

ارایه مدل عملکرد مبتنی بر شاخص وضعیت روسازی با استفاده از داده‌های عملکرد بلندمدت روسازی

مقاله علمی - پژوهشی

قاسم طهمورسی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران
محمد رضا فضل‌اللهی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران
حسن دیواندری*، گروه مهندسی عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: divandari@iauns.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

صفحه ۱-۱۴

چکیده

بهترین روش مدیریت کارآمد در حوزه زیرساخت‌های حمل و نقل، پیش بینی دقیق شرایط و عملکرد روسازی در آینده است. با کاهش دادن خطاها در تخمین خرابی روسازی، می‌توان با ارزیابی به‌موقع و برنامه‌ریزی دقیق، به میزان چشمگیری از نظر اقتصادی صرفه‌جویی کرد. هدف این مطالعه تحقیقاتی، ایجاد و توسعه روش محاسبه شاخص وضعیت روسازی (PCI) بر اساس داده‌های خرابی روسازی گردآوری شده در پایگاه داده برنامه عملکرد بلندمدت روسازی (LTTP) است. قالب‌های پیش‌ساخته نرم‌افزار اکسل جهت انتقال داده‌های خرابی از پایگاه داده‌ها و محاسبه مستقیم PCI ها برای واحدهای آزمایشی توسعه یافته استفاده شده است. منحنی اصلی عملکرد روسازی بر اساس PCI ها نیز به‌عنوان بخشی از این اقدام تحقیقاتی آنالیز و ارزیابی شده است. تحلیل نتایج داده‌های LTTP برای چند مطالعه موردی نشان داد که روش این تحقیق منطقی است و پارامترهای آماری نشان داد که دقت این مدل در سطح خوب تا عالی است. از مدل‌های PCI توسعه یافته فوق می‌توان در داده‌های ورودی *InfoPave*TM استفاده کرد، بدین‌صورت که استفاده کنندگان می‌توانند با نتایج این پژوهش PCI های مقاطع جاده‌ای موردنظرشان را محاسبه نمایند. همچنین، توسعه مدل عملکرد مبتنی بر PCI نیز می‌تواند در نسخه‌های آینده *InfoPave*TM اضافه گردد. با اینکه پژوهش حاضر مقاطع مربوط به روسازی آسفالتی را بررسی کرده است، ولی روش آن را می‌توان به قطعه‌راه‌های آزمایشی با روسازی بتنی نیز تعمیم داد. نتایج نشان داد که مدل توسعه داده شده ارتباط نزدیکی با مقادیر مشاهده شده دارد و از آن می‌توان برای پیش‌بینی عملکرد شبکه روسازی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: شاخص وضعیت روسازی (PCI)، داده LTTP، مدل عملکردی، خرابی روسازی

۱- مقدمه

ناهمواری بین‌المللی IRI^۱ و شاخص خدمت‌دهی کنونی PSI^۲ که در میان آن‌ها شاخص PCI تنها شاخصی است که یک ارزیابی عینی از وضعیت کلی روسازی فراهم می‌کند (افتخاری و ذاکر، ۱۳۹۷). این شاخص توسط گروه مهندسی ارتش ایالات

شاخص‌های متعددی در مدل پیش‌بینی عملکرد مناسب در روسازی‌های مختلف با استفاده از وضعیت روسازی، سن روسازی، ترافیک عبوری و نوع روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد از جمله شاخص وضعیت روسازی PCI^۱، شاخص

موجود را ارزیابی نموده و نقطه شروعی برای تولید روش‌های جدید طراحی و نیز مدل‌های پیش‌بینی وضعیت آینده روسازی هستند که در واقع هسته سیستم مدیریت روسازی و توسعه روش‌های طراحی مکانیستیک روسازی را شامل می‌شوند. هدف کلی برنامه LTPP دستیابی به رفتار یا عملکرد بلندمدت روسازی تحت شرایط مختلف بارگذاری و محیطی در یک دوره ۲۰ ساله است؛ اما با توجه به اینکه متأسفانه تاکنون مدیریت خوبی بر نگهداری و بهره‌برداری بهینه از روسازی‌ها صورت نگرفته است؛ جلوگیری از فرسایش و خرابی آن‌ها در صورتی امکان‌پذیر خواهد بود که برنامه‌ریزی اصولی و صحیح تدوین و اجرا گردد (Bekheet et al., 2005)

نظر به تلاش‌های انجام‌شده دولت‌ها جهت نگهداری روسازی، بهره‌برداری مطلوب از روسازی‌های ایجاد شده، حفظ و نگهداری آن‌ها امروزه از ضروریات اساسی هر کشور است. لذا با توجه به مسائل اقتصادی زمان آن فرا رسیده که دولت‌ها به حفظ روسازی‌ها از طریق تدوین برنامه راهبردی بپردازند. از طرفی حفظ روسازی‌ها مستلزم اعمال روش‌های صحیح در حوزه مدیریت روسازی است. اعمال این سامانه باعث هماهنگی طراحی، ساخت و نگهداری، انجام فعالیت‌های ارزیابی می‌گردد و افزایش کارایی روش‌ها موجب تخصیص بهینه بودجه در امر روسازی می‌شود (Haas, Hudson & Zanier, 1994).

لذا، با توجه به مفروضات فوق، مسئله اصلی در این تحقیق کاربرد روش محاسبه شاخص وضعیت روسازی PCI بر اساس داده‌های خرابی^۶ در برنامه عملکرد بلندمدت روسازی LTPP است که شامل مجموعه‌ای از اطلاعات از جمله وضعیت روسازی، ترافیک عبوری، نوع روسازی و تحلیل آن‌ها از حدود ۲۵۰۰ قطعه از روسازی‌های در حال بهره‌برداری در ایالات متحده آمریکا و کانادا است، که نتایج موردی جهت کاربرد در موارد مشابه ارایه گردیده است. هدف دیگر از این پژوهش استفاده از PCI در قالب یک روش مدل‌سازی عملکرد روسازی نوین می‌باشد. ضمناً هدف، توسعه قالب‌های آماده و برنامه‌ریزی‌شده از نرم‌افزار اکسل به منظور استفاده کردن از داده‌های خرابی انتقال یافته و محاسبه مستقیم PCI برای بخش‌های قطعه‌راه‌های آزمایشی می‌باشد. انتظار می‌رود این پژوهش و مدل ارایه‌شده مزایای زیر را در برداشته باشد: ۱- مقایسه مدل‌های شبکه‌های روسازی

متحدہ پیشنهاد شده و برای روسازی جاده‌ها، فرودگاه‌ها و محوطه‌های پارکینگ مقبولیت وسیعی به دست آورده و به عنوان یک روش استاندارد به وسیله بسیاری از سازمان‌ها در سرتاسر دنیا پذیرفته شده است (Ognjenovic et al., 2016). در سال ۲۰۲۱، Issa و همکاران به مدل‌سازی رابطه بین نوع و شدت خرابی و PCI از طریق مدل مستقیم براساس قابلیت‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداختند. مجموع ۳۴۸ مقطع جہتی از ۱۰ راه مختلف واقع در شهر نابلس فلسطین برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به خرابی و برآورد مقادیر PCI مربوطه با استفاده از روش ASTM 6433-07 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بین خرابی‌ها و PCI همبستگی پایینی وجود دارد، که در آن بالاترین همبستگی مطلق بین PCI و هر نوع و شدت خرابی از ۰/۳۸ تجاوز نمی‌کند. در صورتیکه مدل شبکه عصبی مصنوعی قادر به پیش‌بینی PCI با سطح اطمینان بالا، با مقدار ضریب همبستگی ۰/۹۹۷۱، ۰/۹۹۶۴ و ۰/۹۹۷۵ به ترتیب برای مجموعه داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش است. شیب رگرسیون بین PCI های مشاهده شده و پیش‌بینی شده بین Issa, Samaneh & Ghanim, ۹۹۷۴ است (2021).

PCI یک نشانه عددی است که مقدار آن از صفر برای یک روسازی غیرقابل استفاده تا ۱۰۰ برای یک روسازی کاملاً بی‌عیب و نقص تغییر می‌کند. محاسبه PCI بر اساس نتایج یک بررسی چشمی صورت می‌گیرد که در آن نوع، شدت و میزان خرابی مشخص می‌شود (Robinson, Danielson & Snaith, 1998).

اما به‌تازگی مدل‌های پیش‌بینی توسعه یافته در عملکرد مناسب روسازی عمدتاً محدود به داده‌های قابل دسترس می‌باشند که از پایگاه داده‌های مختلف از جمله برنامه عملکرد بلندمدت روسازی LTPP^۷ به دست می‌آید. برنامه LTPP برای جمع‌آوری داده عملکرد روسازی به عنوان یکی از حوزه‌های استراتژیک تحقیقاتی راه^۸ (SHRP) از اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی در آمریکای شمالی و به تدریج در سایر کشورها ارایه شد.

برنامه عملکرد بلندمدت روسازی در بازه زمانی مختلف شامل داده‌هایی همچون بار ترافیک، شرایط محیطی، مصالح مورد استفاده، نوع روسازی و راهبردهای مختلف تعمیر و نگهداری می‌باشد. داده‌های به‌دست‌آمده از LTPP روش‌های طراحی

شاخص PCI یک محاسبه عینی از نیازها و اولویت‌های نگهداری و تعمیر را فراهم می‌آورد. نظارت پیوسته بر PCI جهت تعیین میزان خرابی روسازی صورت می‌گیرد که امکان شناسایی اولیه نیازهای عمده مرمت را میسر می‌سازد همان‌گونه که در جدول (۱) نشان داده شده است. ضمناً شاخص PCI بازخوردی را درباره عملکرد روسازی برای اعتبارسنجی یا بهبود طراحی روسازی فعلی و رویه‌های نگهداری ارائه می‌کند. بنابراین، PCI یک شاخص عددی بین صفر و ۱۰۰ است که جهت نشان دادن وضعیت عمومی سطح مقطع روسازی به کار می‌رود که عدد ۱۰۰ بیانگر بهترین وضعیت احتمالی و صفر بیانگر بدترین وضعیت احتمالی است. این مقیاس درجه‌بندی PCI در شکل (۱) نشان داده شده است. یکی از روش‌های محاسبه و روال بررسی PCI برای روسازی‌های جاده‌ها و پارکینگ‌ها توسط ASTM استانداردسازی شده است (ASTM, 2007).

جدول ۱. استراتژی‌های تعمیر و نگهداری روسازی بر اساس

مقدار PCI (Shahin & Walter, 1990)

استراتژی	درجه‌بندی	PCI
نگهداری دوره‌ای	خوب	۸۵ - ۱۰۰
نگهداری بازدارنده	رضایت‌بخش	۷۰ - ۸۵
مرمت جزئی	متوسط	۵۵ - ۷۰
مرمت جزئی	ضعیف	۴۰ - ۵۵
مرمت کلی	خیلی ضعیف	۲۵ - ۴۰
بازسازی	شدیداً ضعیف	۱۰ - ۲۵
بازسازی	ناموفق	۰ - ۱۰

مختلف، ۲- عوامل مؤثر در تغییرات PCI، ۳- تعیین PCI به‌عنوان معیار عملکرد مهم در پایگاه داده LTPP و ۴- مدل‌سازی داده‌ها با استفاده از شرایط روسازی و ترسیم منحنی PCI. که با طرح این مسئله و تدوین روش‌های مناسب و تحلیل نتایج حاصل ضمن حفظ روسازی‌ها، یکی از چشم‌اندازها و سیاست‌های راهبردی در قسمت راه‌سازی محقق خواهد شد. در این پژوهش، تمرکز بر مدل‌سازی عملکردی مقاطع روسازی بتن آسفالتی^۶ (ACP) است. باین‌حال، روش استفاده شده را می‌توان برای مقاطع روسازی بتن سیمانی پورتلند نیز اعمال نموده و اجرا کرد.

۲- پیشینه تحقیق

شاخص PCI توسط گروه مهندسی آمریکا به‌عنوان یک شاخص مرکب برای ارزیابی روسازی از نظر کیفیت سازه‌ای عملکردی در دهه ۱۹۷۰ تهیه و پیشنهاد شده است و تاکنون چندین بار بازنگری و تکمیل شده است در سال ۱۹۹۴ انجمن ASTM روش PCI را به‌عنوان روش استاندارد ارزیابی برای سازه‌های آسفالتی معرفی کرده است (Beck & Van Sickle, 2010). در سال ۱۹۸۷ برنامه تحقیقات استراتژیک راه (SHRP) بزرگ‌ترین و جامع‌ترین آزمایش عملکرد روسازی به نام برنامه LTPP بنا نهاد در طی دوره ۲۰ ساله این برنامه داده‌هایی را در ایالات متحده آمریکا و ۱۵ کشور دیگر جهان اقدام به جمع‌آوری اطلاعات در مورد شرایط روسازی، آب‌وهوا، حجم ترافیک، بارگذاری و غیره در بیش از ۲۵۰۰ قطعه منتخب روسازی کردند که جمع‌آوری اطلاعات کماکان ادامه دارد (FHWA, 2009). شاخص وضعیت روسازی (PCI) که توسط واحد مهندسی ارتش ایالات متحده توسعه یافته است، یک شاخص وضعیت بسیار جامع است (Shahin, 2005). روش PCI بر اساس بررسی چشمی نوع گستره و شدت خرابی روسازی است (Beck & Van Sickle, 2010). شاخص PCI مقیاسی از وضعیت فعلی روسازی را بر اساس خرابی مشهود در سطح روسازی فراهم می‌کند که یکپارچگی ساختاری و وضعیت عملیاتی سطح (ناهمواری و ایمنی) را نیز نشان می‌دهد.

بر اساس ویژگی‌های متنوع روسازی است و شکل‌گیری یک شاخص ترکیبی بر اساس این ویژگی‌های سطحی و ساختاری است. در این مدل‌ها، معیار مورد استفاده جهت گزینش بهترین مشخصه از بین گزینه‌ها، اکتساب بهترین برازش محتمل برای داده‌ها است. این برازش توسط تحلیل رگرسیون (R^2 یا خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)) سنجیده می‌شود (Ognjenovic et al., 2016).

یک مدل مبتنی بر PCI برای سیستم PAVERTM با استفاده از رویکرد احتمال انتقال زنجیره مارکوف توسعه یافت تا عملکرد آینده را پیش‌بینی کند (Shahin & Walter, 1990). محدودیت اصلی مدل احتمالاتی PAVERTM این است که خطای پیش‌بینی را نمی‌توان با استفاده از رویکرد خودش ارزیابی کرد. آبازا یک منحنی عملکرد روسازی مبتنی بر PCI را توسعه داد و عملکرد چرخه عمر روسازی را به‌عنوان مساحت زیر منحنی ایجادشده از داده‌های خرابی روسازی واقعی تعریف کرد (Abaza, 2002).

به خاطر ماهیت فرآیند خرابی (زوال) روسازی، داده‌های حاصل از مقاطع روسازی در حال خدمت‌دهی واقعی مطلوب هستند که در معرض کنش‌های ترکیبی ترافیک بزرگراهی و شرایط محیطی قرار دارند (پروزی، ۲۰۰۱). با این حال، گردآوری داده‌ها از مقاطع روسازی در حال خدمت‌دهی واقعی، دشوار و پرهزینه هستند؛ برنامه‌هایی همانند تحقیقات عملکرد روسازی بلندمدت (LTPP) و پروژه جاده مینسوتا (Mn/ROAD) داده‌های بسیار سودمندی را برای تحلیل آینده درباره وضعیت و عملکرد فراهم کرده‌اند. برنامه عملکرد روسازی بلندمدت (LTPP) ایجاد گردید تا داده‌های عملکرد روسازی را به‌عنوان یکی از حوزه‌های اصلی تحقیقاتی برنامه تحقیقاتی بزرگراه‌های استراتژیک (SHRP) جمع‌آوری نماید (FHWA, 2015). امروزه، LTPP تبدیل به منبع اساسی داده‌های تحقیقات عملکرد روسازی گشته است. پارک و دیگران، با استفاده از داده‌های حاصل از LTPP، یک مدل رگرسیون خطی تغییر یافته را بین PCI و IRI توسعه داده‌اند (Park, Thomas & Lee, 2007).

داده‌های LTPP شامل اطلاعات و فهرست کلی بخش‌های آزمون، آزمایش مواد، تعمیر و نگهداری (M&R)، آب‌وهوا، ترافیک، افت‌وخیز (به‌عنوان مثال، افت‌وخیز سنج ضربه‌ای (FWD)، مقطع طولی (شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI)) و



شکل ۱. مقیاس درجه بندی PCI استاندارد توسط ASTM (ASTM, 2007)

معمولاً به یک بررسی کامل خرابی‌های روسازی نیاز است تا مجموعه‌ای از PCI ها برای روسازی مورد نظر به دست آید. به لحاظ درجه بندی عملکرد روسازی، شاخص PCI منحصر به فردترین شاخص بوده است. ضمناً این شاخص کاربرد وسیعی در مدیریت روسازی در سطح شبکه داشته است و به‌عنوان مبنایی برای سیستم مدیریت روسازی -PAVERTM- برگزیده شده است (Shahin & Walter, 1990).

مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی معادله‌ای است که "عامل زمانی" خارجی (عمر، یا تعداد موارد استعمال بار) را به ترکیبی از عوامل داخلی (واکنش‌های ساختاری، مشخصات مواد، زهکشی و غیره) یا شاخص‌های عملکرد مرتبط می‌سازد.

بسته به شمول خصوصیات و رویکرد متعاقب آن جهت توسعه تابع عملکرد، مدل‌ها را می‌توان در دو گروه طبقه بندی نمود:

مدل مکانیزمی - تجربی و مدل درجه بندی عملکرد روسازی (Karasahin & Terzi, 2016).

مدل‌هایی وجود دارند که با استفاده از مقادیر وزنی یا دلخواه معینی، عملکرد روسازی را تعریف می‌کنند که این مقادیر از یک دامنه معین هستند. شاخص‌های گوناگونی را محققان مختلف پیشنهاد کرده‌اند؛ مثلاً، PCI، PSI و PCR (درجه بندی وضعیت روسازی). همان‌گونه که قبلاً مطرح گردید، این شاخص‌ها

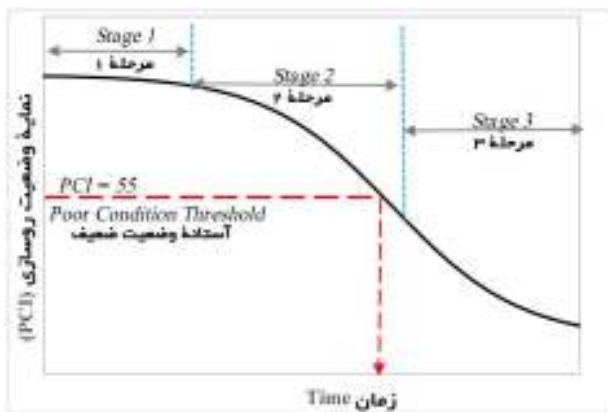
محیطی خراب می‌شود، که شامل سه مرحله (بدون مداخله جهت نگهداری یا مرمت) است (شکل ۲):

(۱) در مرحله ۱، روسازی‌های تازه ساخته شده و بازسازی شده مقاومت زیادی در برابر ترافیک و اثرات محیطی دارند. بنابراین، میزان خرابی نسبتاً کُندی در مرحله نخست مشاهده می‌شود.

(۲) در مرحله ۲، خرابی تسریع یافته ناشی از بارگذاری تجمعی حاصل از افزایش تعداد ترافیک، رفته‌رفته به خرابی‌های شدیدتر منجر می‌شود. کاهش در PCI طی این مرحله چشمگیرتر خواهد بود.

(۳) در مرحله ۳، در پایان عمر خدمت‌دهی روسازی معمولاً در وضعیت ضعیفی قرار دارد و در این مرحله، مقدار PCI به یک میزان حداقل نزدیک می‌شود یا در آن تثبیت می‌گردد.

هیچ قطعه‌راهی در پایگاه داده‌های LTTP یا در جهان واقعی، آن‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، داده‌های عملکرد کاملی ندارد. این بدین خاطر است که نوعی نگهداری وجود خواهد داشت که در زمان عمر خدمت‌دهی روسازی اعمال می‌شود. با این حال، اگر چنین داده‌های عملکردی وجود داشته باشد، یا بتوان آن‌ها را گردآوری نمود، همان‌گونه که در بخش بعدی نشان داده می‌شود، یک منحنی اصلی از عملکرد را می‌توان به لحاظ ریاضیاتی ساخت و با استفاده از یک تابع سیگموئیدی به بهترین شکل ممکن استخراج نمود.



شکل ۲. شماتیک مدل عملکرد روسازی مبتنی بر PCI

رویکرد اولیه‌ای که در این تحلیل استفاده شده است، جابجا کردن مقاطع داده‌های عملکرد PCI موجود برای قطعه‌راه‌ها در مقیاس زمانی بود تا بیانگر موقعیتشان روی منحنی نشان داده شده در شکل (۳) باشد. جابجایی بستگی به مقادیر ثبت شده PCI دارد،

خرابی‌های روسازی می‌شود. در حال حاضر، جمعاً ۲۵۰۹ بخش آزمون که در پایگاه داده‌ها گنجانده شده‌اند، در بیش از ۹۰۰ مکان عمدتاً در خصوص بزرگراه‌های در حال خدمت‌دهی در سرتاسر آمریکای شمالی وجود دارند. امروزه، LTTP تبدیل به منبع اساسی داده‌های تحقیقات عملکرد روسازی گشته است. پارک و دیگران، با استفاده از داده‌های حاصل از LTTP، یک مدل رگرسیون خطی تغییریافته را بین PCI و IRI توسعه داده‌اند (Park, Thomas & Lee, 2007). در پژوهشی دیگر، براساس داده‌های LTTP عملکرد نسبی گزینه‌های مختلف تعمیر و نگهداری (M&R) را بررسی کردند (Mohamed Jaafar, Uddin & Najjar, 2016).

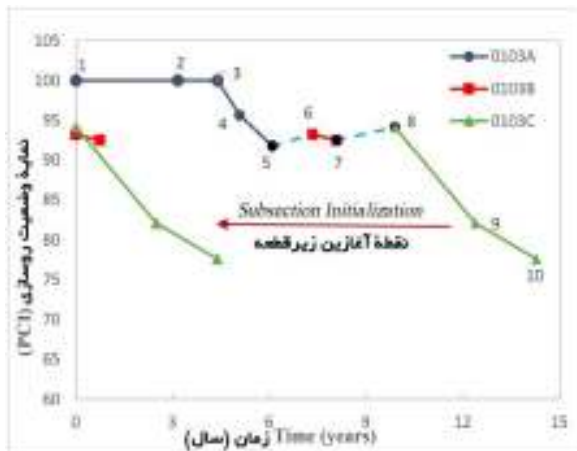
پایگاه داده‌های خرابی در برنامه LTTP متشکل از داده‌های خرابی منفرد از مقاطع روسازی‌های بتن آسفالتی (ACP)، بتن درزدار غیرمسلح^۹ (JPCP) و بتن مسلح پیوسته^{۱۰} (CRCP) است. در این پژوهش، مدل‌سازی عملکرد مقاطع روسازی بتن آسفالتی (ACP) انجام شده است. توسعه داده‌های اصلی این پژوهش به ۱۶۲۳ ورودی مقطع منجر گردید و مجموعه داده‌های هر ورودی، علاوه بر اطلاعات خرابی و تاریخ‌های بررسی، شامل فهرست و اطلاعات کلی (شماره استانی، شماره تحقیقات شارپ و پهنای قطعه مدنظر) است. قطعه آزمایشی به عرض ۳/۷ متر (۱۲ فوت) و طول ۱۵۲/۴ متر (۵۰۰ فوت) با مساحت ۵۸۳/۸ مترمربع (۶۰۰۰ فوت مربع) است. داده‌های خرابی شامل سطح، نوع و شدت خرابی می‌باشند. تقریباً تمام متغیرهای درون جداول که از پایگاه داده‌های LTTP استخراج می‌شوند، گویا و شفاف هستند.

۳- روش تحقیق

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی بر اساس تحلیل PCI ثبتی هستند. مدل توسعه داده شده معادله‌ای است که برای مجموعه‌ای از قطعه‌راه‌های دارای مشخصات مشابه (همانند سطح ترافیک، مشخصات هندسی، سازه روسازی، طبقه‌بندی جاده‌ای)، PCI را به زمان (عمر روسازی) ارتباط می‌دهد. به شکل مطلوب، یک روسازی دائماً در اثر ترکیبی از بارگذاری ترافیک و شرایط

مزیت دیگر استفاده از زیر قطعه، کاهش یا حذف خطاها طی مدت بررسی خرابی یا محاسبه PCI خواهد بود. از نظر مهندسی، بدون هیچ گونه فعالیت M&R، وضعیت مقطع روسازی باید به روند خراب شدن ادامه دهد (حداقل، برای مدتی به همان شکل باقی بماند) و کاهش یافتن PCI ادامه یابد.

بنابراین، هرگونه افزایش ناگهانی در PCI باید نادیده گرفته شود. استفاده از "زیر قطعه" می‌تواند این PCI های اشتباهی را حذف کند، یا حداقل وقوع آن‌ها را کاهش دهد. جهت خودکارسازی این فرآیند، یک قالب نرم‌افزار اکسل به نام "مقطع" ایجاد گردید. به طور کلی، استخراج زیرقطعه‌ها و حذف بخش‌های خطوط تیره بصورت تک مرحله‌ای مشکل است؛ بنابراین، الگوریتم‌های تلفیق یافته در این قالب دو مرحله اساسی را پوشش می‌دهد: مرحله ۱: نام‌گذاری ردیف آغازین زیر قطعه، مرحله ۲: مهیاکردن زیر قطعه‌ها برای مدل‌سازی.



شکل ۳. تشریح زیر مقاطع توسعه یافته برای مقطع ۰۱۰۳ LTPP در فلوریدا

۳-۲- جابجایی داده‌های PCI و منحنی اصلی عملکرد

شکل (۴) شماتیک سازه منحنی اصلی عملکرد را نشان می‌دهد. اساساً، کل فرآیند را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد: (۱) فرض می‌شود که منحنی اصلی توسط یک تابع سیگموئیدی، دارای پارامترهایی که باید محاسبه شوند، از لحاظ ریاضیاتی مدل‌سازی می‌گردد؛ (۲) عوامل جابجایی - $f(PCI)$ برای زیر قطعه‌ها (مثلاً، ۰۱۰۳A) متغیرهای وابسته هستند که جهت تطابق PCI های مشهود تبدیل شده از داده‌های خرابی استفاده می‌شوند؛

همان‌گونه که بعداً توضیح داده خواهد شد. رابطه بین PCI و زمان از لحاظ ریاضیاتی توسط معادلات ۱ و ۲ ارایه می‌شود:

$$PCI = a + \frac{b}{1 + \exp(c \cdot T + d)} \quad (1)$$

$$T = t + f(PCI) \quad (2)$$

که در آن، t : مدت زمان از آخرین فعالیت تعمیر و نگهداری اساسی یا اولین تاریخ بهره‌برداری، $f(PCI)$: عامل جابجایی برای هر PCI معین که توسط برنامه‌ریزی غیرخطی مشخص می‌شود، T : زمان کاهش یافته (اساساً زمان تنظیم شده در عمر سرویس‌دهی موردنظر)، a, b, c, d : پارامترهایی که بیانگر شکل منحنی اصلی هستند. استفاده از شکل تابع سیگموئیدی در معادله ۲ بدین مضمون است که PCI هنگامی که زمان کاهش یافته (T) بیشتر می‌شود، کاهش می‌یابد.

۳-۱- تحلیل زیر قطعه‌راه‌ها

اجرای تحلیل داده‌های ثبتی PCI در تقابل با زمان قبل از مدل‌سازی، ضروری است. شکل (۳) یک خروجی نمونه از محاسبه PCI بر اساس مقاطع LTPP در فلوریدا را نشان می‌دهد. خطوط تیره (از نقطه ۵ تا نقطه ۶ در شکل (۳)) به خاطر افزایش یافتن PCI، یک فرآیند تعمیر و نگهداری احتمالی را برای قطعه ۰۱۰۳ نشان می‌دهد. باین‌حال، زیر قطعه‌های ۰۱۰۳A، ۰۱۳۰B و ۰۱۳۰C کاندیداهای خوبی برای بهره‌برداری بیشتر هستند. هنگامی که M&R برای یک مقطع شناسایی می‌شود، یک گزینه این است که بسته به تکرار M&R، در صورت وجود، تاریخچه عملکرد قطعه آزمایش را به زیر قطعه‌ها تقسیم کرد. این زیر قطعه‌ها اکنون هیچ‌گونه فعالیت M&R ندارند که در روسازی اعمال گردد. در این فرآیند، مجموعه داده‌های جدید زیر قطعه‌ها، پس از تقسیم و گروه‌بندی مجدد داده‌های مقاطع روسازی، ایجاد خواهند شد. با انجام این کار، یک مقطع آزمایشی روسازی پس از آنکه یک اقدام نگهداری اساسی اعمال شود، به‌عنوان یک "قسمت جدید" یا "زیر قطعه" محسوب می‌شود. به لحاظ نظری و آنچه انتظار می‌رود، کاهش پیاپی PCI یا دوام آن، به خاطر اثرات تجمعی ترافیک و عوامل محیطی، باید در هر زیر قطعه در طول سالیان تحت نظر قرار گیرد.

مسئله بهینه‌سازی به یک تابع هدف غیرخطی با محدودیت‌های خطی منجر می‌شود، این موضوع به‌طور مفصل‌تری در ادامه تشریح می‌شود.

۳-۳-۱- زمان کاهش یافته، PCI پیش‌بینی شده و خطا

همان‌گونه که قبلاً در معادله ۴ اشاره گردید، زمان کاهش یافته برای ورودی‌ها در زیرقطعه i را می‌توان به شرح زیر محاسبه نمود:

$$T_k^i = t_k^i + fPCI^i \quad (۳)$$

PCI های پیش‌بینی شده را می‌توان توسط معادله توانی محاسبه کرد:

$$pPCI_k^i = a + \frac{b}{\exp(c \cdot T_k^i + d)} \quad (۴)$$

به منظور محاسبه تفاضل بین PCI های پیش‌بینی شده و PCI های مشاهده شده، از یک معادله درجه دوم استفاده می‌شود:

$$Er_k^i = (mPCI_k^i - pPCI_k^i)^2 \quad (۵)$$

۳-۳-۲- تابع هدف

تابع هدف برای این است که خطای کلی (E) PCI های پیش‌بینی شده را در مقایسه با PCI های مشاهده شده از طریق تغییر دادن عوامل جابجایی و پارامترهای تابع سیگموئیدی به حداقل برساند (معادله ۶).

$$\min E = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K Er_k^i \quad (۶)$$

۳-۳-۳- محدودیت‌ها

تمامی عوامل جابجایی باید طبق معادله (۷) نامنفی باشند. حداکثر عامل جابجایی از قبل تعیین شده ($fPCI_{max}$) نیز، بسته به ویژگی‌های مقاطع روسازی درون هر شبکه، بین ۱۵ و ۲۵ متغیر است.

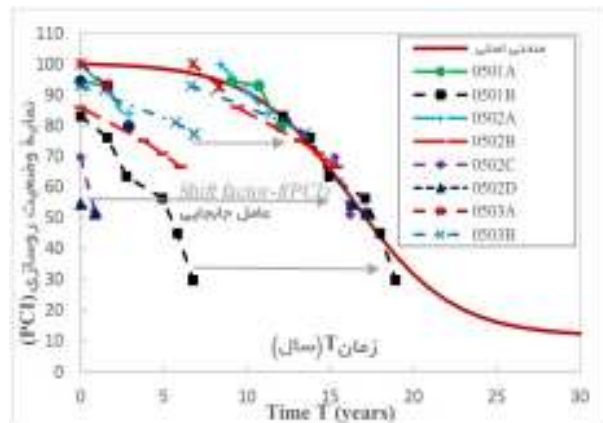
$$a + \frac{b}{\exp(d)} = 100 \quad (۷)$$

$$0 \leq fPCI^i \leq fPCI_{max} \quad \forall i \quad (۸)$$

در روابط (۳) تا (۸) پارامترها به شکل زیر می‌باشند:

i : شاخص زیر قطعه‌ها، K : شاخص مدخل داده‌ها، a, b, c, d : پارامترهای تابع سیگموئیدی، $mPCI_k^i$: PCI را در نقطه داده k ام از زیرقطعه i اندازه‌گیری می‌کند، t_k^i : ورودی‌های زمانی زیرقطعه

از نظر گرافیکی، پلات‌های زیر قطعه‌ها به منحنی‌های اصلی جابجا می‌شوند؛ (۳) یک روش تقریبی برای منحنی اصلی به کار گرفته می‌شود تا به بهترین نحو (به لحاظ آماری) بیانگر داده‌های ثبتی عملکرد روسازی باشد. دقت مدل عملکرد به خطای تقریب سازی بستگی دارد. خطای تقریب می‌تواند در صورت وجود عوامل جابجایی و یا تابع سیگموئیدی خلاف انتظار، بزرگ‌تر باشد. در این پژوهش، یک مسئله بهینه‌سازی شکل می‌گیرد تا خطای تقریب را از طریق تغییر دادن پارامترها و عوامل جابجایی، به حداقل برساند.



شکل ۴. تشریح جابجایی PCI و سازه منحنی اصلی

۳-۳-۳- مدل برنامه‌ریزی غیرخطی

مسئله بهینه‌سازی برای مدل‌سازی عملکرد روسازی عبارت است از: ۱- PCI های اندازه‌گیری شده (ثبت شده) که بر اساس داده‌های خرابی‌ها و زمان بررسی مربوطه برای زیر قطعه‌ها، $mPCI_k^i$ و t_k^i محاسبه می‌شوند و ۲- مقادیر حداقل و حداکثر PCI. هدف مدل برنامه‌ریزی غیرخطی پیشنهادی، به حداقل رساندن خطای کلی بین PCI های پیش‌بینی شده و PCI های مشاهده شده از طریق مشخص کردن عوامل جابجایی زیر قطعه‌ها و پارامترهای تابع سیگموئیدی است. با اینکه PCI های مشاهده شده برای هر زیر قطعه مقدار قطعی است (ورودی)، پس خطای کلی اساساً توسط مقدار PCI پیش‌بینی شده از روی تابع سیگموئیدی به دست می‌آید. همچنین فرض می‌شود که $pPCI_k^i$ مساوی با ۱۰۰ است هنگامی که زمان T_k^i مساوی با صفر است. این فرضیه برای این است که مطمئن شویم منحنی اصلی دارای PCI آغازین مساوی با ۱۰۰ است. توسعه مدل ریاضیاتی برای

(FWD)، مقطع طولی (شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI)) و خرابی‌های روسازی می‌شود. در حال حاضر، جمعاً ۲۵۰۹ قطعه راه آزمایشی در بیش از ۹۰۰ مکان (عمدتاً در خصوص بزرگراه‌های در حال خدمت‌دهی) در سرتاسر آمریکای شمالی، در پایگاه داده‌ها گنجانده شده‌اند. پایگاه داده‌های خرابی در برنامه LTPP متشکل از داده‌های خرابی منفرد از مقاطع روسازی‌های بتن آسفالتی (ACP)، بتن درزدار غیرمسلح (JPCP) و بتن مسلح پیوسته (CRCP) است. در این پژوهش، مدل‌سازی عملکرد مقاطع روسازی بتن آسفالتی (ACP) مورد توجه قرار گرفته است. خرابی‌های متداول برای روسازی‌های بتن آسفالتی در LTPP لحاظ گردیده است. اندازه‌گیری این خرابی‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. خرابی‌های روسازی بتن آسفالتی در LTPP

نوع اندازه‌گیری (واحد)		
تعداد وقوع	مساحت (مترمربع یا فوت مربع)	طول (متر یا فوت)
۱- چاله‌ها	۱- ترک خستگی	۱- ترک طولی
	۲- ترک بلوکی	۲- ترک عرضی
	۳- شیارشدگی	۳- ترک لبه‌ای
	۴- لکه‌گیری	
	۵- رو زدن قیر	
	۷- شن زدگی	
	۸- صیقلی شدن	
	دانه‌ها	

توسعه پایگاه داده اصلی این پژوهش به ۱۶۲۳ ورودی قطعه‌راه منجر گردید و مجموعه داده‌های هر ورودی، علاوه بر اطلاعات خرابی و تاریخ‌های بررسی، شامل فهرست و اطلاعات کلی بود.

$t_1^i = 0$ ، PCI_{min} : حداقل PCI از قبل تعیین شده که مقدار آن صفر است، PCI_{max} : حداکثر PCI از قبل تعیین شده که مقدار آن ۱۰۰ است، $pPCI_k^i$: پیش‌بینی شده یا محاسبه شده در ورودی داده k ام زیرقطعه i ، $fPCI^i$: عامل جابجایی زیرقطعه i ، T_k^i : ورودی‌های زمان کاهش یافته زیرقطعه i ، ET_k^i : خطای بین PCI پیش‌بینی شده و PCI مشاهده شده.

مدل فرمول‌بندی شده فوق‌الذکر به یک برنامه‌ریزی غیرخطی با یک تابع هدف درجه دوم و محدودیت‌های خطی منجر می‌شود. الگوریتم غیرخطی گرادیان کاهشی تعمیم یافته^{۱۱} (GRG) در حل‌کننده نرم‌افزار اکسل جهت یافتن جواب مسئله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. کاربرگی به نام "منحنی M" جهت اجرای مدل بهینه‌سازی توسعه یافت. با این حال، به خاطر محدودیت حل‌کننده اکسل، تم توسعه یافته می‌تواند با مجموع ۱۰۰ متغیر در هر مرتبه سروکار داشته باشد، یعنی، ۴ پارامتر (تابع منحنی اصلی) و ۹۶ عامل جابجایی متناظر با ۹۶ زیر قطعه.

۳-۴- اندازه‌گیری خطای پیش‌بینی مدل عملکرد

تم اکسل R^2 منحنی اصلی عملکرد را نیز با استفاده از تحلیل خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) اندازه‌گیری کرد. معادلات مورد استفاده برای تعیین RMSE در زیر نشان داده شده است،

$$R^2 = \sqrt{1 - \left(\frac{n-p}{n-1}\right) \left(\frac{S_e}{S_y}\right)^2} \quad (9)$$

$$S_e = \sqrt{E/(n-p)}, S_y = STDEV(mPCI) \quad (10)$$

که در آن، n : تعداد کل نقاط داده‌ها؛ p : تعداد "زیر قطعه‌ها"؛ E : حداقل مجموع خطا؛ $mPCI$: PCI اندازه‌گیری شده (مستقیماً از روی داده‌های خرابی محاسبه می‌شود)؛ $STDEV()$: انحراف معیار است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- پایگاه داده عملکرد بلندمدت روسازی (LTPP)

داده‌های LTPP شامل فهرست و اطلاعات کلی قطعه راه‌های آزمایشی، آزمایش مصالح، تعمیر و نگهداری (M&R)، شرایط جوی، ترافیک، افت‌وخیز (به‌عنوان مثال، افت‌وخیز سنج ضربه‌ای

نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، هنگامی که اقدام M&R (روکش AC) برای مقطع ۰۵۰۷ انجام شده است، افزایش قابل ملاحظه‌ای در PCI همراه با کاهش در مقدار ترک خطی (ترک طولی و عرضی) اتفاق افتاده است. اساساً، بسته به اقدامات تعمیر و نگهداری (M&R)، در صورت وجود، منحنی PCI را می توان به چندین مرحله تقسیم کرد. یک مرحله از آن، ممکن است افزایش ناچیز بر خلاف انتظار باشد، که به عنوان خطا در نظر گرفته می شود. اصولاً، الگوریتم توسعه یافته برای پیش بینی PCI، هیچ گونه افزایشی در مقدار PCI را با گذشت عمر روسازی در نظر نمی گیرد و این قسمت از منحنی PCI باید از تحلیل حذف شود. خوشبختانه، موارد اندکی وجود دارند که در این طبقه بندی (حذف از تحلیل) قرار می گیرند. سایر مراحل نشان دهنده کاهش مورد انتظار در مقادیر PCI است و از این رو، این قسمت ها از منحنی PCI جهت پیش بینی روند آینده در عملکرد روسازی مقطع ۰۵۰۷ مورد استفاده قرار می گیرند.

جدول ۴. تاریخچه تعمیر و نگهداری

مقطع ۰۵۰۷ LTPP در مینسوتا

تاریخ تکمیل فعالیت	فعالیت M&R
۱۹۹۰/۰۹/۱۵	روکش AC
۱۹۹۱/۰۶/۱۵	روکش AC
۱۹۹۹/۰۶/۰۱	روکش AC
۲۰۰۱/۰۸/۰۱	روکش AC
۲۰۰۴/۰۹/۰۱	روکش AC
۲۰۰۱/۰۸/۰۱	لکه گیری
۱۹۹۱/۰۶/۱۵	پر کردن ترکها

۴-۲- محاسبه PCI با استفاده از داده های LTPP

جدول (۳) مثالی از نتیجه محاسبه PCI یک قطعه راه LTPP را نشان می دهد. داده های خرابی روسازی مربوط به اندازه گیری وضعیت روسازی در تاریخ ۱۸ اوت سال ۲۰۰۱ می باشد. بر اساس جدول داده های خرابی، می توان مشاهده کرد که روسازی قطعه، علاوه بر سایر خرابی ها، شدیداً ترک خورده است. یافتن PCI این قطعه منطقی به نظر می رسد، که مساوی با ۱۸/۵ است و بیانگر وضعیت خیلی ضعیف است.

جدول ۳. خروجی های محاسبه PCI مقطع ۰۵۰۷ LTPP

در مینسوتا (FHWA, 2015)

نوع خرابی	لکه گیری (H*) (مترمربع)	ترک L&T* (L*, متر)	ترک L&T* (H*, متر)
کمیت خرابی	۴/۲	۲/۹	۳۵۶/۲
DV ها	۸/۳	۰	۷۹/۵
ماکزیمم CDV	۸۱/۵		
PCI	۱۸/۵		

H* و L: خرابی با شدت زیاد، کم؛ L&T*: ترک طولی و عرضی.

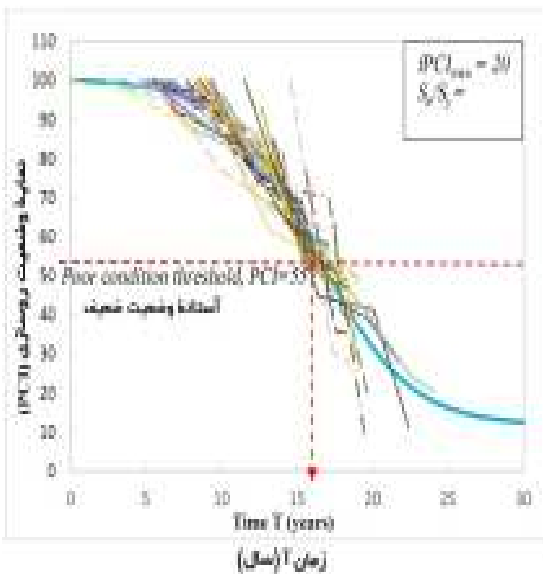
تاریخچه تعمیر و نگهداری (M&R) در جدول (۴) نشان داده می شود، داده ها از مجموعه داده های ثبتی M&R از پایگاه داده های LTPP استخراج گردیده است. طبق این جدول، جمعاً پنج روکش بتن آسفالتی (AC) انجام شده است تا این مقطع خاص از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۴ تعمیر و محافظت گردد، سایر نگهداری های دوره ای شامل لکه گیری و پر کردن ترکها می شود. شکل (۵) داده های ثبتی PCI مقطع ۰۵۰۷ را نشان می دهد. این شکل روند کلی خرابی وضعیت روسازی را برای این مقطع طی سال های ۱۹۹۰ الی ۲۰۰۵ در قالب PCI نشان می دهد. اطلاعات تعمیر و نگهداری، همراه با داده های ترک خوردگی طولی و عرضی با شدت زیاد به منظور بررسی داده های PCI، در شکل ۵

وضعیت روسازی را با زمان (زمان کاهش یافته) مرتبط می‌سازد، به شرح زیر است:

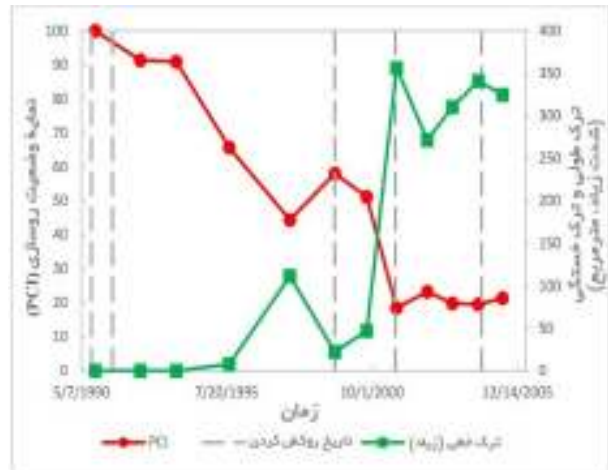
$$PCI = 11.52 + \frac{88.86}{1 + \exp(0.337T - 5.45)} \quad (11)$$

شکل (۶) شماتیک منحنی اصلی عملکرد روسازی و زیر قطعه‌ها را نشان می‌دهد. در این خصوص، مقدار PCI مساوی با ۵۵، طبق استانداردهای ASTM، یک وضعیت آستانه ضعیف لحاظ می‌شود. کاربردی از مدل عملکرد توسعه یافته برای مینسوتا، متوسط عمر روسازی در سطح شبکه خواهد بود. برای یک قسمت روسازی خاص در این شبکه روسازی مینسوتا و داده‌های خرابی مفروض، مابقی عمر آن را می‌توان بر مبنای منحنی اصلی پیش‌بینی کرد. همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، طول عمر پیش‌بینی شده روسازی، قبل از آن‌که تعمیر و نگهداری اساسی نیاز داشته باشد، ۱۶/۴ سال است.

به منظور صحت‌سنجی دقت مدل، مقایسه‌ای از PCI پیش‌بینی شده با PCI مشاهده شده برای هر ورودی داده‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. این رابطه خطی با دقت بسیار خوب ($R^2=0.9926$) برای منحنی اصلی عملکرد متناسب است. واضح است که مدل توسعه یافته را می‌توان جهت پیش‌بینی عملکرد شبکه روسازی استانی و ایالتی مورد استفاده قرار داد.



شکل ۶. منحنی اصلی عملکرد روسازی برای شبکه روسازی مینسوتا



شکل ۷. PCI ثبتي و بررسی داده‌های مقطع LTTP ۰۵۰۷ در مینسوتا

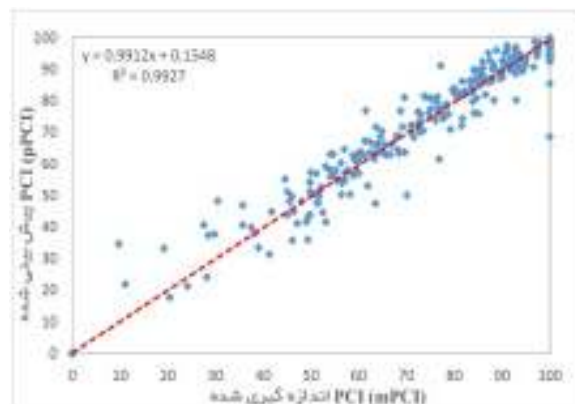
۳-۴- مدل‌سازی عملکرد برای شبکه‌های روسازی

این بخش کاربرد مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی را برای داده‌های به دست آمده از پایگاه داده‌های LTTP توضیح می‌دهد. دقت مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی در سطح شبکه به تناسب مقاطع آزمایش گنجانده شده بستگی دارد؛ یعنی، یک مدل ایده‌عال برای شبکه روسازی برای قطعه‌راه‌های دارای ترافیک و شرایط محیطی مشابه توسعه خواهد یافت و ویژگی‌های ساختاری مشترک را به اشتراک می‌گذارد؛ بنابراین، با مفروض بودن داده‌های ثبت شده کافی، مدل‌ها برای شبکه‌های کوچک‌تر عموماً دقیق‌تر از شبکه‌های بزرگ‌تر هستند.

۳-۴-۱- توسعه مدل برای شبکه ایالتی

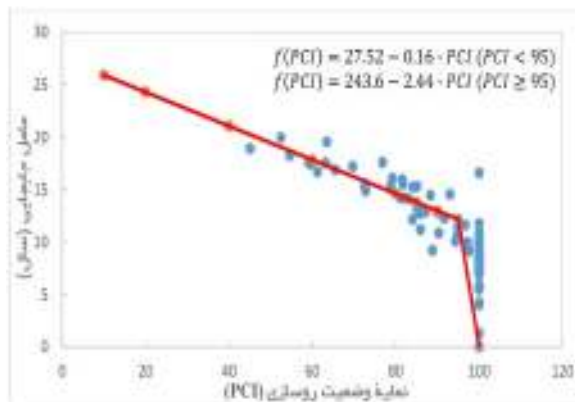
در این پژوهش، ابتدا شبکه روسازی مینسوتا، که حاوی ۵۴ قطعه روسازی (۸۳ زیرقطعه) است، مورد استفاده قرار گرفت. ایالت مینسوتا در یک ناحیه اقلیمی سرد و مرطوب واقع شده است و تمام آزمایشات ارزیابی مقاطع در جاده‌های بین ایالتی یا شاهراه‌های این ایالت اجرا گشته است. داده‌های ترافیک که در پایگاه داده‌های LTTP گردآوری شده است، نشان می‌دهد که طبق داده‌های تخمینی سال‌های ۱۹۹۹ الی ۲۰۰۵، ۴۲ مقطع با ترافیک کامیون متوسط (روزانه کمتر از ۵۰۰۰) وجود دارد؛ بنابراین، شبکه روسازی مینسوتا متشکل از مقاطع آزمون تقریباً متجانس با توجه به ترافیک و شرایط اقلیمی است. مدل توسعه یافته که

محاسبه مستقیم PCIها برای مقاطع مختلف، آزمون LTPP و Mn/ROAD با موفقیت مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، PCIها در یک رویکرد منحصربه‌فرد مدل‌سازی عملکرد، استفاده گردید. یک منحنی اصلی PCI با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی غیرخطی به لحاظ ریاضیاتی مدل‌سازی شد تا به یک تابع سیگموئیدی با پارامترهای تعیین‌شده برای هر گروه از قطعه راه‌های دارای ویژگی‌های مشترک منجر شود. این مدل نشان می‌دهد که چگونه می‌توان داده‌های تاریخی PCI را جهت دست‌یابی به منحنی‌های اصلی عملکرد روستازی، تحلیل نمود. تحلیل نتایج داده‌های LTPP برای چندین ایالت نشان داد که رویکرد تحقیقات منطقی است. پایگاه داده‌های LTPP (InfoPave™) و احتمالاً پایگاه داده‌های Mn/Road، می‌تواند از تم‌های توسعه‌یافته در این پژوهش منتفع شوند و شاید آن‌ها را جهت بارگیری (دانلود) یا محاسبه PCIهای خاص برای قطعه‌راه‌های خاص موردنظر در اختیار کاربران قرار دهند. علاوه بر این، توسعه مدل عملکرد مبتنی بر PCI را می‌توان در نسخه‌های آتی InfoPave™ تلفیق نمود. توصیه می‌گردد که دستاوردهای این پژوهش مورد ارزیابی بیشتری قرار گرفته و برای قطعه‌راه‌های بیشتری از پایگاه‌های داده‌های دیگر پیاده‌سازی شود. همچنین، سازمان‌های استانی و شهرستانی جهت استفاده به کار بستن روال‌های تحلیل و رویکرد مدل‌سازی برای داده‌های خاص خرابی راه ترغیب شوند تا دستاوردهای این پژوهش راستی آزمایی شود.



شکل ۷. مقایسه PCI پیش‌بینی شده با PCI اندازه‌گیری شده

عامل جابجایی هر زیرمقطعی با شرط اولیه (اولین داده‌های موجود) مقطع روستازی مرتبط است. معمولاً، زیرمقطعی که از یک مقطع بدون نقص وضعیت روستازی (PCI=100) استخراج می‌شود، ذاتاً دارای فاکتور جابجایی "صفر" است. رابطه بین عامل جابجایی و PCI اولیه برای زیرمقطع‌های مینسوتا در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸. عوامل جابجایی به‌عنوان تابعی از PCI

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Pavement Condition Index
2. International Roughness Index
3. Present Serviceability Index
4. Long Term Pavement Performance
5. Strategic Highway Research Program
6. Distress
7. Asphalt Cement Pavement
8. Maintenance & Rehabilitation
9. Jointed Plain Concrete Pavement
10. Continuously Reinforced Concrete Pavement
11. Generalized Reduced Gradient

۵- نتیجه‌گیری

هدف این تحقیقات، توسعه یک شاخص وضعیت روستازی (PCI) براساس داده‌های خرابی روستازی LTPP می‌باشد. به منظور نیل به هدف، از شاخص PCI به‌عنوان شاخص عملکرد و از استاندارد ASTM D6433-07 به منظور محاسبات و ضرایب کاهندگی استفاده شد. سپس تم‌های برنامه‌ریزی‌شده نرم‌افزار اِکسل توسعه داده شد و جهت انتقال داده‌های خرابی و

۷- مراجع

-Karasahin, M., Terzi, S., (2016), "Performance model for asphalt concrete pavement based on the fuzzy logic approach", *Transport*, Vol. 29.

-Mohamed Jaafar, Z.F., Uddin, W. and Najjar, Y., (2016), "Asphalt Pavement Roughness Modeling Using the Artificial Neural Network and Linear Regression Approaches for LTPP Southern U.S. States", *Proceedings of 95th Annual Meeting of TRB*, Washington, D.C.

-Ognjenovic, A., Ishkov, D., Cvetkovic, D., Peric, C., Romanovich, M., (2016), "Analyses of Costs and Benefits in the Pavement Management Systems", *Procedia Engineering*, Vol. 165, pp. 954-959.

-Park, K., Thomas, N., Wayne Lee, K.W., (2007), "Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition", *Journal of Transportation Engineering*, 133(12), pp.706-709.

-Robinson, R., Danielson, U. and Snaith, M., (1998), "Road maintenance management", Macmillan Pub., UK.

-Shahin, M.Y., (2005), "Pavement Management for Airports Roads and Parking Lots", New York: Springer Science and Business Media.

-Shahin, M.Y., Walter, J.A., (1990), "Pavement Maintenance for Roads and Streets Using the PAVER System: Final Report", *Construction Engineering Research Laboratory*, Champaign, IL, USA.

-افتخاری، ح.ر.، ذاکر، ا.، (۱۳۹۷)، "بررسی علل کاهش عمر رویه‌های آسفالتی با انتخاب روش‌های نگهداری پیشگیرانه به کمک روش AHP در استان گلستان"، فصلنامه علمی جاده، دوره ۲۶، شماره ۹۵.

-Abaza, Kh., (2002), "Optimum Flexible Pavement Life-Cycle Analysis Model", *Journal of Transportation Engineering*, 128(6).

-Beck, H., Van Sickle, E., (2010), "Final Report, Current Practices in Pavement Performance Modeling, PROJ ECT 08-C07", Pennsylvania Department of Transportation, Report No. FHWA-PA-2010-007-080307.

-Bekheet, W., Helali, K., Halim, A. and Springer, J., (2005), "A Comprehensive Approach for the Development of Performance Models for Network-level PMS Using LTPP Data", *Proceedings of 84th Annual Meeting of TRB*, Washington, D.C.

-Issa, A., Samaneh, H., Ghanim, M., (2021), "Predicting pavement condition index using artificial neural networks approach", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 13, Issue 1, January 2022, 101490.

-FHWA, (2009), "Long-Term Pavement Performance Information Management System: Pavement Performance Database User Reference Guide", Publication No. FHWA-RD-03-088, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

-Haas, R., Hudson, W.R. and Zaniewski, J.P., (1994), "Modern Pavement Management", Krieger, Malabar, Fla, USA.

Presenting a Pavement Performance Model Based on Pavement Condition Index Using Long-Term Pavement Performance Data

*Ghasem Tahmoursi, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering,
Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.*

*Mohammad Reza Fazlollahi, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering,
Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.*

*Hassan Divandari, Department of Civil Engineering, Nowshahr Branch,
Islamic Azad University, Nowshahr, Iran.*

E-mail: divandari@iauns.ac.ir

Received: September 2022- Accepted: January 2023

ABSTRACT

The best method of efficient management in the field of transport infrastructure is to accurately predict the conditions and performance of pavement in the future. By reducing errors in estimating pavement failure, significant economic savings can be made by timely assessment and careful planning. The purpose of this research study is to develop a method for calculating the pavement status index (PCI) based on pavement failure data collected in the long-term pavement performance plan (LTPP) database. Prefabricated Excel software templates are used to transfer faulty data from databases and directly calculate PCIs for developed test units. The main pavement performance curve based on PCIs has also been analyzed and evaluated as part of this research. Analysis of LTPP data results for several case studies showed that the method of this research is reasonable and statistical parameters showed that the accuracy of this model is good to excellent. The above developed PCI models can be used in Info Pave TM input data, so that users can calculate the PCIs of their desired road sections with the results of this research. PCI-based performance model development can also be added in future versions of Info Pave TM. Although the present study has examined the sections related to asphalt pavement, but its method can be generalized to experimental sections with concrete pavement. The results showed that the developed model is closely related to the observed values and is suitable for the main performance curve, and it can be used to predict the performance of the pavement network.

Keywords: Pavement Condition Index (PCI), LTPP Data, Performance Model, Pavement Distress