدیران برای تصمیم‌گیری در خصوص عملیات تعمیر و نگهداری با در نظر گرفتن هزینه چرخه عمر کمک نماید (عبدالعزیز و همکاران، ۲۰۱۸؛ لین و همکاران، ۲۰۰۳).

تاریخچه مدل‌های پیش‌بینی شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی و همچنین مدل‌های پیش‌بینی بهبود این شاخص تحت اعمال روش‌های تعمیر و نگهداری، حاکی از آن است که بیشتر مطالعات انجام گرفته بر مبنای روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی بوده است (لو و تولیور، ۲۰۱۲؛ عبدالعزیز و همکاران، ۲۰۱۸). مدل‌های پیش‌بینی موجود در راهنمای طراحی مکانیکی- تجربی روسازی نیز مبتنی بر روش‌های آماری و رگرسیون می‌باشد (ونگ و همکاران، ۲۰۰۷). ارتباط میان مصالح، متغیرهای ساخت و عملکرد روسازی بسیار پیچیده است و به کمک روش‌های آماری قدیمی قابل بیان نیست (چوی و همکاران، ۲۰۰٤). برخی از مدل‌های جدید مبتنی بر روش‌های یادگیری ماشین[۱] هستند که می‌توان به روش شبکه عصبی مصنوعی[۲] (ANN) اشاره کرد. عبدالعزیز و همکاران (۲۰۱۸) طی مطالعه‌ای در پی یافتن مدل پیش‌بینی دقیقی برای شاخص بین‌المللی ناهمواری بودند که از هر دو روش رگرسیون خطی چندمتغیره و شبکه عصبی استفاده کردند. در این مطالعه، ضریب تعیین مدل (R^2) ساخته شده به روش شبکه عصبی ۰/۷۵ و در روش رگرسیون ۰/۵۷ بود که نشان‌دهنده برازندگی بهتر مدل به روش شبکه عصبی است. همچنین، تعداد داده‌های مشاهداتی این مطالعه ۲٤۳۹ ردیف داده بوده است و مدل‌های ارائه شده از دقت قابل قبولی برخوردار نیستند. مطالعه‌ای دیگر در این زمینه توسط محمد جعفر و همکاران (۲۰۱٦) بر روی پایگاه داده‌های برنامه بلندمدت روسازی[۳] (LTPP) برای پیش‌بینی این شاخص به دو روش رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی انجام پذیرفت که با در نظر گرفتن متغیرهای ترافیک، سن، مقدار اولیه شاخص بین‌المللی ناهمواری و پارامترهای سازه‌ای روسازی به مقدار برازندگی ۰/۸ در مدل ساخته شده، دست یافتند. مزاری و رودریگز (۲۰۱٦) با استفاده از داده‌های برنامه بلندمدت روسازی، مدل‌هایی به دو روش الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی ارائه کردند که برازندگی مدل‌های به‌دست آمده در این مطالعه نسبت به مطالعات دیگر کمتر بود که می‌تواند به علت کم بودن تعداد داده‌های مشاهداتی و یا عدم در نظر گرفتن تمامی متغیرهای ورودی مؤثر در مدل باشد. اگر چه مدل‌های به‌دست آمده به روش‌های یادگیری ماشین قابل اعتمادتر از روش‌های رگرسیون می‌باشند، اما اکثر این روش‌ها رابطه ریاضی بین متغیرهای ورودی و خروجی را ارائه نمی‌دهند و می‌تواند نقطه ضعف آن‌ها در قیاس با مدل‌های رگرسیون باشد. همچنین، در مرور ادبیات گذشته، مدل‌هایی که بتوانند در عین سادگی و دور از محاسبات پیچیده، نتیجه قابل قبولی برای پیش‌بینی شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی ارائه دهند، کمتر دیده می‌شود (دالاروسا و همکاران، ۲۰۱۷). در مطالعات دیگر در زمینه بهبود شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی، لو و تولیور (۲۰۱۲) طی پژوهشی به کمک روش آماری رگرسیون، رابطه‌ی میان بهبود این شاخص تحت اعمال چهار روش تعمیر و نگهداری مختلف را بررسی نمودند. در این مطالعه، مقدار بهبود شاخص

[۱]- Machine Learning

[۲]- Artificial Neural Networks

[۳]- Long-Term Pavement Program

بین‌المللی ناهمواری با اعمال روش‌های تعمیر و نگهداری مختلف روکش، چیپ‌سیل، آب‌بندی سنگدانه و پر کردن ترک‌ها بررسی شد که بیشترین مقدار بهبود برای روکش به میزان ۱/٤٤ متر بر کیلومتر بود. همچنین، برازندگی مدل‌های به‌دست آمده برای چهار نوع تعمیر ذکر شده مقدار قابل قبولی داشت که در روکش مقدار برازندگی مدل ۰/۸۷ به‌دست آمد که بیشترین برازندگی نسبت به سایر روش‌های تعمیر بود. همچنین، از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری نیز می‌توان برای مدل‌سازی استفاده نمود. الگوریتم تکاملی تفاضلی یک روش بهینه‌سازی قدرتمند است که به طور گسترده در حل مسائل مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم تکاملی تفاضلی نسبت به الگوریتم‌های بهینه‌سازی مرسوم است (شیرزادی جاوید و همکاران، ۲۰۲۰). الگوریتم تکاملی تفاضلی جهت غلبه بر عیب اصلی الگوریتم ژنتیک، یعنی عدم وجود جستجوی محلی در این الگوریتم ارائه شده است. در الگوریتم تکاملی تفاضلی، بردارهای تفاضل عامل جستجو هستند و هدف آنها یافتن راه‌حل‌های بهتر در هر تکرار است (وارادراجان و سواروپ، ۲۰۰۸). تفاوت اصلی بین دو الگوریتم در عملگر انتخاب است. در عملگر انتخاب الگوریتم ژنتیک، شانس انتخاب یک جواب به عنوان یکی از والدین، وابسته به مقدار شایستگی آن می‌باشد، در حالی که در الگوریتم تکاملی تفاضلی همه جواب‌ها دارای شانس مساوی جهت انتخاب شدن می‌باشند. در این الگوریتم، بر خلاف سایر الگوریتم‌ها، اول عملگر جهش[۱] و سپس عملگر تقاطع[۲] انجام می‌شود تا بدین وسیله نسل جدید ایجاد گردد. ابتدا عملگر جهش به طور تصادفی یک یا چند متغیر تصمیم‌گیری را برای بررسی ناحیه‌های مختلف جواب تغییر می‌دهد و سپس عملگر تقاطع با ترکیب بردارهای تفاضل، بردارهای تفاضل جدیدی را تولید می‌کند. این فرآیند تا رسیدن به جواب نهایی ادامه پیدا می‌کند و بردار تفاضل نهایی به عنوان بهترین جواب برای حل مسئله انتخاب می‌شود (استورن و پرایس، ۱۹۹۷).

با توجه به مرور ادبیات گذشته، اکثر مدل‌های استفاده شده برای پیش‌بینی اضمحلال و بهبود عملکرد روسازی، روش‌های رگرسیون‌های چندمتغیره و روش‌های یادگیری ماشین مرسوم هستند. همانطور که بیان شد، دقت روش‌های رگرسیون نسبت به روش‌های یادگیری ماشین جدید، پایین‌تر می‌باشند و نتایج حاصل شده از روش‌های یادگیری ماشین تطابق بیشتری با واقعیت دارند. اما مشکل اصلی اکثر روش‌های یادگیری ماشین، عدم ارائه رابطه ریاضی بین متغیرهاست. از طرفی در مطالعات گذشته، در بسیاری از مدل‌های ساخته شده، اثر یک و یا چند متغیر محدود بر شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی بررسی شده است و اثر همزمان تمامی متغیرهای مؤثر بر این شاخص بررسی نشده است. در این مطالعه، با توجه به موارد بیان شده در مطالعات گذشته، تصمیم بر آن است که به کمک روش بهینه‌سازی تکاملی تفاضلی[۳] (DE) و با تبدیل آن به روش یادگیری ماشین و با در نظر گرفتن متغیرهای آب‌وهوایی، ترافیکی و سازه‌ای، شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی را پیش‌بینی کرده و سپس میزان بهبود این شاخص تحت تأثیر روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری به صورت جداگانه پیش‌بینی شود.

۲. روش تحقیق

هدف از این مطالعه، ارائه یک رابطه ریاضی برای پیش‌بینی شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی و سپس ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی میزان بهبود این شاخص

[۱]- Mutation
[۲]- Crossover
[۳]- Differential Evolutionary

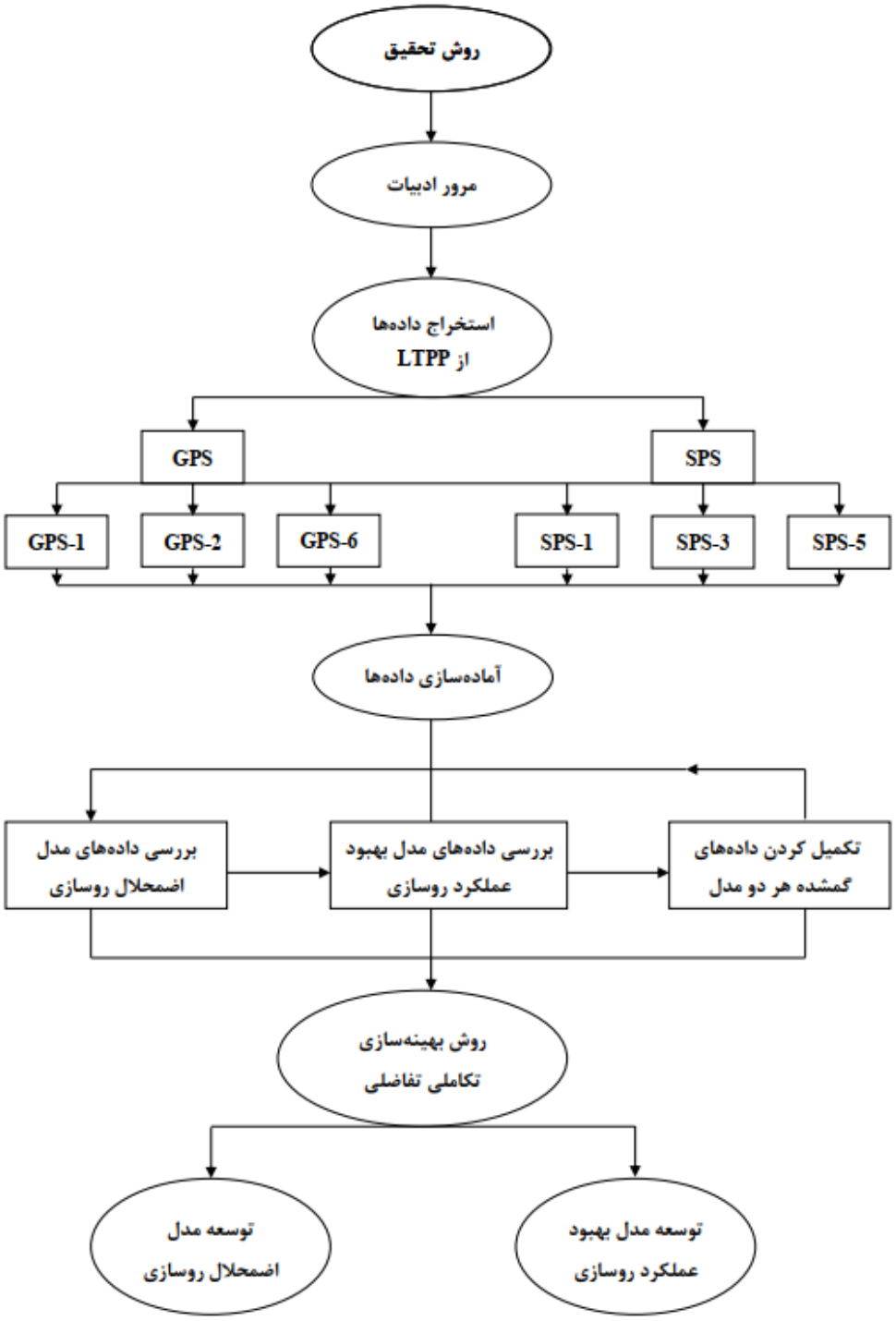
تحت تأثیر روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری به صورت جداگانه بلافاصله پس از اعمال آن و با استفاده از داده‌های برنامه بلندمدت روسازی می‌باشد.

روش تحقیق در این مطالعه با مرور ادبیات گذشته و بررسی مشکلات آن آغاز شد و بر اساس مطالعات انجام گرفته، متغیرهای ورودی برای توسعه مدل انتخاب شدند. سپس داده‌های لازم برای فرآیند مدل‌سازی از پایگاه اطلاعاتی برنامه بلندمدت روسازی برای هر دو حالت مطالعه عمومی (GPS[۱]) و خاص (SPS[۲]) روسازی استخراج شدند. پس از مرتب‌سازی داده‌ها، در گام بعدی، داده‌های گمشده در اندازه‌گیری مقدار اولیه شاخص بین‌المللی ناهمواری برای مقاطع مختلف شناسایی و تکمیل شدند. در نهایت نیز به روش تکاملی تفاضلی، دو رابطه برای پیش‌بینی میزان اضمحلال و بهبود شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی ارائه گردید. همچنین، با تحلیل‌های آماری، عملکرد مدل‌های ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. دیاگرام شماتیک روش تحقیق در این مطالعه در شکل ۱ قابل مشاهده است.

۲-۱. جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها

برنامه بلندمدت روسازی، یکی از جامع‌ترین و قابل اعتمادترین منابع اطلاعاتی روسازی است و برنامه‌ای منسجم با بیش از ۲۰ سال مطالعه و جمع‌آوری اطلاعات در زمینه روسازی است. این برنامه شامل بیش از ۲۵۰۰ قطعه آزمایشی روسازی در کشورهای آمریکا و کانادا است. برنامه بلندمدت روسازی در سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۲ بخشی از برنامه تحقیقاتی استراتژیک بزرگراه‌های آمریکا[۳] بود. اما الان توسط اداره کل حمل و نقل ایالتی آمریکا[۴] و با مشارکت ایالات و استان‌ها اداره می‌شود (لو و تولیور، ۲۰۱۲). در این مطالعه نیز مانند مطالعات سال‌های اخیر در زمینه روسازی، برای تهیه داده‌های لازم، از پایگاه داده‌های برنامه بلندمدت روسازی به جای فرآیندهای زمان‌بر و پرهزینه آزمایشگاهی استفاده شده است.

[۱] General Pavement Studies
[۲] Specific Pavement Studies
[۳] Strategic Highway Research Program
[۴] Federal Highway Administration



شکل ۱. دیاگرام شماتیک روش تحقیق

۲-۱-۱. استخراج داده‌ها

در این تحقیق، داده‌های لازم برای توسعه مدل با توجه به نتایج مطالعات گذشته و شناخت متغیرهای ورودی تأثیرگذار بر متغیر خروجی، از پایگاه اطلاعاتی برنامه بلندمدت روسازی تهیه شده است و از هر دو دسته‌بندی داده‌های مطالعات عمومی و خاص روسازی در برنامه بلندمدت روسازی برای انجام فرآیند مدل‌سازی استفاده شده است. این داده‌ها از قطعه‌های آزمایش بیان شده در جدول ۱ استخراج شده‌اند.

جدول ۱. داده‌های تهیه شده از برنامه بلندمدت روسازی

قطعه آزمایش	توضیح قطعه آزمایش
GPS-1	روسازی بتن آسفالتی روی اساس دانه‌ای
GPS-2	روسازی بتن آسفالتی روی اساس تثبیت شده
GPS-6	روکش بتن آسفالتی روی روسازی بتن آسفالتی
SPS-1	مطالعه استراتژیک عوامل سازه‌ای بر روسازی انعطاف‌پذیر
SPS-3	اثربخشی نگهداری پیشگیرانه روسازی انعطاف‌پذیر
SPS-5	بازسازی روسازی‌های بتن آسفالتی

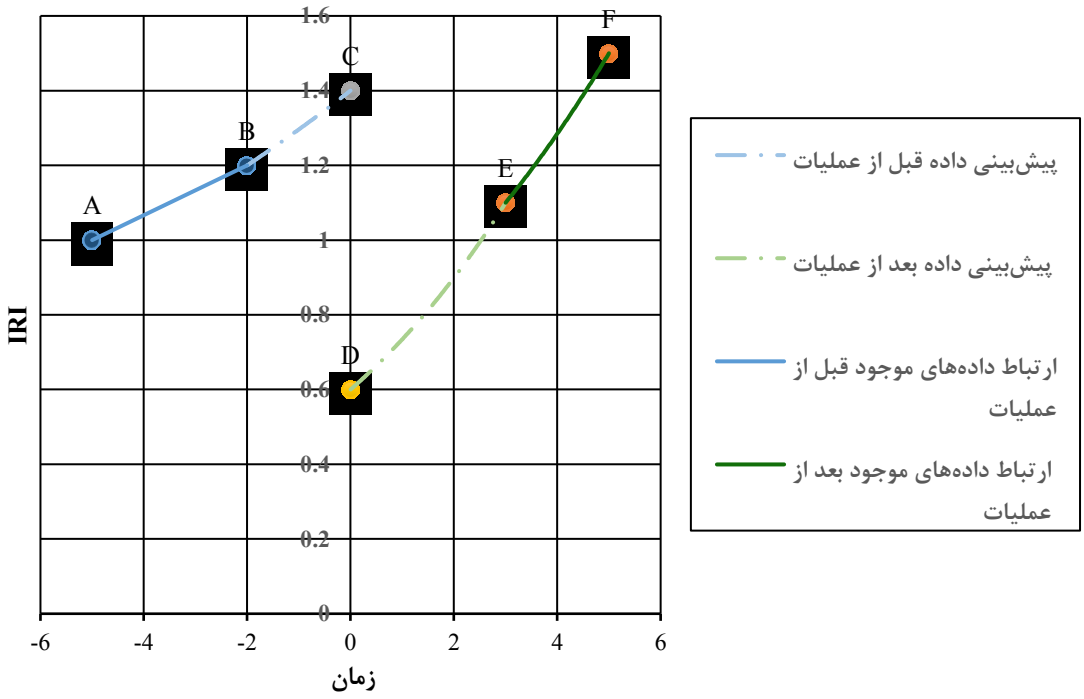
۲-۱-۲. بررسی داده‌های مدل اضمحلال روسازی

با توجه به نتایج مطالعات گذشته مشخص گردید که وضعیت اولیه روسازی از منظر خرابی ناهمواری، مشخصات روسازی موجود، شرایط آب‌وهوایی و عوامل ترافیکی می‌توانند در پیش‌بینی میزان شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی مؤثر باشند. همچنین، برای توسعه مدل اضمحلال روسازی در این مطالعه، می‌بایست از ردیف داده‌هایی که عملیات تعمیر و نگهداری روی آن‌ها انجام نشده است، استفاده شود.

۲-۱-۳. تکمیل داده‌های گمشده برای تابع بهبود

مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری برای هر قطعه روسازی در برنامه بلندمدت روسازی از میانگین چندین برداشت به‌دست آمده است. همانطور که در شکل ۲ مشخص است، در یک بازه زمانی که قرار بر انجام عملیات تعمیر و نگهداری است، داده‌های این شاخص اندازه‌گیری نشده است. اگر زمان صفر، زمان انجام عملیات تعمیر و نگهداری معرفی شود، بلافاصله قبل و بعد از انجام عملیات تعمیر و نگهداری، اندازه‌گیری این شاخص بی‌معنی است. زیرا در این بازه زمانی قرار بر انجام عملیات تعمیر و نگهداری است و دانستن مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری قبل از انجام عملیات تعمیر و نگهداری، در عمل اهمیتی ندارد. همچنین، پس از انجام عملیات نیز اطمینان حاصل شده است که مقدار این شاخص در بازه ایمن قرار دارد و اندازه‌گیری آن در عمل انجام نمی‌پذیرد. اما دانستن مقدار این شاخص قبل و بعد از عملیات تعمیر و نگهداری برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی ضروری است. در نتیجه می‌بایست داده‌های موجود در این بازه زمانی پیش‌بینی شود تا با کامل شدن مجموعه داده‌ها به فرآیند مدل‌سازی پرداخت.

همانطور که در شکل ۲ مشخص است، نقاط C و D به ترتیب بلافاصله قبل و بعد از عملیات تعمیر و نگهداری را نشان می‌دهند. پرش نمودار در زمان صفر (زمان فرضی در نظر گرفته برای انجام عملیات تعمیر و نگهداری) نشان‌دهنده این موضوع است. برای انجام مطالعات و ساختن مدل، دانستن مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی در این دو نقطه الزامی است. طبق شکل ۲، مقدار این شاخص در این دو نقطه در مجموعه داده‌های برنامه بلندمدت روسازی موجود نیست. بدین منظور، برای تعمیر و نگهداری مدنظر در این مطالعه، می‌بایست با داشتن اطلاعات نقاط A و B و همچنین E و F به ترتیب اطلاعات نقاط C و D را پیش‌بینی نمود. لو و تولیور (۲۰۱۲) برای پیش‌بینی این نقاط و تکمیل داده‌های لازم از روش درون‌یابی خطی استفاده نمودند. اما همانطور که مشخص است، میزان اضمحلال روسازی به صورت خطی تغییر نمی‌کند. در این مطالعه، اطلاعات نقاط C و D به کمک معادله اضمحلال روسازی توسعه داده شده محاسبه شده است.



شکل ۲. بررسی وضعیت داده‌های شاخص ناهمواری روسازی

۲-۱-٤. بررسی داده‌های مدل بهبود عملکرد روسازی

در این مطالعه، برای توسعه مدل بهبود عملکرد روسازی، سه روش تعمیر و نگهداری مرسوم در ایران مورد بررسی قرار گرفت. سه دسته داده مجزا آب‌بندی ترک‌ها، اسلاری‌سیل و روکش بر اساس عملیات تعمیری انجام گرفته در کشور آمریکا و کانادا استخراج گردیده است. این عملیات تعمیری بر اساس شرایط روسازی انجام شده‌اند. به طور مثال، اگر میزان شاخص ناهمواری بین‌المللی زیاد باشد، از عملیات آب‌بندی ترک‌ها و اسلاری‌سیل استفاده نشده است و قطعاً عملیات روکش ترجیح داده شده است. ابتدا برای تشخیص اثربخشی کوتاه‌مدت روش‌های تعمیر آب‌بندی ترک‌ها، اسلاری‌سیل و روکش از آزمون فرضیه استفاده شده است. در این آزمون، فرضیه صفر برابری میانگین مقادیر شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی قبل و بعد از اعمال عملیات تعمیر و نگهداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد و فرضیه دیگر، عدم برابری میانگین مقادیر شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی قبل و بعد از اعمال عملیات تعمیر و نگهداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. بیان ریاضی آزمون فرضیه استفاده شده به صورت زیر است:

$$H_0 : \mu_{IRI\text{-}Before} = \mu_{IRI\text{-}After}$$
$$H_1 : \mu_{IRI\text{-}Before} \neq \mu_{IRI\text{-}After}$$

حال با مقایسه مقدار به‌دست آمده از آزمون t و مقدار بحرانی t در سطح اطمینان ۹۵ درصد، می‌توان در رابطه با اثربخشی روش‌های تعمیر و نگهداری تصمیم‌گیری نمود. بدین منظور، در صورتی که قدر مطلق مقدار t محاسباتی از قدر مطلق مقدار t بحرانی بیشتر شود، فرضیه صفر رد شده و در صورت کمتر شدن آن فرضیه صفر رد نمی‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که در سطح اطمینان ۹۵ درصد با رد شدن فرضیه صفر، روش تعمیر و نگهداری مورد نظر در بهبود کوتاه‌مدت شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی مؤثر است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از انجام آزمون فرضیه و شواهد موجود می‌توان

گفت که هر سه روش، اثر کوتاه‌مدت بر میزان بهبود شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی داشته‌اند. نتایج به‌دست آمده از آزمون فرضیه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج آزمون فرضیه

روش تعمیر و نگهداری	IRI قبل از تعمیر و نگهداری		IRI بعد از تعمیر و نگهداری		نتایج آزمون فرضیه			تصمیم‌گیری
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	t محاسباتی	مقدار P	t بحرانی	
آب‌بندی ترک‌ها	۱/٤۸	۰/٦۲	۱/۳۱	۰/۵۷	۱۰/٦٤	۰/۰۰	۱/۹٦	اثربخشی
اسلاری‌سیل	۱/٤۳	۰/۵٦	۱/۲۰	۰/٦۰	٦/۲۵	۰/۰۰	۱/۹٦	اثربخشی
روکش	۳/۸۷	۱/۱۵	۲/۰٤	۰/۵٦	۳۵/٤۲	۰/۰۰	۱/۹٦	اثربخشی

با توجه به این‌که متغیر ورودی مدل بهبود عملکرد روسازی، شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی قبل از عملیات تعمیر می‌باشد، در این بخش از مطالعه می‌بایست مقدار همبستگی میان میزان بهبود این شاخص به کمک روش‌های روکش، آب‌بندی ترک‌ها، اسلاری‌سیل را با مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی قبل از عملیات تعمیر بررسی نمود. برای بررسی این موضوع، از همبستگی پیرسون[1] استفاده شده است. در صورتی که مقدار همبستگی از ۰/۸ و ۰/٦ بیشتر باشد، به ترتیب همبستگی بسیار قوی و قوی خواهد بود و در غیر این صورت همبستگی قوی‌ای برقرار نیست (چن، ۲۰۰۳). با توجه به نتایج جدول ۳، مشخص است که تنها میزان بهبود شاخص بین المللی ناهمواری روسازی با انجام روکش دارای همبستگی بسیار قوی با مقدار این شاخص قبل از عملیات تعمیر است. به همین دلیل، در این مطالعه تنها برای روکش مدل ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج آزمون همبستگی پیرسون

عملیات	همبستگی پیرسون	قدرت همبستگی
آب‌بندی ترک‌ها	۰/۵۵۵	کم
اسلاری سیل	۰/۳۸۰	کم
روکش	۰/۸۸۰	بسیار زیاد

۲-۲. روش بهینه‌سازی تکاملی تفاضلی

در این مطالعه، یک روش جدید یادگیری ماشین معرفی می‌شود که در توسعه مدل اضمحلال و بهبود شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی استفاده شده است. بیشتر روش‌های پیش‌بینی اعم از شبکه‌های عصبی مصنوعی، درخت‌های تصمیم‌گیری، یادگیری عمیق و ماشین بردار پشتیبان نمی‌توانند رابطه‌ی ریاضی بر اساس ورودی‌های مدل ایجاد نمایند (ناصری و همکاران، ۲۰۲۰)؛ در صورتی که بهینه‌سازی برنامه تعمیر و نگهداری روسازی، نیازمند معادله خروجی برای تابع اضمحلال و بهبود

[1]- Pearson

عملکرد روسازی می‌باشد. مدل‌های رگرسیون معادله خروجی ارائه کرده، اما به علت دقت کم قابل اعتماد نیستند (میرزاحسینی و همکاران، ۲۰۱۹). بر همین اساس، در این مطالعه، روش جدید پیش‌بینی برای برطرف کردن مشکلات بیان شده استفاده شده است.

روش‌های برنامه‌ریزی فراابتکاری، روش‌هایی با قدرت پیش‌بینی زیاد هستند که توانایی ارائه رابطه ریاضی بین ورودی‌ها و خروجی مدل را دارند. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که دقت روش‌های فراابتکاری در اکثر اوقات از روش‌های پیش‌بینی مرسوم بیشتر است (ناصری و همکاران، ۲۰۲۰؛ میرزاحسینی و همکاران، ۲۰۱۹؛ گل‌افشانی و بهنود، ۲۰۱۹). در این مطالعه، روش جدیدی به نام برنامه‌ریزی تکاملی تفاضلی بر اساس الگوریتم روش تکاملی تفاضلی توسعه داده شده است.

الگوریتم تکاملی تفاضلی (DE) بر پایه اطلاعات تهیه شده توسط ناصری و همکاران (۲۰۲۰) به برنامه تکاملی تفاضلی (DEP) تبدیل گردید. یعنی الگوریتم تکاملی تفاضلی برای حل یک مسئله برنامه‌نویسی صحیح شامل ۲۰ حالت استفاده شده است. در نتیجه، هر ورودی یک متغیر تصمیم صحیح در نظر گرفته می‌شود و ۲۰ تابع مختلف به هر ورودی اختصاص داده شده است. از طرفی، برای تعیین ضریب بهینه ورودی مربوطه، به هر ورودی دو متغیر تصمیم‌گیری، از جمله مقادیر ثابت، اختصاص داده شده است. بنابراین، حالت‌های هر ورودی را می‌توان بین $۲۰^{(۱+۲)} = ۸۰۰۰$ گزینه انتخاب نمود. همچنین، یک متغیر تصمیم برای ادغام تمام ورودی‌ها و ضرایب آنها برای تولید رابطه ریاضی اختصاص داده شده است. متغیر تصمیم دیگر نیز برای تعیین مقدار ثابت متغیر تصمیم‌گیری ادغام در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، ورودی‌ها و ضرایب مربوط به آنها را می‌توان با $۲۰^{(۱+۱)} = ۴۰۰$ تابع ادغام مختلف ترکیب نمود. هدف برنامه تکاملی تفاضلی یافتن بهترین حالت برای تمام ورودی‌ها، ضرایب آنها و تابع ادغام است. بدین منظور، میانگین خطای مطلق رابطه (۱) تابع هدف مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، با حل کردن مسئله بهینه‌سازی به کمک برنامه تکاملی تفاضلی و مشخص شدن بهترین بردار حل مسئله، تابع ادغام نهایی به عنوان رابطه ریاضی میان ورودی‌ها و خروجی مدل تولید می‌شود. به کمک روش معرفی شده معادله تابع اضمحلال روسازی و بهبود عملکرد روسازی تولید شده و برای حل مسائل بهینه‌سازی در برنامه‌های تعمیر و نگهداری روسازی استفاده می‌شود.

دقت روش یادگیری ماشین توسعه یافته به کمک میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب تعیین (R^2)، ضریب همبستگی (R)، میانگین مربعات خطا (MSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی می‌شود. شاخص‌های ارزیابی ذکر شده به ترتیب به کمک روابط (۱) تا (۵) قابل محاسبه هستند.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| EXP_i - PRE_i \right|}{n} \quad (۱)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (EXP_i - \overline{EXP_i}) \times (PRE_i - \overline{PRE_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (EXP_i - \overline{EXP_i})^2 \times \sum_{i=1}^{n} (PRE_i - \overline{PRE_i})^2}} \right)^2 \quad (۲)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} (EXP_i - \overline{EXP_i}) \times (PRE_i - \overline{PRE_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (EXP_i - \overline{EXP_i})^2 \times \sum_{i=1}^{n} (PRE_i - \overline{PRE_i})^2}} \quad (۳)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n} (EXP_i - PRE_i)^2}{n} \quad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (EXP_i - PRE_i)^2}{n}} \quad (۵)$$

که در روابط بالا EXP_i، $\overline{EXP_i}$، PRE_i، $\overline{PRE_i}$ و n به ترتیب مقدار واقعی خروجی، میانگین مقادیر واقعی خروجی، مقدار پیش‌بینی شده، میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و تعداد بخش‌ها می‌باشند. هر چه مقادیر R و R^2 بیشتر و مقادیر MSE، MAE و RMSE کمتر باشد، مدل

توسعه یافته از دقت بیشتری برخوردار است. همچنین، با توجه به تأثیرگذاری تعداد متغیرهای مستقل به کار رفته در مدل در انتخاب مدل بهتر، شاخص اطلاعات آکائیک (AIC) برای مقایسه مدل توسعه یافته در این مطالعه با سایر مدل‌های موجود در ادبیات فنی به کمک رابطه (٦) محاسبه شده است. معمولاً مدلی که دارای شاخص AIC کوچکتری نسبت به سایر مدل‌ها باشد، به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود (گوردُن، ۲۰۱۵).

$$AIC = n \times \ln(\frac{SSE}{n}) + 2k \qquad (۶)$$

که AIC شاخص اطلاعات آکائیک، n تعداد ردیف داده‌ها، SSE مجموع مربعات خطا و k تعداد متغیرهای مستقل به کار رفته در مدل می‌باشد.

۲-۳. تابع اضمحلال روسازی انعطاف‌پذیر

همانطور که بیان شد، شرایط آب‌وهوایی، عوامل ترافیکی و وضعیت روسازی موجود می‌توانند در پیش‌بینی وضعیت شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی در آینده مؤثر باشند. در این مطالعه، متغیرهای مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی در سال پایه، ضخامت رویه بتن آسفالتی، ضخامت اساس، میانگین سالانه ترافیک روزانه کامیون، نرخ سالانه بارش، میانگین سالانه دمای هوا، تعداد روزهای چرخه‌های ذوب و یخ در سال و میانگین سالانه رطوبت نسبی برای پیش‌بینی شاخص بین‌المللی ناهمواری در یک سال پس از گذشت از سال پایه انتخاب شده‌اند. حال، برای پیش‌بینی این شاخص در سال‌های بعد، می‌بایست ابتدا آن را در هر سال و با توجه به اطلاعات به‌دست آمده برای سال قبل از آن پیش‌بینی نمود تا در نهایت به پیش‌بینی این شاخص در زمان مدنظر دست پیدا کرد.

در این مطالعه، ۵۲۰ ردیف داده برای توسعه مدل اضمحلال روسازی از برنامه بلندمدت روسازی تهیه شده است که ۷۵ درصد آنها برای فرآیند ساخت مدل و ۲۵ درصد از داده‌ها برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده‌اند. آماره‌های توصیفی متغیرهای استفاده شده برای توسعه مدل اضمحلال روسازی در جدول ٤ ارائه شده است.

۲-٤. تابع بهبود عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر

پس از تعیین متغیرهای ورودی مدل بهبود عملکرد روسازی، تهیه داده‌ها از پایگاه اطلاعاتی برنامه بلندمدت روسازی و سپس آماده‌سازی داده‌ها، در نهایت ۳۳٦ ردیف داده برای فرآیند مدل‌سازی تهیه شد. در این مطالعه، به کمک ۲۵۲ ردیف داده موجود، مدل بهبود شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی تحت اعمال روکش توسعه داده شده است و از ۸٤ ردیف داده برای بررسی و آزمایش مدل استفاده شده است. به عبارت دیگر ۷۵ درصد از داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش و ۲۵ درصد باقی‌مانده به عنوان صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفته است. آماره‌های توصیفی متغیرهای استفاده شده برای توسعه مدل بهبود عملکرد روسازی در جدول ۵ ارائه شده است.

۳. نتایج

در این مطالعه، به کمک برنامه تکاملی تفاضلی و با استفاده از داده‌های اطلاعاتی برنامه بلندمدت روسازی، دو رابطه ریاضی برای پیش‌بینی اضمحلال شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی و بهبود این شاخص تحت اعمال روکش توسعه داده شد. در این بخش از پژوهش، به ارائه روابط و همچنین بررسی عملکرد مدل‌های توسعه یافته پرداخته شده است.

جدول ٤. آماره‌های توصیفی متغیرهای استفاده شده برای توسعه مدل اضمحلال روسازی انعطاف‌پذیر

متغیر	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	واریانس	کشیدگی	چولگی
$IRI_{initial}$	٥/٥٠	٠/٥٦	١/٦٤	١/١٣	١/٢٧	٠/٦٣	١/٣٦
$Thick_{AC}$	١٦/١٠	٠/٩٠	٦/١٩	٢/٦٧	٧/١٦	١/٢٧	٠/٧٥
$Thick_{Base}$	٢٥/٨٠	٠/٠٠	٩/٠٤	٥/٣٠	٢٨/٠٧	٠/٥٨	٠/٢٩
HUM	٣٠٠٠/٠٠	١١/٠٠	٥٢٢/٦٠	٥١١/٧٦	٢٦١٨٩٧/٤٢	٣/٧٢	١/٧١
AADTT	٢٠٨١/٤٢	٥٣/٥٠	٩٥٩/٢٤	٤٢٠/٥٨	١٧٦٨٩٠/١٤	−٠/٨٤	−٠/٢١
PREC	٢٣/٢٠	١/٩٠	١١/١٨	٥/٤٥	٢٩/٧٦	−١/٣٩	٠/٠٦
TEMP	١٧٤/٠٠	١/٠٠	٧٩/٣٨	٣٥/٢٠	١٢٣٩/١٨	−٠/٠٨	٠/٠١
F&T	٨٦/٠٠	٣٣/٠٠	٦٩/٠٤	١٣/٣٠	١٧٦/٩٣	٠/٤٤	−١/٢٦
IRI_{PRE}	٥/٧٨	٠/٥٨	١/٧٧	١/٢٣	١/٥٢	٠/٧٤	١/٣٨

جدول ٥. آماره‌های توصیفی متغیرهای استفاده شده برای توسعه مدل بهبود عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر

متغیر	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	واریانس	کشیدگی	چولگی
IRI_{before}	٥/٧٥	٢/٠٠	٣/٨٧	١/١٥	١/٣٣	−١/٢١	٠/٠٠
thick-over	٥/٠٠	١/٠٠	٣/٠٠	١/٢١	١/٤٧	−١/٢١	٠/٠٠
$Improvement_{Overlay}$	٣/٨٢	٠/١٠	١/٨٣	٠/٩٥	٠/٩٠	−٠/٩٢	٠/٢١

٣-١. ارائه روابط مدل‌های توسعه یافته

همانطور که در بخش‌های قبل بیان شد، در این مطالعه، از الگوریتم جدید یادگیری ماشین (DEP) استفاده شده است. با استفاده از الگوریتم توسعه داده شده تکاملی تفاضلی، معادله اضمحلال شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی انعطاف‌پذیر توسعه یافت و مقدار افزایش این شاخص پس از گذشت یک سال با استفاده از این فرمول قابل محاسبه است. معادله اضمحلال توسعه یافته در این مطالعه در رابطه (٧) ارائه شده است.

$$IRI_{PRE}=\frac{(-3.1177\times IRI_{initial})-(0.5\times AADTT^{-3})-(0.05\times Thick_{AC}^{-1})-(0.1\times PREC^{-1})+0.02}{(0.025\times\sin(Thick_{Base}))+(0.1\times Log(F\&T))-(0.2646\times Log(HUM))-(0.25\times TEMP^{-3})-2.6457} \quad (٧)$$

که، $IRI_{initial}$ و IRI_{PRE} مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی به ترتیب در یک زمان خاص و بعد از گذشت یک سال از زمان خاص (متر بر کیلومتر) می‌باشد. همچنین، AADTT، $Thick_{AC}$، PREC، $Thick_{Base}$، F&T، HUM و TEMP به ترتیب بیانگر متوسط سالانه ترافیک روزانه کامیون، ضخامت لایه بتن آسفالتی (اینچ)، نرخ بارندگی سالانه (میلی‌متر)، ضخامت لایه اساس (اینچ)، تعداد روزهای ایجاد ذوب و یخ در سال، درصد رطوبت نسبی متوسط سالانه و دمای متوسط سالانه هوا (درجه سلسیوس) می‌باشد.

همچنین، با استفاده از برنامه تکاملی تفاضلی، تابع بهبود عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر برای عملیات روکش توسعه یافت. معادله میزان بهبود شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی پس از اعمال عملیات روکش در رابطه (٨) قابل مشاهده است.

$$IRI_{IO}=(0.7794\times IRI_{before})+(2\times\log(Thick-over))-2 \quad (٨)$$

که، IRI_{IO}، IRI_{before} و Thick-Over به ترتیب مقدار بهبود شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی پس از اعمال روکش (متر بر کیلومتر)، مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی قبل از اعمال روکش (متر بر کیلومتر) و ضخامت روکش (اینچ) می‌باشند.

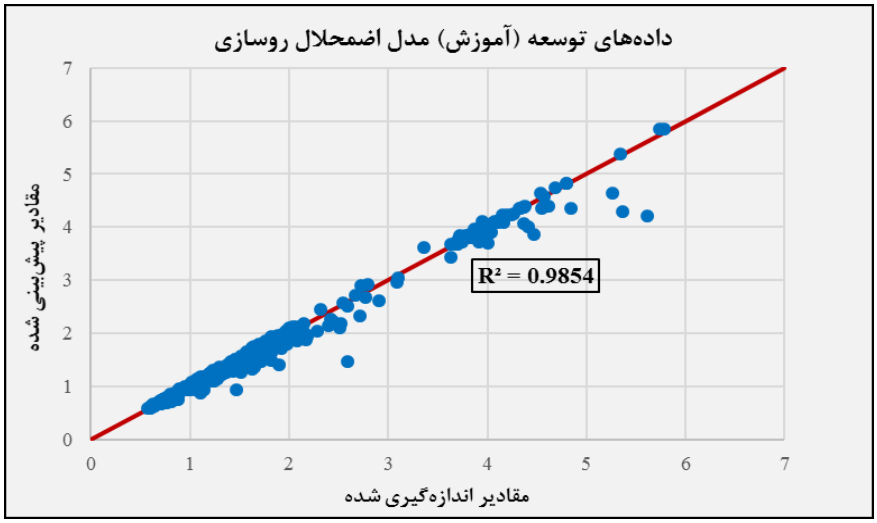
۳-۲. بررسی عملکرد مدل‌های توسعه یافته

بررسی عملکرد مدل‌های توسعه یافته و ارزیابی آنها اهمیت بسیار زیادی دارد. برای ارزیابی مدل‌ها، ابتدا مقادیر میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب تعیین (R^2)، ضریب همبستگی (R)، میانگین مربعات خطا (MSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به کمک روابط (۱) تا (۵) محاسبه شده‌اند. شاخص‌های ارزیابی R^2، MAE و RMSE برای مدل‌های توسعه یافته در جدول ٦ ارائه شده‌اند. همانطور که از نتایج مشخص است، مقدار R^2 برای هر دو مدل توسعه یافته به کمک الگورتیم تکاملی تفاضلی از مقدار قابل قبولی برخوردار است. همچنین، مقادیر MAE و RMSE که بیانگر خطای مدل‌ها هستند، برای هر دو مدل توسعه یافته مقادیر کمی دارند. همچنین، از نتایج به‌دست آمده می‌توان به این موضوع اشاره نمود که مقادیر شاخص ارزیابی برای داده‌های آزمایش مدل مانند داده‌های آموزش، مقادیر قابل قبولی است. این موضوع بیانگر صحت مدل‌های توسعه یافته به کمک برنامه تکاملی تفاضلی در این مطالعه می‌باشد.

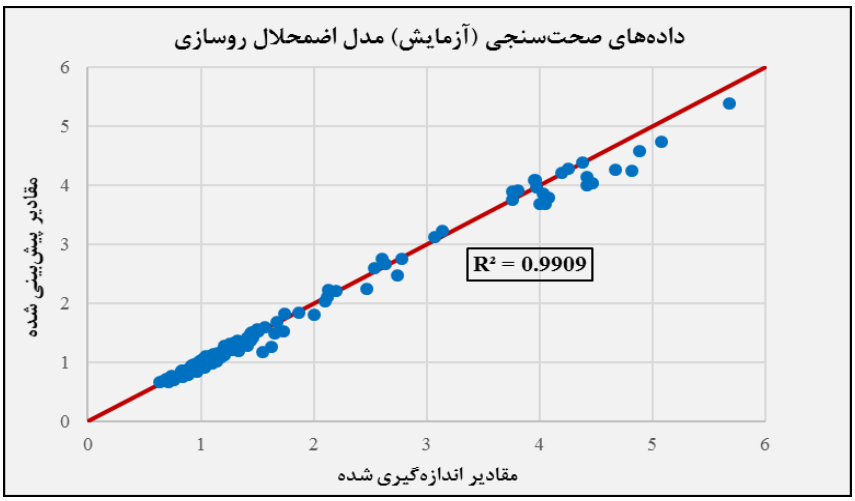
از طرفی، برای بررسی دقت مدل‌های توسعه یافته می‌توان نمودار مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های توسعه یافته را در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده ترسیم نمود. در صورتی که پراکندگی داده‌ها در نزدیکی خط تعادل ($y = x$) و هر دو طرف آن باشد، می‌توان گفت مدل از دقت و صحت برخوردار است. در شکل‌های ۳ و ٤، به ترتیب نمودارهای مقادیر پیش‌بینی شده بر حسب مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر دو مدل توسعه یافته در این مطالعه ترسیم شده است. مقدار R^2 برای داده‌های آموزش و آزمایش مدل اضمحلال روسازی توسعه یافته در این مطالعه به ترتیب ۰/۹۸۵ و ۰/۹۹۰ و برای مدل بهبود عملکرد روسازی به ترتیب ۰/۹٦۲ و ۰/۹۷۰ شده است. این مقادیر نشان‌دهنده دقت زیاد مدل‌های توسعه یافته در این مطالعه و همچنین عملکرد مناسب آنها در پیش‌بینی مقادیر داده‌های آزمایش می‌باشد. از طرفی، پراکندگی داده‌ها در دو طرف خط تعادل در هر دو مدل توسعه یافته، بیانگر عدم وجود خطای سیستماتیک در مدل‌ها می‌باشد. نمودارهای نسبت مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل‌های ۵ و ٦ نیز گواه این موضوع است. مدل دقیق‌تر، مدلی با میانگین نزدیک به یک برای این نسبت است. مقادیر نسبت متوسط داده‌های آموزش و آزمایش مدل اضمحلال روسازی برابر ۰/۹۸٤ و ۰/۹۷۱ و برای مدل بهبود عملکرد روسازی برابر ۱/۰۲۰ و ۰/۹۹۰ می‌باشد.

جدول ٦. شاخص‌های ارزیابی مدل‌های توسعه یافته

مدل توسعه یافته	تعداد ردیف داده‌ها		R^2		MAE		RMSE	
	توسعه مدل	صحت‌سنجی مدل	توسعه مدل	صحت‌سنجی مدل	توسعه مدل	صحت‌سنجی مدل	توسعه مدل	صحت‌سنجی مدل
اضمحلال روسازی	۳۹۰	۱۳۰	۰/۹۸۵	۰/۹۹۰	۰/۰۷٦	۰/۰۸۵	۰/۱٥٤	۰/۱٤۱
بهبود عملکرد روسازی	۲٥۲	۸٤	۰/۹٦۲	۰/۹۷۰	۰/۱۲٥	۰/۱۲۰	۰/۲۰٤	۰/۱۸۲

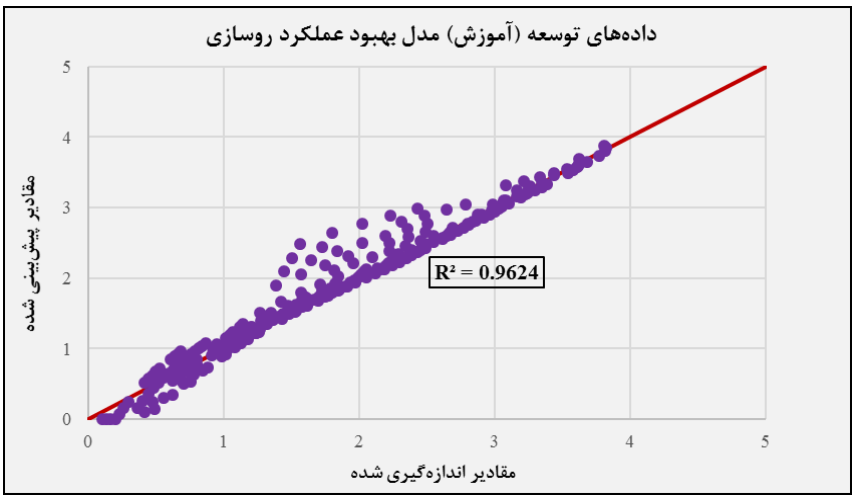


(الف)

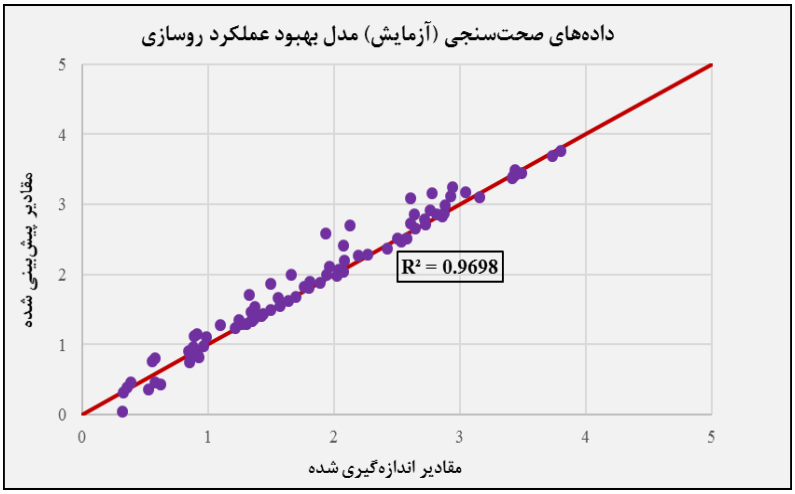


(ب)

شکل ۳. بررسی دقت و صحت مدل اضمحلال روسازی: الف) برای داده‌های توسعه مدل و ب) برای داده‌های صحت‌سنجی مدل

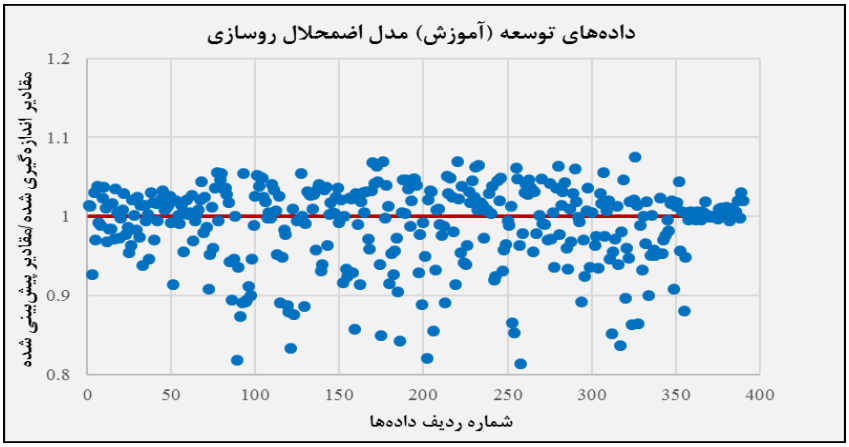


(الف)

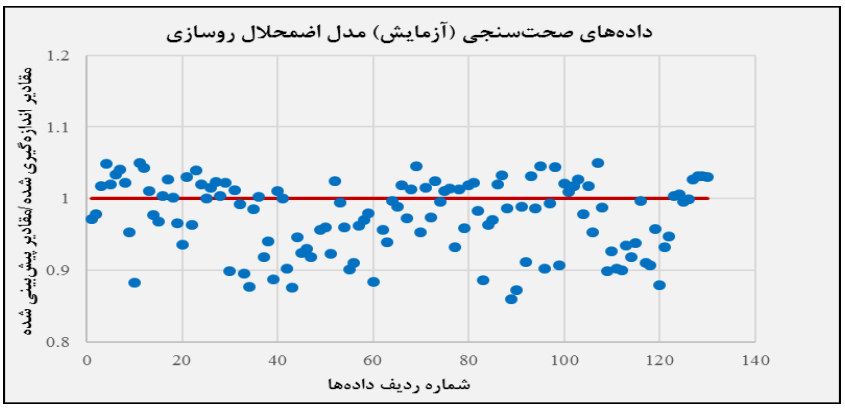


(ب)

شکل ٤. بررسی دقت و صحت مدل بهبود عملکرد روسازی: الف) برای داده‌های توسعه مدل و ب) برای داده‌های صحت‌سنجی مدل

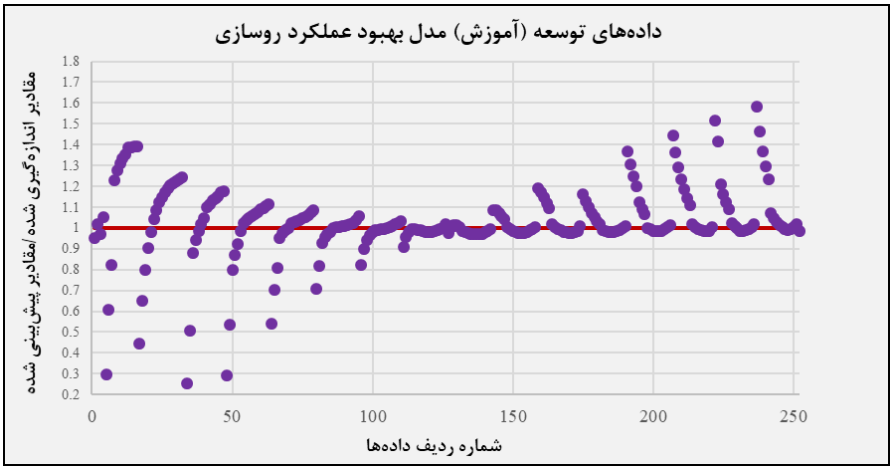


(الف)

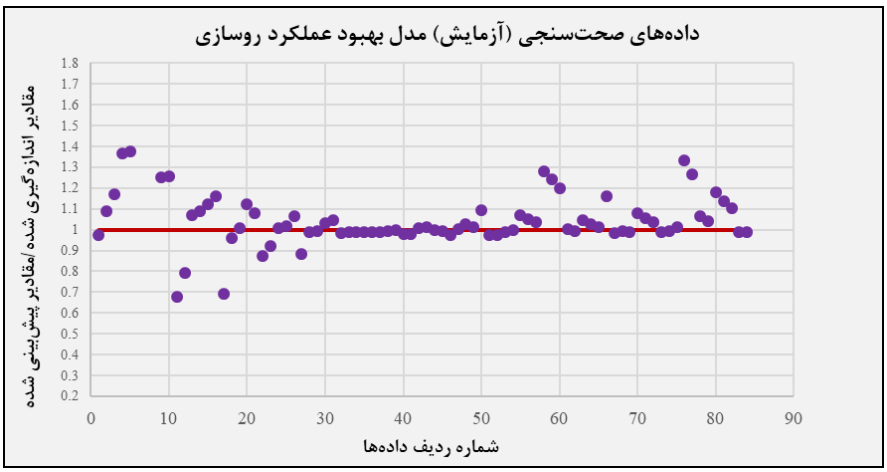


(ب)

شکل ٥. نسبت مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده مدل اضمحلال روسازی: الف) برای داده‌های آموزش و ب) برای داده‌های آزمایش



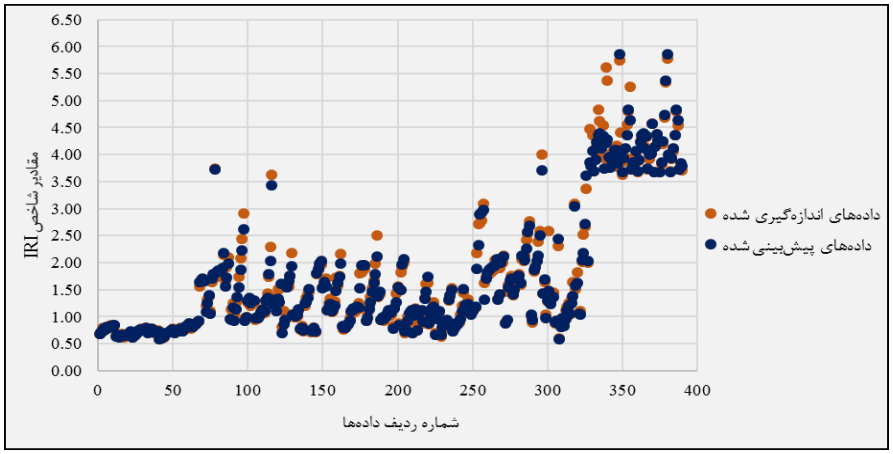
(الف)



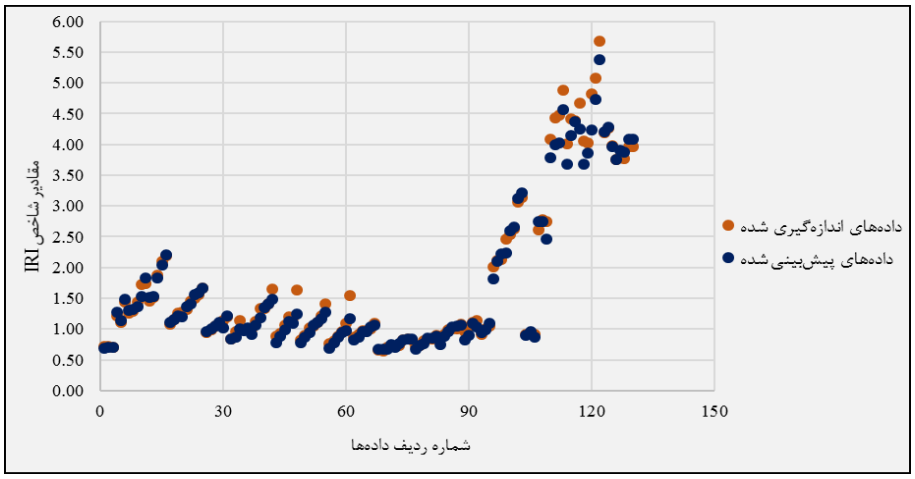
(ب)

شکل ٦. نسبت مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده مدل بهبود عملکرد روسازی: الف) برای داده‌های آموزش و ب) برای داده‌های آزمایش

در شکل ۷، مقایسه‌ای میان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای داده‌های مدل اضمحلال روسازی ارائه شده در این مطالعه انجام شده است. همانطور که مشخص است، مقدار پیش‌بینی شده برای هر داده خاص بیانگر تخمین خوبی از مقدار اندازه‌گیری شده برای آن داده است. در واقع، تطابق نقاط نمودارهای شکل ۷، بیانگر کم بودن خطای مقادیر پیش‌بینی شده و دقت زیاد مدل اضمحلال روسازی ارائه شده در این مطالعه است. نمودارهای اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای داده‌های مدل اضمحلال روسازی نیز در شکل ۸ ارائه شده است. همانطور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، تجمع مقادیر خطا (اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده) در هر دو نمودار داده‌های آموزش و آزمایش در بازه کمتر از ۰/۱ بسیار زیاد است. به بیان دیگر، می‌توان گفت که اختلاف اکثر مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار کم بوده که این موضوع نیز نشان‌دهنده دقت زیاد تخمین و خطای کم معادله اضمحلال روسازی ارائه شده در این پژوهش است.

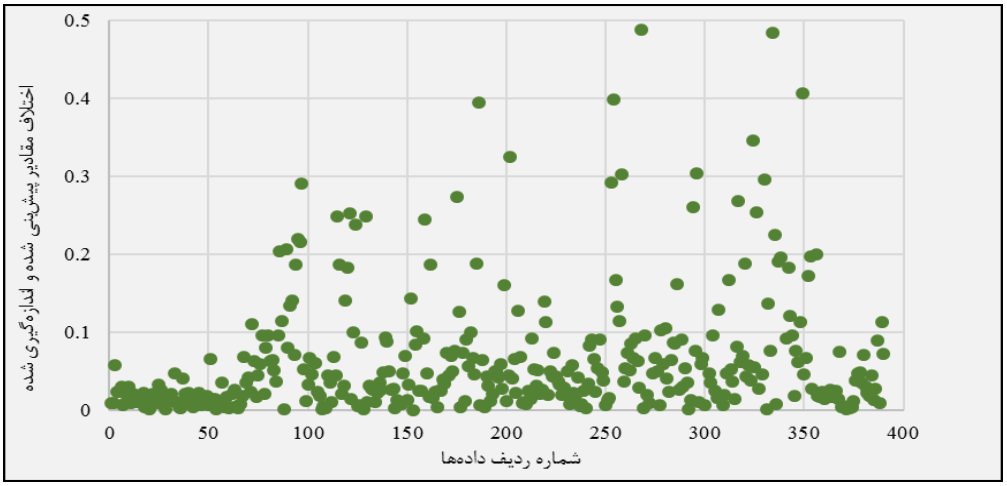


(الف)

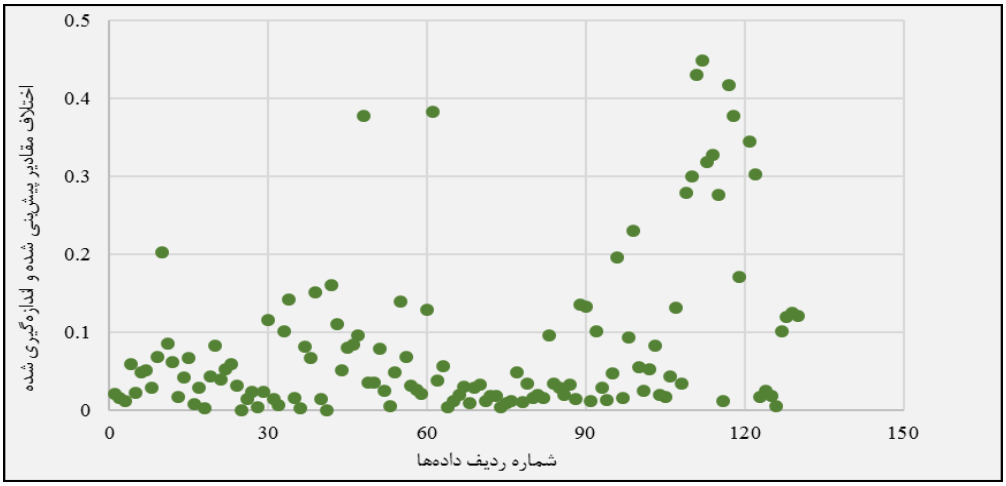


(ب)

شکل ۷. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده مدل اضمحلال روسازی: الف) برای داده‌های آموزش و ب) برای داده‌های آزمایش



(الف)

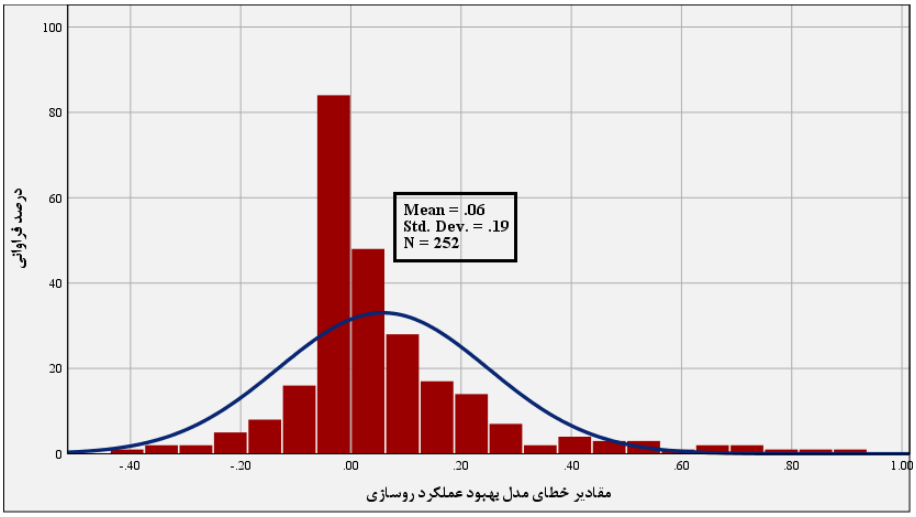


(ب)

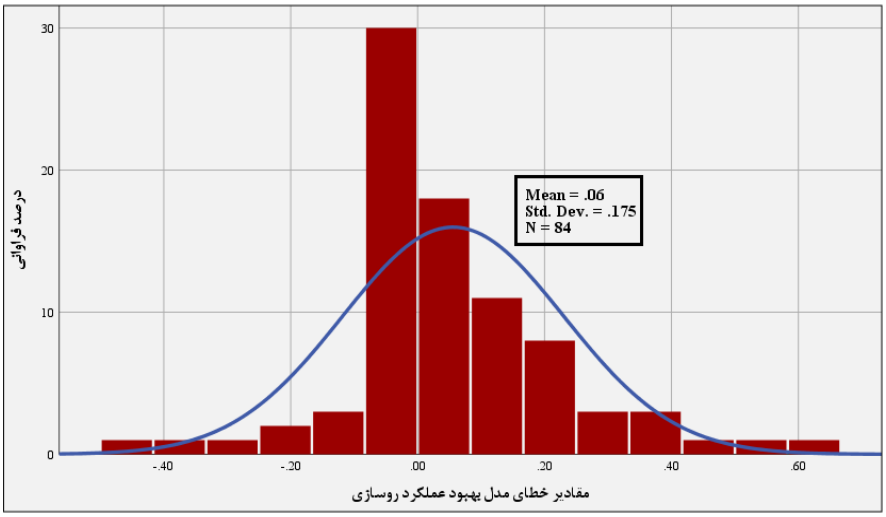
شکل ۸. اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده مدل اضمحلال روسازی: الف) برای داده‌های آموزش و ب) برای داده‌های آزمایش

برای یک مدل با دقت خوب، توزیع مقادیر خطا باید از توزیع نرمال پیروی کند و میانگین مقادیر خطا نزدیک به صفر باشد. شکل ۹، توزیع فراوانی مقادیر خطای مدل بهبود عملکرد روسازی ارائه شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. برای مدل بهبود عملکرد توسعه یافته در این مطالعه، توزیع فراوانی مقادیر خطا بسیار نزدیک به توزیع نرمال است و مقدار میانگین و انحراف معیار مقادیر خطا برای داده‌های آموزش مدل به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۱۹ و برای داده‌های آزمایش مدل ۰/۰۶ و ۰/۱۷ می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت که میانگین مقادیر خطای مدل توسعه یافته نیز نزدیک به صفر بوده و مدل از دقت خوبی برخوردار است.

برای بررسی بیشتر دقت مدل توسعه یافته اضمحلال روسازی به روش تکاملی تفاضلی برای پیش‌بینی افزایش شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی، مقایسه‌ای میان برازندگی مدل‌های موجود برای پیش‌بینی این شاخص به روش‌های دیگر یادگیری ماشین و روش تکاملی تفاضلی در جدول ۷ ارائه شده است. شاخص اطلاعاتی آکائیکه (AIC) برای مقایسه مدل توسعه یافته در این مطالعه با سایر مدل‌های موجود در ادبیات فنی به کمک رابطه (٦) محاسبه شد. همانطور که از نتایج به‌دست آمده در جدول ۷ مشخص است، مقدار AIC به‌دست آمده برای مدل مطالعه انجام شده نسبت به سایر مدل‌های موجود، عدد کمتری به‌دست آمده است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل این مطالعه در پیش‌بینی شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی بهتر و دقیق‌تر عمل می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۹. توزیع فراوانی مقادیر خطا مدل بهبود عملکرد روسازی: الف) برای داده‌های آموزش و ب) برای داده‌های آزمایش

جدول ۷. مقایسه دقت روش‌های مختلف پیش‌بینی برای برآورد افزایش شاخص ناهمواری روسازی

پژوهش	روش تخمین	متغیرهای در نظر گرفته شده در مدل				AIC
		IRI اولیه	آب‌وهوایی	ترافیکی	مشخصات لایه‌ها	
مطالعه حاضر	DEP	☑	☑	☑	☑	۱۸/۵۸
مزاری و رودریگز (۲۰۱۶)	GEP	☑	–	☑	–	۱۸/۹۶
زیاری و همکاران (۲۰۱۶)	GMDH	☑	–	☑	–	۱۹/۶۷
زیاری و همکاران (۲۰۱۶)	ANN	☑	–	☑	–	۲۲/۰۷

٤. نتیجه‌گیری

مدل‌های پیش‌بینی اضمحلال و بهبود عملکرد روسازی همواره یکی از ارکان اصلی و مورد نیاز در سیستم‌های مدیریت روسازی می‌باشند. در این مطالعه، به کمک داده‌های اطلاعاتی برنامه بلندمدت روسازی، دو معادله جدید برای تخمین مقدار اضمحلال شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی و بهبود این شاخص تحت اعمال روکش ارائه گردید. بنا بر نتایج به‌دست آمده، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- دقت پیش‌بینی مدل اضمحلال روسازی در این مطالعه نسبت به سایر روش‌های پیش‌بینی شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی بسیار بیشتر است. همچنین، این نکته نیز حائز اهمیت است که در مدل ارائه شده در این پژوهش، تأثیر متغیرهای آب و هوایی مانند نرخ بارندگی سالانه، تعداد روزهای ایجاد ذوب و یخ در سال و دمای متوسط سالانه هوا و متغیرهای مشخصات روسازی مانند ضخامت لایه بتن آسفالتی و اساس که در مدل‌های گذشته کمتر به آنها پرداخته شده بود، در کنار سایر عوامل مؤثر مانند وضعیت روسازی موجود و عوامل ترافیکی لحاظ شدند. مقدار شاخص‌های ارزیابی R^2، MAE و RMSE برای مدل اضمحلال روسازی در این پژوهش به ترتیب ۰/۹۸۵، ۰/۰۷٦ و ۰/۱٥٤ برای داده‌های آموزش مدل و ۰/۹۹۰، ۰/۰۸٥ و ۰/۱٤۱ برای داده‌های آزمایش مدل به‌دست آمد.
- در این مطالعه، با بررسی روش‌های مرسوم تعمیر و نگهداری در ایران، تنها روکش همبستگی زیادی با مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی قبل از اعمال تعمیر و نگهداری مورد نظر داشت. در نتیجه، متغیرهای شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی قبل از اعمال روکش و ضخامت روکش برای توسعه مدل بهبود عملکرد روسازی در نظر گرفته شدند. دقت مدل ارائه شده (R^2) برای مدل بهبود عملکرد روسازی در این پژوهش به ترتیب ۰/۹٦۲ و ۰/۹۷۰ برای داده‌های آموزش و آزمایش به‌دست آمد. همچنین، برای داده‌های آموزش و آزمایش مدل، مقدار میانگین خطای مطلق (MAE) ۰/۱۲٥ و ۰/۱۲۰ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۲۰٤ و ۰/۱۸۲ محاسبه شد.
- روش توسعه یافته در این پژوهش برای تخمین مدل‌های اضمحلال و بهبود عملکرد روسازی، روش تکاملی تفاضلی می‌باشد. مزیت اصلی این روش برای توسعه مدل نسبت به سایر روش‌های یادگیری ماشین، دقت بسیار زیاد این مدل و ارائه رابطه ریاضی میان متغیرهای ورودی و خروجی می‌باشد. در نتیجه، از معادلات توسعه یافته در این پژوهش می‌توان در برنامه‌ریزی‌های تعمیر و نگهداری استفاده نمود و پس از تعیین وضعیت راه‌ها به کمک معادله اضمحلال روسازی ارائه شده، به کمک معادله دیگر، میزان بهبود عملکرد روسازی تحت روکش با دقت بسیار زیاد پیش‌بینی شود.

۵. مراجع

Abdelaziz, N., Abd El-Hakim, R. T., El-Badawy, S. M. and Afify, H. A. 2018. "International roughness index prediction model for flexible pavements". Int. J. Pavement Eng., 21(1): 88-99.

Chan, Y. H. 2003. "Biostatistics 104: Correlation analysis". Singapore Med. J., 44: 614-619.

Choi, J., Adams, T. M. and Bahia, H. U. 2004. "Pavement roughness modeling using back-propagation neural networks". Computer-Aided Civ. Infrastruct. Eng., 19(4): 295-303.

Dalla Rosa, F., Liu, L. and Gharaibeh, N. G. 2017. "IRI prediction model for use in network-level pavement management systems". J. Transport. Eng., Part B: Pavements, 143(1): 04017001.

Golafshani, E. M. and Behnood, A. 2019. "Estimating the optimal mix design of silica fume concrete using biogeography-based programming". Cement Concrete Compos., 96: 95-105.

Gordon, R. A. 2015. Regression analysis for the social sciences. Routledge, New York.

Labi, S. and Sinha, K. C. 2003. "The effectiveness of maintenance and its impacts on capital expenditures". Technical Report No. FHWA/IN/JTRP 2002-27, Joint Transportation Research Program, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

Lin, J., Yau, J. and Hsiao, L. 2003. "Correlation analysis between international roughness index (IRI) and pavement distress by neural network". 82th Transportation Research Board Annual Meeting (CD ROM), Washington, D.C.

Lu, P. and Tolliver, D. 2012. "Pavement treatment short-term effectiveness in IRI change using LTPP data". J. Transport. Eng., 138(11): 1297-1302.

Mazari, M. and Rodriguez, D. D. 2016. "Prediction of pavement roughness using a hybrid gene expression programming-neural network technique". J. Traffic Transport. Eng., 3(5): 448-455.

Mirzahosseini, M., Jiao, P., Barri, K., Riding, K. and Alavi, A. H. 2019. "New machine learning prediction models for compressive strength of concrete modified with glass cullet". Eng. Comput., 36: 876-898.

Mohamed Jaafar, Z. F. B., Uddin, W. and Najjar, Y. 2016. "Asphalt pavement roughness modeling using the artificial neural network and linear regression approaches for LTPP Southern region". Transportation Research Board 95th Annual Meeting, Washington, D.C.

Naseri, H., Jahanbakhsh, H., Moghadas Nejad, F. and Golroo, A. 2020. "Developing a novel machine learning method to predict the compressive strength of fly ash concrete in different ages". AUT J. Civ. Eng., 4(4). DOI: 10.22060/ajce.2019.16124.5569

Owolabi, A. O., Sadiq, O. M. and Abiola, O. S. 2012. "Development of performance models for a typical flexible road pavement in Nigeria". Int. J. Traffic Transport Eng., 2(3): 178-184.

Shahin, M. Y. 1994. "Pavement maintenance management for airports, roads, and parking lots". Chapman & Hall, New York.

Shirzadi Javid, A. A., Naseri, H. and Etebari Ghasbeh, M. A. 2020. "Estimating the optimal mixture design of concrete pavements using a numerical method and meta-heuristic algorithms". Iran. J. Sci. Tech.-Trans. Civ. Eng., 45: 913-927.

Storn, R. and Price, K. 1997. "Differential evolution-a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces". TR-95-012, 1995 [Online]. Available: http://http.icsi.berkeley.edu/~storn/litera.html.

Varadarajan, M. and Swarup, K. S. 2008. "Differential evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch". Electr. Power Energy Syst., 30: 435-441.

Wang, K. C. P., Li, Q., Hall, K. D. and Elliott, R. P. 2007. "Experimentation with Gray theory for pavement smoothness prediction". Transport. Res. Record, 1990: 3-13.

Ziari, H., Sobhani, J., Ayoubinejad, J. and Hartmann, T. 2016. "Prediction of IRI in short and long terms for flexible pavements: ANN and GMDH methods". Int. J. Pavement Eng., 17(9): 776-788.