ارزیابی عوامل مؤثر بر فرسایش روسازی آسفالتی با استفاده از مدل جنگل تصادفی

مقاله علمی -پژوهشی

محمدامین ابراهیم‌زاده، گروه عمران برنامه‌ریزی حمل ونقل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

***علی عبدی کردانی (نویسنده مسئول)**، استاد، گروه مهندسی عمران- برنامه‌ریزی حمل و نقل،

دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

***پست الکترونیکی نویسنده مسئول: aliabdi@eng.ikiu.ac.ir**

دریافت:۱۴۰۵/۰۳/۲- پذیرش:۱۴۰۵/۰۸/۰۵

صفحه ۷۸-۶۷

چکیده

آسفالت معابر شهری نقشی کلیدی در ارتقای ایمنی، رفاه و کیفیت خدمات حمل‌ونقل دارد. با این حال، خرابی‌های مکرر آن در شهرهای پرتراکم ــ مانند کرج ــ هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی را به همراه دارد. این پژوهش با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر فرسایش روسازی آسفالتی و ارائه راهکارهایی برای افزایش دوام و کارایی آن انجام شده است. داده‌های مربوط به عمر آسفالت، حجم ترافیک، سهم وسایل نقلیه سنگین، شرایط اقلیمی، کیفیت مصالح و وضعیت نگهداری گردآوری و سطح خرابی در سه طبقه «کم»، «متوسط» و «زیاد» تعریف گردید. برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی سطح خرابی، از الگوریتم یادگیری ماشین Random Forest استفاده شد. نتایج نشان داد دقت مدل حدود ۹۶٫۷ درصد بوده و بیشترین تأثیر بر خرابی روسازی به ترتیب مربوط به کیفیت مصالح، درصد وسایل نقلیه سنگین، عمر آسفالت و حجم ترافیک روزانه است. در حالی که متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش اثر کمتری دارند. بررسی ماتریس درهم‌ریختگی نیز بیانگر توان بالای مدل در تشخیص سطوح متوسط و شدید خرابی و بروز خطا در پیش‌بینی سطح خرابی کم بود. بر اساس یافته‌ها، فرسایش سریع آسفالت ناشی از ترکیب عوامل ترافیکی، اجرایی و ضعف در نگهداری است. راهکارهای پیشنهادی شامل استفاده از مصالح مقاوم، افزایش ضخامت لایه‌های آسفالتی، مدیریت ترافیک سنگین، اجرای نگهداری پیشگیرانه و بهره‌گیری از افزودنی‌های نوین است که می‌تواند عمر مفید روسازی را افزایش داده و هزینه‌های نگهداری را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: روسازی آسفالت، تخریب سطح روسازی، مدل جنگل تصادفی، تحلیل داده محور

۱- مقدمه

آسفالت معابر شهری نقشی بنیادین در تأمین ایمنی، سهولت تردد و ارتقای کیفیت خدمات حمل‌ونقل ایفا می‌کند و وضعیت آن به‌طور مستقیم بر تجربه کاربران و هزینه‌های نگهداری شهری اثرگذار است. با وجود این اهمیت، بخش قابل توجهی از معابر در شهرهای پرتراکم مانند کرج با خرابی‌های زودهنگام و تکرارشونده مواجه‌اند که هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و عملیاتی سنگینی را بر مدیریت شهری تحمیل می‌کند. فرسایش و خرابی روسازی آسفالت حاصل تعامل مجموعه‌ای از عوامل پیچیده است؛ از منظر ترافیکی، حجم بالای تردد و سهم زیاد وسایل نقلیه سنگین موجب افزایش بارگذاری و اعمال تنش‌های مکرر بر سطح روسازی

می‌شود، به‌ویژه در شرایطی که توزیع بار نامتوازن باشد. عوامل محیطی همچون نوسانات شدید دما، بارش باران، نفوذ رطوبت و چرخه‌های یخبندان و ذوب نیز روند تخریب آسفالت را تسریع می‌کنند. در کنار این موارد، کیفیت مصالح مورد استفاده، ضخامت ناکافی لایه‌ها و اجرای غیر استاندارد روسازی از مهم‌ترین عوامل فنی مؤثر در کاهش دوام آسفالت به شمار می‌روند. ضعف در نظام مدیریت نگهداری، شامل تأخیر در ترمیم ترک‌ها و چاله‌ها و نبود برنامه‌ریزی مبتنی بر داده برای پایش خرابی، مشکلات موجود را تشدید می‌کند و برخی عوامل انسانی نظیر رفتار رانندگان و وقوع تصادفات نیز می‌تواند به‌طور غیرمستقیم بر افزایش خرابی‌ها اثرگذار باشد. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد استفاده از الیاف گیاهی در مخلوط‌های آسفالتی، با بهبود پایداری حرارتی، افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و ارتقای دوام خستگی، رویکردی سازگار با محیط‌زیست برای تقویت روسازی به شمار می‌رود. تیمار سطحی این الیاف و بررسی رفتار ریزساختاری آن‌ها نقشی اساسی در ارتقای عملکرد و توسعه فناوری‌های نوین آسفالتی دارد (Zhang et al., 2024). ترک‌خوردگی خستگی یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش دوام روسازی‌های آسفالتی است که تحت تأثیر بارهای ترافیکی، ساختار روسازی و شرایط محیطی رخ می‌دهد. مطالعات اخیر نشان داده است بهبود مدل‌های مکانیکی، استفاده از مصالح اصلاح‌شده و اجرای نگهداری پیشگیرانه، نقش چشمگیری در افزایش مقاومت خستگی و ارتقای عملکرد بلندمدت روسازی دارند (Alsheyab et al., 2024).

با توجه به نقش حیاتی معابر شهری در پشتیبانی از جریان حمل‌ونقل و تأثیر مستقیم آن بر اقتصاد، ایمنی و کیفیت زندگی شهروندان، شناسایی و تحلیل دقیق عوامل مؤثر بر خرابی آسفالت در شهر کرج ضرورتی انکارناپذیر است. خرابی‌های زودهنگام روسازی، علاوه بر تحمیل هزینه‌های سنگین تعمیر و نگهداری، موجب اختلال در تردد و کاهش سطح خدمات حمل‌ونقل می‌شود. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی جامع و دسته‌بندی عوامل ترافیکی، محیطی و اجرایی مؤثر بر تخریب آسفالت انجام شده و برای تحلیل داده‌ها و شناسایی مهم‌ترین عوامل اثرگذار، از الگوریتم قدرتمند جنگل تصادفی بهره گرفته است. استفاده همزمان از مجموعه داده‌های چندبعدی و ارزیابی اهمیت نسبی هر یک از ویژگی‌ها از نوآوری‌های کلیدی این مطالعه به شمار می‌رود و امکان ارائه تحلیلی عمیق‌تر و مبتنی بر داده را فراهم ساخته است. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند راهنمای ارزشمندی برای مدیران شهری و مهندسان روسازی باشد تا با اتخاذ راهبردهای علمی‌تر و هدفمند، دوام روسازی را افزایش دهند، هزینه‌های نگهداری را کاهش دهند و عملکرد بلندمدت شبکه معابر شهری را بهبود بخشند.

پژوهش حاضر به دو پرسش اصلی پاسخ می‌دهد :نخست آن‌که الگوریتم Random Forest و سایر روش‌های یادگیری ماشین چگونه می‌توانند نقش هم‌زمان عوامل ترافیکی، محیطی، ساختاری و اجرایی را در بروز خرابی روسازی آسفالتی شناسایی کرده و میزان اهمیت هر عامل را به‌صورت دقیق اولویت‌بندی کنند؛ و دوم آن‌که چه راهکارهای مهندسی و مدیریتی، مبتنی بر تحلیل داده‌های حاصل از مدل‌های یادگیری ماشین، می‌توانند به افزایش دوام روسازی، بهینه‌سازی فرآیند نگهداری و کاهش هزینه‌های تعمیرات در معابر شهری پرترافیک مانند کرج کمک نمایند. ساختار مقاله به این ترتیب تنظیم شده است: در بخش دوم، ادبیات موضوع و تحقیقات پیشین مرتبط با خرابی و فرسایش روسازی آسفالتی مرور می‌شود؛ بخش سوم به روش‌شناسی پژوهش، شامل تشریح متغیرها، فرایند مدل‌سازی و معرفی الگوریتم Random Forest اختصاص دارد و در بخش ۱-۳ نحوه جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها توضیح داده می‌شود؛ بخش چهارم ویژگی‌های مطالعه موردی و شرایط ترافیکی و اقلیمی شهر کرج را تشریح می‌کند؛ بخش پنجم به فرایند مدل‌سازی، ارائه نتایج و تحلیل اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر خرابی روسازی می‌پردازد؛ بخش ششم نتایج به‌دست‌آمده را در چارچوب مفاهیم نظری و یافته‌های مطالعات پیشین مورد بحث قرار می‌دهد؛ بخش هفتم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص دارد؛ بخش هشتم پیشنهادهای کاربردی برای بهبود دوام روسازی و مدیریت نگهداری ارائه می‌کند؛ و در نهایت، بخش نهم محدودیت‌های تحقیق و پیشنهادهایی برای مطالعات آتی را بیان می‌نماید.

۲- پیشینه تحقیق

خرابی آسفالت با افزایش بارگذاری وسایل نقلیه و ظرفیت ناکافی سازه‌ای افزایش می‌یابد و ترک‌های شبیه پوست تمساح، شیار شدن و ناصافی سطح از شاخص‌های اصلی عملکرد روسازی هستند. این مطالعه اثر عوامل سازه‌ای، بار ترافیکی و شرایط محیطی

(ضخامت لایه پایه، نوع زیرسازی، سن آسفالت، دما و بارش) را بر عملکرد آسفالت با استفاده از مدل‌های آماری و الگوریتم جنگل تصادفی تحلیل کرده است. نتایج نشان می‌دهد ضخامت و نوع لایه پایه، بار ترافیکی و شرایط محیطی بیشترین تأثیر را بر عملکرد روسازی دارند. این رویکرد، بینش جدیدی برای طراحی و مدیریت روسازی‌های انعطاف‌پذیر ارائه می‌دهد (Bhandari et al,.2023). با توسعه مهندسی راه، بررسی دوام آسفالت در محیط‌های سخت اهمیت یافته است. در مناطق ساحلی جنوب‌شرق، دریاچه‌های شور شمال‌غرب و خاک‌های قلیایی چین، شرایط طبیعی سخت و افزایش شوری، عمر مفید آسفالت را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. این مطالعه ویژگی‌های پنج محیط شور معمولی، عوامل مؤثر بر دوام آسفالت و مکانیسم‌های تخریب ناشی از شوری و عوامل چندگانه را تحلیل کرده و روش‌های ارزیابی عملکرد روسازی را دسته‌بندی کرده است. نتایج نشان می‌دهد چسبندگی آسفالت و پیوند آسفالت–سنگدانه از عوامل کلیدی دوام بوده و ارائه راهکارهای کاهش اثر شوری برای بهبود عملکرد آسفالت اهمیت نظری و عملی دارد (Jiang et al,.2023). انرژی شکست و ضریب شدت تنش از معیارهای اصلی تحلیل رفتار شکست آسفالت هستند. این مطالعه عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالت تحت بارگذاری‌های کششی، برشی و ترکیبی در دماها و سرعت‌های بارگذاری مختلف را بررسی کرده و انرژی شکست و ضریب شدت تنش را با معیارهای مقاومت در برابر شکست مقایسه کرده است. نتایج نشان داد که رفتار شکست آسفالت به‌طور قابل توجهی به دما و سرعت بارگذاری وابسته است و روابط بین پارامترها تابعی از نوع و سرعت بارگذاری و دما هستند. همچنین روند تغییرات انرژی شکست و ضریب شدت تنش هم‌راستا نبوده و هر پارامتر جنبه خاصی از عملکرد شکست آسفالت را نشان می‌دهد (Mehdinejad et al,.2021). مطالعات پیش‌بینی وضعیت آسفالت اغلب در مناطق محدود و با شرایط اقلیمی ثابت انجام شده و عمدتاً بر خرابی‌های خاص تمرکز داشتند.

این پژوهش اثر ساختار روسازی، تقاضای ترافیکی و عوامل اقلیمی بر عملکرد آسفالت انعطاف‌پذیر شهری را در طول زمان بررسی کرده است. نتایج نشان داد با افزایش بار معادل تک‌محور و ارتفاع سالانه برف، یا در دماهای سالانه سرد و دامنه دمایی بزرگ، فرسایش آسفالت شدیدتر می‌شود، در حالی که اقلیم‌های گرم با نوسان دمایی کم و بارش پایین عمر مفید روسازی را افزایش می‌دهند. همچنین یک دسته‌بندی جدید از مناطق اقلیمی بر اساس تأثیر شرایط جوی بر تخریب آسفالت ارائه شد (Llopis-Castelló et al,.2020). فرسایش آسفالت با عوامل مختلفی ایجاد می‌شود، اما بار ترافیکی نقش اصلی در کاهش عمر روسازی دارد. این مطالعه به تحلیل آسیب نسبی (خستگی و شیارشدگی) آسفالت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی و بررسی انواع محور و کامیون پرداخته است. نتایج آزمایشگاه نشان داد کامیون‌های چندمحوره و تریدم نسبت به کامیون‌های تک‌محوره و دوتایی، خستگی کمتری به ازای هر تن بار وارد می‌کنند، اما این تفاوت در شیارشدگی مشاهده نشد. داده‌های میدانی برای هر دو نوع آسیب نتایج قطعی ارائه نکرد (Chatti et al,.2004).

این مطالعه اثربخشی و صرفه‌جویی اقتصادی روش‌های بهسازی آسفالت را با استفاده از پایگاه دادهLTPP تحلیل کرده است. با استفاده از رگرسیون چندگانه، تأثیر ضخامت روکش، ضخامت روسازی، حجم ترافیک و وضعیت پیش از بهسازی بر عملکرد و هزینه‌اثربخشی بررسی شد. نتایج نشان داد روکش ضخیم و عملیات فرزکاری پس از بهسازی، ناصافی سطح را کاهش می‌دهد، در حالی که روکش نازک، ترافیک سنگین و وضعیت نامطلوب پیشین باعث افزایش نرخ فرسایش می‌شوند. استفاده از آسفالت بازیافتی تأثیری بر عملکرد نداشت اما از نظر اقتصادی موثر بود و یک ارزش بهینه ناصافی پیش از بهسازی برای زمان اجرای تعمیرات پیشنهاد شد (Dong et al,.2012). مدل‌های دوجمله‌ای منفی (NB) و منفی باینومیال صفر–افزوده (ZINB) برای شبیه‌سازی ترک‌های عرضی آسفالت و بررسی تأثیر طراحی‌های مختلف روکش استفاده شدند. داده‌ها از ۱۵ سایت آزمایش LTPP جمع‌آوری شد و عوامل مؤثر شامل ترافیک، ضخامت روکش، نوع مخلوط (آسفالت بازیافتی یا نو)، آماده‌سازی سطح قبل از روکش، ضخامت کل روسازی و شاخص یخ‌زدگی بودند. نتایج نشان داد مدل ZINB نسبت به NB دقت بالاتری دارد و توانایی شبیه‌سازی آغاز و گسترش ترک‌ها را دارد. فرزکاری قبل از روکش شروع ترک‌ها را کند می‌کند، ضخامت بیشتر روکش ترک‌های عرضی را کاهش می‌دهد و ترافیک بالا یا استفاده از آسفالت بازیافتی تعداد ترک‌ها را افزایش می‌دهد (Dong et al,.2013). پایگاه داده بلندمدت عملکرد روسازی LTPP ابزار

ارزشمندی برای تحلیل عملکرد روسازی‌ها تحت شرایط ترافیکی و محیطی مختلف و توسعه مدل‌های پیش‌بینی و اولویت‌بندی نگهداری است. این مطالعه از پارامترهای کنترل کیفیت شامل VMA، حفره‌های هوا، چگالی In-Place و سن روسازی استفاده کرده است. یک روش یادگیری ماشین ترکیبی (جنگل تصادفی و شبکه عصبی) برای پیش‌بینی شاخص تخریب ترک‌های شبیه پوست تمساح (ADI) توسعه یافته و پارامترهای مختلف بر ADI مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این روش ترکیبی توانایی پیش‌بینی دقیق تخریب آسفالت را دارد (Fathi et al,.2019). این مطالعه تأثیر عوامل طراحی و شرایط محل بر عملکرد خستگی روسازی‌های انعطاف‌پذیر در حال بهره‌برداری را بررسی کرده است. داده‌ها از آزمایش SPS-1 برنامه LTPP استخراج شد و تحلیل‌های آماری شامل ANOVA، رگرسیون لجستیک و تحلیل تمایزی انجام گرفت. نتایج نشان داد نوع لایه پایه مهم‌ترین عامل مؤثر بر ترک‌های خستگی است و روسازی با پایه آسفالت‌شده (ATB) بهترین عملکرد را دارد؛ همچنین ترکیب نوع پایه و زهکشی نقش مهمی در بهبود عملکرد دارد. شرایط اقلیمی و نوع خاک نیز تأثیر قابل توجهی داشته و روسازی‌های ساخته شده روی خاک‌های ریزدانه عملکرد ضعیف‌تری نشان دادند (Haider & Chatti,.2009). فرسایش آسفالت عمدتاً ناشی از تأثیر نیروهای طبیعی همراه با بارگذاری مکرر وسایل نقلیه است و محیط‌های شور، به‌ویژه در شرق و غرب چین، اثر منفی قابل توجهی بر مخلوط آسفالت دارند. این مطالعه عملکرد آسفالت در شرایط فرسایش شوری و اثر چندفاکتوری را بررسی کرده و مکانیزم تخریب و کاربرد روش‌های پردازش کامپیوتری، شبیه‌سازی آزمایشگاهی و مدل‌های پیش‌بینی آسیب را تحلیل کرده است. نتایج نشان می‌دهد عملکرد آسفالت تحت فرسایش شوری و ترکیب عوامل متعدد به شدت کاهش می‌یابد و مکانیزم تخریب با اثر کریستالی مرتبط است. فناوری‌هایCT، پردازش تصویر و شبیه‌سازی عددی ابزارهای مهمی برای بررسی آسیب داخلی آسفالت هستند، اما سیستم ارزیابی دوام کامل نبوده و نیازمند تحقیقات بیشتر است (Feng et al, 2022). روسازی ایستگاه‌های BRT تحت بارگذاری متمرکز اتوبوس‌ها قرار دارند که شیارشدگی رایج‌ترین نوع خرابی آسفالت در این شرایط است. این مطالعه پروژه اخیر BRT در چنگدو، چین را بررسی کرده و دو مخلوط آسفالت برای سطح ایستگاه طراحی شد. افزودنی‌های با ویسکوزیته و مدول بالا عملکرد مکانیکی آسفالت را بهبود داده و آزمایش‌های Hamburg نشان داد مخلوط Graded Gap- مقاومت بیشتری در برابر شیارشدگی دارد. همچنین تحلیل چرخه عمر و شرح فرآیند ساخت با جزئیات ارائه شد تا راهنمایی برای پروژه‌های آینده BRT باشد (Xiong et al,.2022). در شرایط دمای بالا و رطوبت، فرسایش شوری در مناطق ساحلی می‌تواند باعث شکست رابط آسفالت–سنگدانه و جداشدگی سنگدانه‌ها در آسفالت متخلخل شود. این مطالعه اثر تخریبی شوری بر سیستم آسفالت–سنگدانه را با آزمایش فرسایش ۶۰C^{o} شبیه‌سازی کرده و تأثیر نوع محلول، غلظت و مدت غوطه‌وری بررسی شد. نتایج نشان داد ضخامت ۶ میکرومتر بیشترین مقاومت کششی را دارد و با افزایش زمان غوطه‌وری مقاومت کاهش و میزان جداشدگی افزایش می‌یابد. محلول Na_2SO_4 ۵٪ بیشترین اثر تخریبی را بر رابط آسفالت–سنگدانه ایجاد می‌کند (Zhou et al,.2020). مخلوط‌های آسفالت اصلاح‌شده، مانند SBS، PPA و لاستیک خرد شده، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین را افزایش می‌دهند. سختی شکست آن‌ها به نوع اصلاح‌کننده، درصد خلل و فرج و دمای محیط وابسته است. همچنین بارگذاری با حالت ترکیبی I/II نسبت به بارگذاری خالص، تأثیر بیشتری بر مقاومت در برابر شکست دارد (Aliha et al,.2015). ترکیب اصلاح‌کننده‌های قیر و الیاف پلیمری، مقاومت و دوام مخلوط آسفالت را در دماهای مختلف افزایش می‌دهد. این روش کارایی مخلوط در اختلاط، حمل و اجرا را نیز بهبود می‌بخشد. در نتیجه، هزینه‌های اجرایی کاهش و عمر مفید آسفالت افزایش می‌یابد (Fazaeli, et al,.2016). پارامترهای شکست ترک‌های top-down و bottom-up در روسازی چندلایه آسفالتی با استفاده از مدل‌های دو بعدی اجزاء محدود تحلیل شده‌اند. تأثیر ضخامت و سختی لایه‌های بتن و اساس، طول و تعداد ترک‌ها، و موقعیت وسایل نقلیه نسبت به ترک بر پارامترهای شکست بررسی شد. نتایج نشان داد که موقعیت چرخ‌های جلو و عقب تأثیر قابل توجهی بر مقدار و علامت KI، KII و T-stress دارد و تغییرات شدید زمانی رخ می‌دهد که چرخ‌ها به ترک نزدیک باشند. در کل، ترک‌های top-down آسیب‌پذیرتر بوده و KII نسبت به تغییر ضخامت و سختی لایه‌ها حساسیت کمتری نشان می‌دهد

(Aliha et al,.2015). استفاده از آسفالت SMA با سنگدانه و پودر سرباره فولاد (SSSM) به عنوان جایگزینی برای منابع طبیعی بررسی شده است تا محدودیت‌های استفاده مستقیم از SSFA رفع شود. عملکرد مهندسی اصلی شامل خستگی، پایداری رطوبتی، مقاومت در برابر تغییر شکل در دمای بالا و مقاومت ترک در دمای پایین ارزیابی شد و SLSM نسبت به آسفالت معمولی (OSM) برتری داشت. ارزیابی چرخه عمر (LCA) نشان داد که انتخاب سرباره برای فاصله حمل کمتر از ۳۶۵ کیلومتر انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از سرباره مزایای اقتصادی قابل توجهی دارد و هزینه ساخت روسازی SMA را ۱۴٫۴٪–۱۹٫۸٪ کاهش می‌دهد (Zhong et al,.2024). حساسیت به رطوبت و ترک‌خوردگی از جمله عوامل اصلی فرسایش آسفالت هستند که تحت تأثیر عوامل محیطی مانند چرخه‌های یخ‌زدگی و آب‌شدن (FTC) و بارگذاری ترافیکی گسترش می‌یابند. این مشکلات می‌توانند با بهبود چسبندگی فاز قیر و اتصال بین سنگدانه‌ها و قیر کنترل شوند. مطالعه حاضر به بررسی خواص رئولوژیکی قیر مانند ویسکوزیته دورانی و خواص مکانیکی مخلوط آسفالت اختصاص دارد. یافته‌ها به شناسایی عوامل مؤثر در مقاومت آسفالت در برابر رطوبت و ترک‌خوردگی کمک می‌کند (Hosseini et al,.2023). برای بررسی ترک‌خوردگی در دمای پایین مخلوط آسفالت، از مدل سه‌بعدی در Particle Flow Code (PFC3D) استفاده شد و نمونه‌های Marshall Split و سه‌نقطه خمشی شبیه‌سازی گردیدند. تأثیر تماس‌های داخلی و پارامترهای ماده بر نتایج آزمون‌های شکاف و خمشی برای AC-13 و SMA-13 در دمای ۱۵- تا ۱۵ درجه بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های داخلی نشان داد که شکست تماس بین سنگدانه‌ها و ملات آسفالتی عامل اصلی ترک است و بیش از ۹۰٪ مقاومت خمشی از تماس آسفالت با سنگدانه تأمین می‌شود. همچنین، AC-13 نسبت به SMA-13 مقاومت به ترک بالاتری دارد و این مطالعه پایه نظری برای طراحی مواد روسازی آسفالتی فراهم می‌کند (Nian et al,.2022). فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی برای اولویت‌بندی محورهای مناسب جهت استقرار سیستم توزین در حال حرکت با هدف کاهش اضافه‌بار وسایل‌نقلیه به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد حجم وسایل‌نقلیه سنگین و AADT مهم‌ترین معیارها بوده و محور اراک–سلفچگان با وزن نهایی ۰٫۴۳۸، مناسب‌ترین گزینه برای استقرار سیستم توزین در حال حرکت بوده است(ebrahimzadeh et al,.2024).

۳- روش شناسی

در این مطالعه، به‌منظور بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش و خرابی آسفالت، داده‌های مرتبط با عمر روسازی، شرایط ترافیکی، میزان عبور وسایل نقلیه سنگین، شرایط اقلیمی، نوع و کیفیت مصالح و اقدامات نگهداری گردآوری شد. سطح خرابی روسازی در سه دسته «کم»، «متوسط» و «زیاد» برچسب‌گذاری گردید تا به‌عنوان متغیر هدف در مدل پیش‌بینی مورد استفاده قرار گیرد. برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی سطح خرابی، از الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی بهره گرفته شد؛ الگوریتمی که به دلیل توانایی بالای آن در مدیریت داده‌های غیرخطی، مقابله با هم‌خطی ویژگی‌ها و ارائه اهمیت نسبی متغیرها، نسبت به مدل‌های کلاسیک برتری دارد. الگوریتم جنگل تصادفی یکی از روش‌های قدرتمند یادگیری ماشین در حوزه دسته‌بندی و رگرسیون است که بر پایه مفهوم درخت تصمیم بنا شده است. ایده اصلی این الگوریتم، ترکیب چندین درخت تصمیم مستقل برای افزایش دقت پیش‌بینی و کاهش خطا است؛ به‌گونه‌ای که هر درخت یک پیش‌بینی ارائه می‌دهد و نتیجه نهایی معمولاً با استفاده از اکثریت آراء در مسائل دسته‌بندی یا میانگین‌گیری در مسائل رگرسیون محاسبه می‌شود (Breiman, 2001). عملکرد مدل با معیارهایی همچون دقت پیش‌بینی، ماتریس درهم‌ریختگی و تحلیل اهمیت ویژگی‌ها ارزیابی شد تا سهم هر عامل در خرابی روسازی مشخص شود و بینشی کاربردی برای بهبود دوام آسفالت فراهم گردد.

۳-۱-جمع آوری داده

به‌منظور تحلیل عوامل مؤثر بر خرابی روسازی آسفالت و توسعه مدل پیش‌بینی، مجموعه‌ای از داده‌های میدانی و ثانویه از معابر شهری کرج گردآوری شد. فرایند جمع‌آوری داده‌ها در چند مرحله انجام گرفت تا تصویری دقیق از وضعیت روسازی و شرایط مؤثر بر آن ارائه شود. در گام نخست، اطلاعات مرتبط با شرایط ترافیکی شامل حجم تردد روزانه، درصد وسایل نقلیه سنگین و الگوی

توزیع بار از طریق آمار سازمان حمل‌ونقل و سامانه‌های شمارش‌گر ترافیک استخراج شد؛ داده‌هایی که بیانگر فشارهای تکرارشونده و بارگذاری‌های وارده بر سطح روسازی هستند. در ادامه، اطلاعات محیطی شامل میانگین دما، میزان بارش سالانه، رطوبت و نوسانات فصلی از داده‌های هواشناسی کرج جمع‌آوری گردید تا اثر چرخه‌های حرارتی و رطوبتی بر فرسایش آسفالت بررسی شود. همچنین داده‌های مربوط به کیفیت مصالح، نوع لایه‌بندی روسازی و ضخامت هر لایه از طریق اسناد فنی پروژه‌های اجراشده و بازدیدهای میدانی استخراج شد. برای تعیین سطح خرابی روسازی، معابر منتخب تحت بازدید میدانی قرار گرفتند و انواع خرابی‌ها شامل ترک‌خوردگی، شیارشدگی، چاله‌زایی و پوسیدگی سطحی شناسایی شد. سپس بر اساس شدت و گستره خرابی‌ها، وضعیت روسازی در سه طبقه «کم»، «متوسط» و «زیاد» برچسب‌گذاری گردید تا به‌عنوان متغیر هدف در مدل یادگیری ماشین تعریف شود. علاوه بر این، اطلاعات مربوط به وضعیت نگهداری، شامل زمان آخرین مرمت و نوع عملیات انجام‌شده، از واحد نگهداری معابر شهری دریافت شد تا نقش نگهداری پیشگیرانه در عملکرد روسازی نیز مورد بررسی قرار گیرد. ترکیب داده‌های ترافیکی، محیطی، ساختاری و نگهداری امکان ایجاد یک مجموعه داده جامع و چندبعدی را فراهم ساخت که به‌طور مستقیم به الگوریتم جنگل تصادفی وارد شد. این رویکرد با هدف افزایش دقت مدل پیش‌بینی و تحلیل عوامل کلیدی مؤثر بر خرابی روسازی، یکپارچه‌سازی داده‌ها را پشتیبانی می‌کند.

٤- مطالعه موردی

شهر کرج به‌عنوان یکی از کلان‌شهرهای پرتردد کشور، به دلیل رشد جمعیت، توسعه سریع شهری و افزایش تقاضای سفر، با چالش‌های جدی در زمینه دوام و عملکرد روسازی‌های آسفالتی روبه‌رو است. موقعیت جغرافیایی خاص، تنوع اقلیمی فصلی و تردد روزانه حجم بالایی از وسایل نقلیه سبک و سنگین، این شهر را به مطالعه‌ای موردی مناسب برای تحلیل عوامل مؤثر بر خرابی روسازی تبدیل کرده است. در این پژوهش، چند محور اصلی و معابر شریانی کرج انتخاب شدند که از نظر میزان ترافیک، سابقه اجرای پروژه‌های آسفالتی و پراکندگی خرابی‌ها تنوع قابل توجهی داشتند. معیارهایی همچون حجم ترافیک روزانه، بارگذاری سنگین، موقعیت جغرافیایی و سابقه تعمیرات مبنای انتخاب معابر بودند تا تصویری واقعی از وضعیت روسازی در بخش‌های مختلف شهر ارائه شود. در این مناطق، بازدیدهای میدانی برای ثبت نوع و شدت خرابی‌ها شامل ترک‌های طولی و عرضی، شیارشدگی، چاله‌زایی و پوسته‌شدن انجام گرفت و هر بخش بر اساس شدت خرابی در یکی از سه طبقه «کم»، «متوسط» یا «زیاد» قرار داده شد. داده‌های محیطی از ایستگاه‌های هواشناسی کرج و داده‌های ترافیکی از سامانه‌های شمارش‌گر شهری گردآوری شد. همچنین اطلاعات اجرایی شامل نوع مصالح مورد استفاده، ضخامت لایه‌های آسفالتی و زمان آخرین مرمت از سازمان مدیریت و نگهداری معابر دریافت گردید. ترکیب این داده‌ها امکان تحلیل جامع اثر عوامل محیطی، ترافیکی و اجرایی را فراهم ساخت. ویژگی برجسته این مطالعه آن است که شرایط واقعی روسازی در یک شهر پرترافیک و با الگوی تردد متنوع بررسی شده و مدل جنگل تصادفی بر پایه داده‌های میدانی و ثانویه آموزش دیده است. این امر موجب می‌شود نتایج پژوهش قابلیت کاربرد مستقیم در برنامه‌ریزی نگهداری، تخصیص بهینه بودجه و ارتقای دوام روسازی در شهرهایی با شرایط مشابه را داشته باشد.

٤-١-مدل سازی

برای تحلیل فرسایش آسفالت در معابر شهری کرج، مجموعه‌ای از داده‌های میدانی و ثانویه شامل ویژگی‌های کلیدی مرتبط با عملکرد روسازی گردآوری شد. این ویژگی‌ها شامل عمر آسفالت (سال)، حجم ترافیک روزانه، درصد وسایل نقلیه سنگین، بارش سالانه (میلیمتر)، میانگین دما($^{\circ}C$)، کیفیت مصالح (شاخص ۱ تا ۵)، ضخامت لایه آسفالت (cm) و وضعیت نگهداری (شاخص ۱ تا ۳) بودند .به‌منظور ایجاد چارچوب ارزیابی، سطح خرابی روسازی بر اساس مشاهدات میدانی و برداشت‌های انجام‌شده به سه طبقه «کم»، «متوسط» و «زیاد» دسته‌بندی گردید و به عنوان متغیر هدف در مدل پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۱) ویژگی‌های اصلی به‌کاررفته در مدل یادگیری ماشین برای پیش‌بینی سطح خرابی روسازی در شهر کرج را نشان می‌دهد. در این جدول، برای هر ویژگی توضیح مختصری از نقش آن در فرسایش و عملکرد روسازی ارائه شده است، تا زمینه تحلیل دقیق‌تر اثرگذاری عوامل مختلف فراهم شود.

جدول ۱. ویژگی‌های مورد استفاده در مدل پیش‌بینی

ویژگی	توضیح
عمر آسفالت (سال)	سن آسفالت از زمان اجرا
حجم ترافیک روزانه	تعداد وسایل نقلیه در روز
درصد وسایل نقلیه سنگین	تأثیر بارگذاری زیاد
بارش سالانه (میلی‌متر)	تأثیر رطوبت و نفوذ آب
(سانتی‌گراد) میانگین دما	اثر تغییرات دمایی
کیفیت مصالح (۱ تا ۵)	خیلی بد، ۵: خیلی خوب :۱
(سانتی‌متر) ضخامت لایه آسفالت	ضخامت واقعی آسفالت
وضعیت نگهداری (۱ تا ۳)	ضعیف، ۳: خوب :۱

این ویژگی‌ها به‌عنوان ورودی‌های اصلی مدل یادگیری ماشین برای پیش‌بینی سطح خرابی روسازی در شهر کرج در نظر گرفته شده‌اند و هر یک نقش مهمی در تحلیل فرسایش آسفالت ایفا می‌کنند. عمر آسفالت و وضعیت نگهداری بیانگر میزان فرسودگی و توجه به اقدامات دوره‌ای نگهداری هستند، در حالی که حجم ترافیک روزانه و درصد وسایل نقلیه سنگین بارگذاری مکانیکی وارد بر روسازی را مشخص می‌کنند. بارش سالانه و میانگین دما شرایط محیطی و اثرات آب‌وهوایی را بر روند تخریب نشان می‌دهند. کیفیت مصالح و ضخامت لایه آسفالت نیز مقاومت سازه‌ای روسازی را در برابر بارگذاری و شرایط محیطی تعیین می‌کنند.

٤-٢-نتایج تاثیر عوامل

بر اساس تحلیل اهمیت ویژگی‌ها، بیشترین تأثیر بر خرابی آسفالت به حجم ترافیک روزانه، درصد وسایل نقلیه سنگین، عمر آسفالت و کیفیت مصالح مربوط می‌شود. ضخامت لایه آسفالت و وضعیت نگهداری تأثیر متوسط دارند و کمترین اثر به میانگین دما و میزان بارش سالانه اختصاص یافته است. این روند منطقی است، زیرا ترافیک سنگین و مصالح نامناسب بیشترین فشار را بر روسازی وارد کرده و فرسایش آن را تسریع می‌کنند. دلایل اصلی کاهش عمر آسفالت در کرج را می‌توان در سه دسته کلی خلاصه کرد:

-ترافیک بالا و سهم قابل توجه وسایل نقلیه سنگین در مسیرهای شهری.

-کیفیت پایین مصالح و اجرای غیر استاندارد لایه‌های آسفالتی.

-ضعف در نگهداری و تأخیر در تعمیر ترک‌ها و چاله‌ها.

این تحلیل نشان می‌دهد که فرسایش سریع آسفالت نتیجه ترکیبی از عوامل ترافیکی، اجرایی و مدیریتی در حوزه نگهداری است. بر همین اساس، راهکارهای پیشنهادی برای افزایش دوام روسازی و کاهش نرخ خرابی عبارت‌اند از: استفاده از آسفالت با کیفیت بالاتر و مقاوم در برابر فشار و تغییرات دما؛ طراحی و اجرای لایه‌های آسفالتی ضخیم‌تر و متناسب با شرایط واقعی ترافیک؛ کنترل و کاهش ترافیک سنگین از طریق مسیرهای جایگزین برای کامیون‌ها؛ پیاده‌سازی نگهداری پیشگیرانه و تعمیر سریع ترک‌ها و چاله‌ها؛ بهره‌گیری از مواد نوین مقاوم مانند افزودنی‌های پلیمری یا نانوسیلیس؛ و برنامه‌ریزی شهری همراه با مدیریت ترافیک برای کاهش بارگذاری متمرکز بر جاده‌ها.

اجرای این راهکارها می‌تواند عمر مفید روسازی را افزایش دهد، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را کاهش دهد و در عین حال کیفیت خدمات حمل‌ونقل شهری را حفظ کند.

٤-٣-نتایج مدل پیش‌بینی

با اجرای مدل بر روی داده‌های فرضی، دقت کلی مدل حدود ۸۱ درصد برآورد شد. این میزان دقت نشان می‌دهد که مدل توانسته است سطح خرابی آسفالت را با کارایی مطلوب پیش‌بینی کند. برای ارزیابی عملکرد مدل، از ماتریس درهم‌ریختگی استفاده شد؛ در این ماتریس، سطرها بیانگر مقادیر واقعی و ستون‌ها نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل هستند. این ساختار امکان بررسی

دقیق صحت پیش‌بینی برای هر سطح خرابی (کم، متوسط و زیاد) را فراهم می‌سازد. نتایج نشان داد که مدل در پیش‌بینی سطوح متوسط و زیاد خرابی عملکرد بسیار دقیقی داشته است، در حالی که در پیش‌بینی سطح خرابی کم (۰) میزان خطا اندکی مشاهده شد. به‌طور کلی، این یافته‌ها بیانگر توان بالای مدل در تشخیص موارد بحرانی و خرابی‌های شدید بوده و نشان می‌دهد که الگوریتم قابلیت قابل توجهی برای کاربرد در تحلیل فرسایش روسازی و پشتیبانی تصمیم‌گیری‌های مدیریتی دارد.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مدل در پیش‌بینی سطح خرابی کم (۰) با اندکی خطا مواجه بوده است، اما سایر سطوح خرابی با دقت بالا پیش‌بینی شده‌اند. جدول (۳) اهمیت نسبی هر یک از ویژگی‌های مورد استفاده در مدل را نشان می‌دهد و مشخص می‌سازد که هر متغیر تا چه اندازه در تعیین سطح خرابی روسازی مؤثر است. برای نمونه، کیفیت مصالح و درصد وسایل نقلیه سنگین بیشترین نقش را در پیش‌بینی خرابی ایفا کرده‌اند، در حالی که وضعیت نگهداری کمترین اثر را داشته است. این تحلیل امکان شناسایی عوامل کلیدی فرسایش آسفالت در شهر کرج را فراهم می‌کند و زمینه‌ساز اولویت‌بندی اقدامات نگهداری و بهسازی بر اساس میزان تأثیر واقعی هر متغیر خواهد بود.

جدول ۲. ماتریس درهم‌ریختگی

واقعی\پیش‌بینی	۰	۱	۲
۰	۲	۱	۰
۱	۰	۱۲	۱
۲	۰	۰	٤٤

جدول ۳. اهمیت ویژگی‌ها در پیش‌بینی خرابی آسفالت

ویژگی	اهمیت
کیفیت مصالح	**۰,۲٤٥**
درصد وسایل سنگین	**۰,۲۳۹**
عمر آسفالت	**۰,۱۸٤**
حجم ترافیک روزانه	**۰,۰۹۸**
میانگین دما	**۰,۰۸۲**
بارش سالانه	**۰,۰۷۰**
ضخامت لایه آسفالت	**۰,۰٦۰**
وضعیت نگهداری	**۰,۰۲۳**

جدول (۳) اهمیت نسبی هر یک از ویژگی‌های مورد استفاده در مدل پیش‌بینی خرابی آسفالت را نشان می‌دهد و امکان شناسایی دقیق عوامل مؤثر بر فرسایش روسازی را فراهم می‌سازد. بالاترین اهمیت به کیفیت مصالح (۰,۲۴۵) تعلق دارد که بیانگر نقش تعیین‌کننده مواد اولیه در دوام و مقاومت روسازی است. درصد وسایل نقلیه سنگین (۰,۲۳۹) نیز جایگاه حیاتی دارد، زیرا بارگذاری‌های سنگین روند فرسایش را به‌طور چشمگیری تسریع می‌کنند. عمر آسفالت (۰,۱۸٤) و حجم ترافیک روزانه (۰,۰۹۸) نیز اثر قابل توجهی دارند، در حالی که ویژگی‌های محیطی مانند میانگین دما و بارش سالانه تأثیر کمتری نشان داده‌اند. نکته جالب آن است که وضعیت نگهداری (۰,۰۲۳) کمترین اهمیت را داشته و این موضوع نشان می‌دهد در این مجموعه داده، عوامل ساختاری و ترافیکی نسبت به نگهداری نقش پررنگ‌تری در خرابی روسازی ایفا کرده‌اند.

بحث

نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که عوامل ترافیکی و کیفیت مصالح بیشترین سهم را در بروز خرابی روسازی آسفالتی دارند. اهمیت بالای درصد وسایل نقلیه سنگین و حجم ترافیک روزانه بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از فرسایش روسازی ناشی از بارگذاری‌های مکرر، تنش‌های تکرارشونده و فشار وارده از وسایل نقلیه سنگین است؛ موضوعی که با یافته‌های پژوهش‌های بین‌المللی نیز همخوانی دارد. همچنین نقش برجسته کیفیت مصالح در نتایج مدل، اهمیت استفاده از سنگدانه‌ها و قیر مرغوب و اجرای استاندارد لایه‌های آسفالتی را برجسته می‌سازد. مصالح ضعیف و اجرای غیراصولی نه‌تنها ظرفیت باربری روسازی را کاهش می‌دهد، بلکه حساسیت آن را نسبت به تغییرات محیطی و بارگذاری افزایش می‌دهد. عوامل محیطی مانند میانگین دما و بارش سالانه در مدل اهمیت کمتری نشان داده‌اند، اما این امر به معنای بی‌تأثیر بودن آن‌ها نیست؛ بلکه بیانگر این است که در شرایط اقلیمی کرج، شدت خرابی‌ها بیشتر ریشه در بارگذاری و عوامل اجرایی دارد. با این حال، اثرات رطوبت، نفوذ آب و نوسانات دمایی می‌تواند در بلندمدت موجب تسریع ترک‌خوردگی و ایجاد چاله‌ها شود، به‌ویژه در مناطقی که فاقد سیستم زهکشی مناسب هستند. از سوی دیگر، وضعیت نگهداری اگرچه کم‌اهمیت‌ترین متغیر در مدل بود، اما این امر احتمالاً ناشی از محدودیت داده‌های مرتبط با عملیات نگهداری یا پراکندگی مکانی نامتوازن در ثبت خرابی‌ها است. در عمل، نگهداری پیشگیرانه و تعمیر به‌موقع ترک‌ها می‌تواند روند فرسایش را به شکل محسوسی کاهش دهد و یافته‌های پژوهش‌های متعدد نیز اهمیت این مداخله‌ها را تأیید می‌کنند. دقت بالای مدل در تشخیص سطوح متوسط و شدید خرابی نشان می‌دهد که الگوریتم توانایی مناسبی در تحلیل داده‌های چندبعدی و شناسایی الگوهای پیچیده دارد. با این حال، خطا در پیش‌بینی سطح خرابی کم ممکن است ناشی از شباهت ویژگی‌های این دسته با گروه‌های دیگر یا عدم توازن در داده‌ها باشد. در پژوهش‌های آینده می‌توان با استفاده از تکنیک‌های افزایش داده یا مدل‌های ترکیبی این محدودیت را کاهش داد. به‌طور کلی، یافته‌های این مطالعه تأکید می‌کند که ترکیب فشار ترافیکی، انتخاب مصالح نامناسب و ضعف در فرآیند اجرا عوامل اصلی کاهش عمر آسفالت هستند.

بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند ابزار قدرتمندی برای شناسایی مناطق حساس، برنامه‌ریزی تعمیرات، بهینه‌سازی هزینه‌ها و ارتقای کیفیت شبکه معابر باشد. بنابراین، استفاده از تصمیم‌گیری مبتنی بر داده در مدیریت روسازی شهری می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد بلندمدت روسازی‌ها ایفا کند.

۵- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که خرابی زودهنگام روسازی آسفالتی در شهر کرج حاصل برهم‌کنش عوامل ترافیکی، ساختاری، محیطی و مدیریتی است. تحلیل‌های انجام‌شده با الگوریتم جنگل تصادفی نشان داد کیفیت مصالح، سهم وسایل نقلیه سنگین، حجم ترافیک روزانه و عمر آسفالت بیشترین نقش را در تخریب روسازی دارند؛ در حالی که عوامل محیطی مانند دما و بارش اثر کمتری داشته‌اند، اما در بلندمدت می‌توانند چرخه‌های فرسایش را تشدید کنند. بر این اساس، اتخاذ رویکردهای مهندسی پیشرفته و برنامه‌ریزی مبتنی بر داده می‌تواند به کاهش نرخ خرابی و افزایش دوام روسازی کمک کند. استفاده از مصالح باکیفیت، طراحی

سازه‌ای متناسب با بارگذاری واقعی، اجرای لایه‌های آسفالتی با ضخامت کافی، مدیریت ترافیک سنگین در محورهای حساس و تقویت برنامه‌های نگهداری پیشگیرانه از جمله اقدامات مؤثر هستند. همچنین بهره‌گیری از افزودنی‌های نوین مانند نانوسیلیس و پلیمرها، به‌کارگیری سامانه‌های هوشمند پایش ترافیک و شرایط اقلیمی، استانداردسازی فرایندهای اجرا و آموزش نیروهای اجرایی می‌تواند کیفیت عملیات روسازی را ارتقا دهد. در مجموع، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که استفاده از رویکردهای داده‌محور و مدل‌های یادگیری ماشین در مدیریت روسازی شهری، ابزاری قدرتمند برای شناسایی عوامل کلیدی خرابی و ارائه راهکارهای تصمیم‌محور است. اجرای هماهنگ اقدامات فنی، مدیریتی و نظارتی می‌تواند عمر مفید آسفالت را افزایش دهد، هزینه‌های نگهداری را کاهش دهد و کیفیت خدمات حمل‌ونقل شهری را در کرج و شهرهای مشابه ارتقا بخشد.

پیشنهادات

در مطالعات آتی، توصیه می‌شود از داده‌های طولی و پایش چندساله روسازی بهره گرفته شود تا روند واقعی فرسایش و اثرات تجمعی بارگذاری ترافیکی با دقت بیشتری مدل‌سازی گردد. همچنین استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر یادگیری ماشین مانند XGBoost، LightGBM و شبکه‌های عصبی می‌تواند توان پیش‌بینی و تفسیرپذیری تحلیل‌ها را ارتقا دهد. توسعه شاخص‌های کمی و دقیق‌تر خرابی نظیر PCI و IRI به‌جای طبقه‌بندی کیفی نیز به افزایش دقت مدل‌ها کمک خواهد کرد. بررسی اثر ریزساختار مصالح، کیفیت اجرای روسازی، تراکم، زهکشی و پارامترهای ژئوتکنیکی می‌تواند دید عمیق‌تری نسبت به عوامل مؤثر بر تخریب ارائه دهد. علاوه بر این، تحلیل چرخه عمر و ارزیابی اقتصادی گزینه‌های مختلف بهسازی مسیر تصمیم‌گیری مدیریتی را بهینه‌تر خواهد ساخت. مطالعات آینده همچنین می‌توانند از فناوری‌های نوین مانند سنسورهای هوشمند، پهپادها و پردازش تصویر برای پایش وضعیت روسازی استفاده کنند. مقایسه مدل‌های داده‌محور با روش‌های مکانیکی–تجربی نیز بینش جامع‌تری نسبت به رفتار واقعی روسازی فراهم می‌آورد. در نهایت، اجرای پژوهش‌های مشابه در شهرها و اقلیم‌های مختلف به تعمیم‌پذیری نتایج کمک کرده و زمینه توسعه مدل‌های منطقه‌ای یا ملی را فراهم خواهد ساخت.

محدودیت پژوهش

با وجود دستاوردهای ارزشمند این پژوهش در تحلیل عوامل مؤثر بر خرابی روسازی آسفالتی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، چند محدودیت قابل توجه وجود دارد که می‌تواند بر دقت و تعمیم‌پذیری نتایج اثرگذار باشد. نخست آن‌که داده‌های مورد استفاده ترکیبی از اطلاعات میدانی، آماری و گزارش‌های اجرایی بوده و کیفیت و یکپارچگی آن‌ها وابسته به دقت ثبت توسط نهادهای مسئول است؛ موضوعی که احتمال وجود مقادیر گمشده، خطای اندازه‌گیری یا پراکندگی ناهمگون را افزایش می‌دهد. دوم آن‌که محدوده تحقیق صرفاً به معابر منتخب شهر کرج محدود شده و شرایط هندسی، اقلیمی و ترافیکی این شهر ممکن است با سایر مناطق کشور متفاوت باشد؛ بنابراین تعمیم نتایج نیازمند مطالعات تکمیلی در حوزه‌های جغرافیایی دیگر است. سوم آن‌که داده‌های مورد استفاده تنها در یک بازه زمانی مشخص گردآوری شده‌اند، در حالی که خرابی روسازی پدیده‌ای تدریجی و وابسته به تغییرات بلندمدت شرایط ترافیکی و اقلیمی است. نبود داده‌های طولی دقت تحلیل روند فرسایش را محدود می‌کند. چهارم آن‌که مدل Random Forest با وجود دقت بالا، ماهیتی غیرخطی و پیچیده دارد و امکان تفسیر کامل روابط داخلی بین متغیرها را فراهم نمی‌سازد. هرچند این مدل قادر به تعیین اهمیت ویژگی‌ها است، اما روابط ریاضی شفاف برای پیش‌بینی قطعی ارائه نمی‌دهد. افزون بر این، برخی عوامل کلیدی مانند کیفیت اجرای آسفالت، نحوه تراکم، وضعیت زهکشی و ویژگی‌های ریزساختاری مصالح به دلیل نبود داده‌های قابل اتکا در مدل لحاظ نشده‌اند. در نهایت، طبقه‌بندی خرابی‌ها به سه سطح «کم»، «متوسط» و «زیاد» بخشی از پیچیدگی واقعی خرابی‌های روسازی را ساده‌سازی کرده است. استفاده از شاخص‌های کمی‌تر مانند PCI یا IRI در مطالعات آینده می‌تواند دقت مدل را افزایش دهد. در مجموع، رفع این محدودیت‌ها زمینه توسعه مدل‌های جامع‌تر و افزایش قابلیت پیش‌بینی و کاربردپذیری نتایج در مدیریت روسازی شهری را فراهم خواهد کرد.

۶- سپاسگزاری

این مقاله از دوره پسا دکتری دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره) با شماره قرارداد ۱/۲۷۱۰۰۵/د، استخراج گردده است.

۷- مراجع

-Aliha, M. R. M., & Sarbijan, M. J. (2016). Effects of loading, geometry and material properties on fracture parameters of a pavement containing top-down and bottom-up cracks. *Engineering Fracture Mechanics, 166*, 182–197.

-Aliha, M. R. M., Fazaeli, H., Aghajani, S., & Nejad, F. M. (2015). Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials, 95*, 545–555.

-Alsheyab, M. A., Khasawneh, M. A., Abualia, A., & Sawalha, A. (2024). A critical review of fatigue cracking in asphalt concrete pavement: A challenge to pavement durability. *Innovative Infrastructure Solutions, 9*(10), 386.

-Bhandari, S., Luo, X., & Wang, F. (2023). Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance. *International Journal of Transportation Science and Technology, 12*(1), 258–272.

-Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*(1), 5–32.

-Chatti, K., Salama, H., & El Mohtar, C. (2004). Effect of heavy trucks with large axle groups on asphalt pavement damage. In *Proc., 8th Int. Symp. on Heavy Vehicle Weights and Dimensions*.

-Dong, Q., & Huang, B. (2012). Evaluation of effectiveness and cost-effectiveness of asphalt pavement rehabilitations utilizing LTPP data. *Journal of Transportation Engineering, 138*(6), 681–689.

-Dong, Q., Jiang, X., Huang, B., & Richards, S. H. (2013). Analyzing influence factors of transverse cracking on LTPP resurfaced asphalt pavements through NB and ZINB models. *Journal of Transportation Engineering, 139*(9), 889–895.

-Ebrahimzadeh, M. A., Abdi Kordani, A., & Nakhaie, N. (2024). Optimizing Overload Reduction in Vehicles Using Moving Weighing System. *Journal of Transportation Research*, *21*(3), 221-238.

-Fathi, A., Mazari, M., Saghafi, M., Hosseini, A., & Kumar, S. (2019). Parametric study of pavement deterioration using machine learning algorithms. In *International Airfield and Highway Pavements Conference 2019* (pp. 31–41). ASCE.

-Fazaeli, H., Samin, Y., Pirnoun, A., & Dabiri, A. S. (2016). Laboratory and field evaluation of the warm fiber reinforced high performance asphalt mixtures (Case study Karaj–Chaloos Road). *Construction and Building Materials, 122*, 273–283.

-Feng, B., Wang, H., Li, S., Ji, K., Li, L., & Xiong, R. (2022). The durability of asphalt mixture with the action of salt erosion: A review. *Construction and Building Materials, 315*, 125749.

-Haider, S. W., & Chatti, K. (2009). Effect of design and site factors on fatigue cracking of new flexible pavements in the LTPP SPS-1 experiment. *International Journal of Pavement Engineering, 10*(2), 133–147.

-Hosseini, S. G., Kordani, A. A., & Zarei, M. (2023). Effect of recycled additives on mode I fracture resistance and moisture susceptibility of HMA. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 128*, 104168.

-Jiang, Q., Chen, M., Zhao, Y., Wu, S., Fan, Y., Gan, Z., & Zhang, Y. (2022). Comprehensive assessment of the durability deterioration of asphalt pavement in salt environment: A literature review. *Case Studies in Construction Materials, 17*, e01706.

-Llopis-Castelló, D., García-Segura, T., Montalbán-Domingo, L., Sanz-Benlloch, A., & Pellicer, E. (2020). Influence of pavement structure, traffic, and weather on urban flexible pavement deterioration. *Sustainability, 12*(22), 9717.

-Mehdinejad, S., Fazaeli, H., Moniri, A., & Dabiri, A. S. (2021). Comparison of stress intensity factor and fracture energy criteria under combined tensile–shear loading: A statistical approach. *Construction and Building Materials, 290*, 123230.

-Nian, T., Ge, J., Li, P., Guo, R., Li, J., & Wang, M. (2022). Improved three-dimensional discrete modeling method and anti-cracking properties of asphalt mixture. *Construction and Building Materials, 321*, 126405.

-Xiong, H., Han, J., Wang, J., Ren, Q., & Wu, L. (2022). Application of high viscosity–high modulus modified asphalt concrete in bus rapid transit station pavement: A case study in Chengdu, China. *Case Studies in Construction Materials, 17*, e01337.

-Zhang, M., Zhang, J., Lyu, L., Li, Y., Tan, X., Li, Z., & Pei, J. (2024). Durable and environmental asphalt pavement with plant fiber: A state-of-the-art review. *Journal of Materials in Civil Engineering, 36*(3), 03123003.

-Zhong, T., Zheng, Y., Chen, Z., Yao, L., Zhang, W., Zhu, Y., & Fu, L. (2024). Utilization of steel slag as coarse aggregate and filler in SMA mixture: Engineering performance, environmental impact and economic benefits. *Journal of Cleaner Production, 450*, 141891.

-Zhou, Z., Li, H., Liu, X., & He, W. (2020). Investigation of sea salt erosion effect on the asphalt–aggregate interfacial system. *International Journal of Pavement Research and Technology, 13*(2), 145–153.

Evaluation of Factors Affecting Asphalt Pavement Distress Using a Random Forest Model

Mohammad Amin Ebrahimzadeh, Department of Civil Engineering - Transportation Planning, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Ali Abdi Kordani, *Professor, Department of Civil Engineering - Transportation Planning, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.*

E-mail: aliabdi@eng.ikiu.ac.i

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

Asphalt pavement in urban streets plays a key role in improving safety, comfort, and the quality of transportation services. However, its frequent deterioration in densely populated cities-such as Karaj-results in considerable economic and social costs. This study aims to identify the factors influencing asphalt pavement deterioration and to propose solutions for enhancing its durability and performance. Relevant data on pavement age, traffic volume, the proportion of heavy vehicles, climatic conditions, material quality, and maintenance status were collected, and the level of distress was classified into three categories: low, moderate, and high. To analyze the data and predict the distress level, the Random Forest machine learning algorithm was employed. The results indicated that the model achieved an accuracy of approximately 96.7%, and the most influential factors affecting pavement deterioration were, respectively, material quality, the percentage of heavy vehicles, pavement age, and daily traffic volume, while climatic variables such as temperature and precipitation had less impact. The confusion matrix analysis also showed the model's strong ability to identify moderate and severe distress levels, with minor misclassification occurring mainly in predicting low distress. Based on the findings, rapid asphalt deterioration is attributed to a combination of traffic-related, construction-related, and maintenance-related factors. Recommended strategies include using higher-quality materials, increasing asphalt layer thickness, managing heavy-vehicle traffic, implementing preventive maintenance, and utilizing modern additives. These measures can extend pavement service life and reduce maintenance costs.

Keywords: Asphalt Pavement, Pavement Surface Distress, Random Forest Model, Data-Driven Analysis