

ارزیابی تکنیک مارکوفی با حالت وضعیت ۲۰ قسمتی در سیستم مدیریت روسازی

محسن ابوطالبی اصفهانی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

راضیه مؤمنی، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل،

دانشگاه اصفهان

Email: m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸

چکیده

تکنیک مارکوفی با فاصله گسسته موسوم به حالت وضعیت و تقسیم PCI به ۱۰ حالت با عرض هر حالت به مقدار ۱۰ واحد، احتمال ماندن روسازی در یک حالت معین و یا زوال آن تا حالت بعدی پس از یک چرخه را ارائه می‌کند. در این روش، می‌توان تعداد حالات در نظر گرفته شده را تغییر داده و آن را بر این اساس بسط داد. ممکن است بتوان با افزایش تعداد حالات، برآورد صحیح‌تری از روند زوال و نوع اقدامات لازم در موعد زمانی مناسب در جهت افزایش نگهداری از راه‌ها و حفظ سرمایه‌ها ارائه داد. بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی تقسیم‌بندی PCI به ۲۰ حالت با عرض ۵ واحد، برای برآورد روند اضمحلال روسازی، می‌باشد. علاوه بر این، تقسیم‌بندی ۵ واحدی با طبقه‌بندی کیفی ارائه شده تطابق دقیق‌تری دارد. بدین منظور، ابتدا ماتریس احتمال انتقال متناظر با دو دسته‌بندی تشکیل و سپس با یک بردار حالت و از یک خانواده، مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی براساس روند مارکوفی همگن برای دو دسته‌بندی ۱۰ تایی و ۵ تایی PCI، براساس داده‌های معتبر بیست ساله یک روسازی که می‌تواند برای شرایط یکسان قابل تعمیم باشد، توسعه داده شد. نتایج نشان داد که در منحنی پیش‌بینی به دست آمده از دو نوع تقسیم‌بندی، هیچ نقطه بحرانی خاصی مشاهده نشد. اما با در نظر گرفتن یک شیب مشخص برای شروع افزایش شدت خرابی‌ها، تقسیم‌بندی ۵ واحدی، ۴ سال زودتر از تقسیم‌بندی ۱۰ واحدی شروع روش‌های پیشگیرانه را پیشنهاد می‌کند. همچنین، پیش‌بینی PCI در سال دهم از این دو منحنی، نشان‌دهنده احتمال ۰/۳۲ و ۰/۰۸ برای به ترتیب روش ۱۰ و ۵ واحدی است که اختلاف آنها قابل توجه است. همچنین، در روش ۵ واحدی، با گذشت زمان، شیب منحنی بیشتر شده که با روند زوال روسازی تطابق بهتری دارد. ولی در روش ۱۰ واحدی، شیب در طول زوال تقریباً یکنواخت است.

واژه‌های کلیدی: اضمحلال روسازی، شاخص وضعیت روسازی، نگهداری پیشگیرانه، پیش‌بینی عملکرد روسازی، نقطه بحرانی

۱. مقدمه

بهبودسازی استفاده از راه‌ها و تسهیلات مربوطه و منابع نگهداری آن‌ها افزایش یابد. این رویکرد در روسازی با عنوان سیستم مدیریت روسازی^۱ (PMS) شناخته می‌شود (زادا و همکاران، ۱۹۸۶؛ توکلی و همکاران، ۱۹۹۲). در

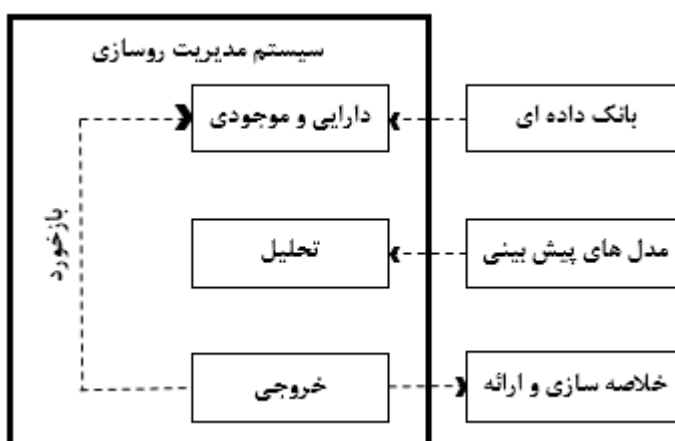
رشد تقاضا برای نگهداری و بهسازی راه‌ها از یک سو و کاهش و محدودیت منابع از سوی دیگر، سبب گردیده تا توجه به توسعه یک رویکرد مدیریتی رسمی به‌منظور

۱- Pavement Management System (PMS)

و بازخورد (شکل ۱). بخش تحلیل روی بانک داده‌ها، تحلیل نیازهای مالی را در دو سطح شبکه^۱ و پروژه^۲ انجام می‌دهد. نتایج تحلیل‌ها در قالب خروجی سیستم است که شامل اولویت‌های کلی تعمیر و نگهداری^۳ و جزئیات عملیات اجرایی است. بازنگری و ارزیابی، در حقیقت مرحله‌ای است که عملیات تعمیر و نگهداری اجرا شده و نتایج این عملیات و بخش‌های بهبودیافته را در بانک داده‌ها گنجانده و به‌روزرسانی می‌کند.

واقع، PMS یک فرایند سیستماتیک است که تجزیه و تحلیل و خلاصه‌بندی اطلاعات روسازی برای استفاده در انتخاب و اجرای استراتژی‌های مقرون به صرفه در تعمیر و نگهداری شبکه روسازی را فراهم می‌کند. هدف اصلی از مدیریت روسازی، نگهداری روسازی در وضعیت خوب برای طولانی‌ترین زمان و با کمترین هزینه ممکن می‌باشد (شاهین، ۲۰۰۵). یک سیستم مدیریت روسازی کارآمد، در حالت کلی از چهار بخش تشکیل می‌شود: بخش دارایی و موجودی، بخش تحلیلی، بخش خروجی

شکل ۱. ساختار PMS (بانگ و همکاران، ۲۰۰۵)



طرف دیگر، برهم‌کنش بین پارامترها نیز نامشخص است. بنابراین، زوال روسازی می‌تواند پدیده‌ای کاملاً تصادفی و احتمالاتی باشد. مدل‌های قطعی، مدل‌های احتمالاتی و روش‌های محاسباتی نرم، سه دسته اصلی مدل‌های پیش-بینی عملکرد روسازی هستند. هر یک از این مدل‌ها نقاط قوت و ضعف مخصوص به خود را دارند که متأثر از اهداف مدیریتی و وسعت بانک داده‌ای مورد استفاده هستند. تفاوت عمده بین این رویکردهای مدل‌سازی روسازی، تفاوت در مفاهیم توسعه مدل، فرایند مدل-سازی یا فرمول‌بندی، و فرمت خروجی مدل می‌باشد (امین، ۲۰۱۵). روند مارکوف یک رویکرد زمان گسسته‌ی تصادفی است که زنجیره مارکوف نامیده می‌شود و از آن در مدل‌های زوال استفاده می‌شود. در مدل‌های حالت

پیاده‌سازی موفق سیستم‌های مدیریت روسازی به میزان قابل توجهی به دقت پیش‌بینی شرایط آینده روسازی که توسط مدل‌های پیش‌بینی عملکرد سیستم (مدل‌های زوال روسازی) انجام می‌گیرد و تطابق با رفتار واقعی مشاهده شده و نیز دانش مهندسی بستگی دارد. از این ابزار برای پیش‌بینی عملکرد آینده روسازی براساس وضع موجود، عوامل ایجاد اضمحلال^۴ روسازی و تأثیر تکنیک‌های مختلف تعمیر و نگهداری جهت حفظ سطح عملکرد و وضع سازه‌ای استفاده می‌شود. روند زوال روسازی به‌طورکلی متأثر از پنج پارامتر سازه روسازی، بارگذاری ترافیکی، آب‌وهوا، تاریخچه اصلاح و کیفیت ساخت است (هاس، ۲۰۰۳). بسیاری از این پارامترها به صورت تصادفی تغییر می‌کنند و قابل پیش‌بینی نیستند. از

۳- Maintenance and Rehabilitation (M&R)

۴- Deterioration

۱- Network Level

۲- Network Level

صورت تأثیر قابل توجه این تقسیم‌بندی، می‌توان با استفاده از آن و انجام اقدامات خاص در موعد زمانی مناسب با نگهداری صحیح‌تر، اولویت‌دهی و انتخاب روش ترمیم خاص و یا به طور خلاصه توسعه و بهینه‌سازی استراتژی‌های مختلف مدیریت روسازی، موجب افزایش عمر بهره‌برداری راه‌ها و حفظ سرمایه‌ها شد. علاوه بر این، در دسته‌بندی کیفی ارائه شده توسط مراجع براساس PCI که به ۱۰۰ قسمت تقسیم شده است، تقسیم‌بندی با مضرب ۵ با این طبقه‌بندی تطابق بهتری دارد. در این راستا، پرسش‌های پژوهش عبارتند از: تقسیم‌بندی PCI به بازه‌های ریزتر در تطابق بیشتر مدل‌های زوال با مشاهدات انجام شده چه تأثیری دارد؟ آیا این تقسیم‌بندی در نواحی بحرانی می‌تواند با پیش‌بینی بهتر باعث حفظ بیشتر روسازی و جلوگیری از افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری شود؟

۲. پیشینه پژوهش

در هر سیستم مدیریت نگهداری روسازی، سیستم رتبه‌بندی روسازی^۳ که شامل محاسبه یک امتیاز عددی و یا شاخص مبتنی بر خرابی‌ها و ارزیابی سطحی است، مرسوم است. از جمله آن‌ها، شاخص وضعیت روسازی بوده که بر اساس شرایط فعلی روسازی و برحسب یکپارچگی سازه‌ای^۴ و شرایط عملکردی سطحی^۵ محاسبه می‌شود. این شاخص با استفاده از داده‌های خرابی که شامل انواع خرابی^۶، سطوح شدت^۷ و تراکم^۸ آن‌ها است به دست می‌آید و مقداری بین صفر تا ۱۰۰ است. صفر برای بدترین شرایط ممکن و ۱۰۰ برای بهترین حالت ممکن است. علاوه بر این، طبقه‌بندی کیفی مطابق با این شاخص به شرح شکل ۲ است (شاهین، ۲۰۰۵).

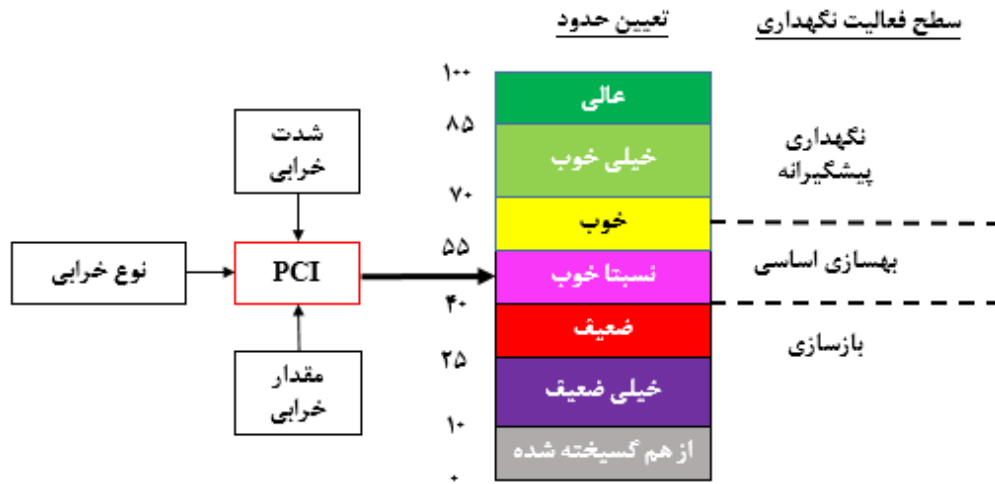
گسسته، معیار ارزیابی حالت مورد نظر در چند حالت دسته‌بندی می‌شود که احتمال بودن در هر حالتی در آینده فقط به حالت فعلی وابسته بوده و از حالت‌های قبلی مستقل می‌باشد. در این تکنیک، از ۱۰ حالت گسسته ۱۰ واحدی برای شاخص وضعیت روسازی (PCI)^۱ ۱۰۰ واحدی استفاده شده است (راس، ۲۰۱۴). در هر حالت گسسته، معادله مدل‌ها می‌تواند با الگوی حوزه‌بندی کاملاً متمایز باشد. از این رو، دقت بسیار بیشتر خواهد شد. ممکن است بتوان با افزایش تعداد حالات گسسته در روش مارکوف به مدل‌های زوال بهتری دست یافت. در این صورت، زمان نگهداری پیشگیرانه، فرایشتگیرانه و شروع زوال روسازی با شدت زیاد، بهتر پیش‌بینی خواهد شد. لذا، مسئله پژوهش حاضر، بررسی تأثیر افزایش تعداد حالات گسسته تکنیک مارکوفی بر مدل زوال روسازی است.

در صورت پیش‌بینی دقیق‌تر شروع زوال روسازی با شیب تند و اجرای عملیات پیشگیرانه، می‌توان از ورود به ناحیه زوال سریع جلوگیری و به مقدار قابل توجهی در هزینه‌های تعمیر و نگهداری صرفه‌جویی کرد. اهمیت پژوهش در این خصوص از اینجا مشخص می‌شود که نتایج برنامه تحقیق استراتژیک بزرگراه‌ها^۲ نشان می‌دهد که برای مسیر واجد شرایط، عملکرد رویه در ۷۵٪ از عمر آن ۴۰٪ کاهش می‌یابد. این مرحله، فاز نگهداری پیشگیرانه نامیده می‌شود که اگر به موقع نگهداری نشود، عملکرد آن یک‌بار دیگر در ۱۲٪ دوره بعد، ۴۰٪ افت خواهد کرد و هزینه‌های نگهداری آن ۳ تا ۱۰ برابر افزایش می‌یابد (سو و همکاران، ۲۰۱۴).

بنابراین، هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر دسته‌بندی ۲۰ تایی (بازه‌های ۵ تایی) به جای دسته‌بندی ۱۰ تایی (بازه‌های ۱۰ تایی) بر روند زوال روسازی است. در

۶- Distress types
۷- Severity levels
۸- Density

1- Pavement Condition Index (PCI)
2- Strategic Highways Research Program (SHRP)
۳- Pavement rating system
۴- Structural integrity
۵- Surface operational condition



شکل ۲. فلوجارت تعیین PCI و تصمیم‌گیری در مورد سطح فعالیت نگهداری (شاهین، ۲۰۰۵)

از مشاهدات منظم در دست نباشد، یک گروه از کارشناسان خبره روسازی براساس تجربه و نظر کارشناسی این مقادیر را تعیین می‌کنند که در این صورت احتمالات به دست آمده مقادیری ثابت و مستقل از روند زوال روسازی هستند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۵). باتوجه به انتزاعی بودن این روش و عدم نظرگرفتن عوامل اختصاصی مؤثر بر روند زوال هر روسازی، غالباً پیش-بینی‌های انجام شده به این روش مقبولیت زیادی در سیستم‌های مدیریت روسازی ندارند. از این رو، رایج-ترین روش برای تعیین TPMها، مبتنی بر داده‌های تاریخی است. طبق رابطه (۱)، از داده‌های تاریخی موجود، احتمال این که قسمتی از جاده از حالت i به j حرکت کند قابل محاسبه است (یانگ و همکاران، ۲۰۰۵):

$$p_{ii} = \frac{N_{ii}}{N_i} \quad (1)$$

که p_{ii} احتمالی که جاده در همان حالت i باقی می‌ماند، N_{ii} طول کل قطعه‌ای که در حالت i باقی مانده است و N_i طول قطعاتی است که پیش از اقدامات نگهداری در دوره مشاهده شده در حالت i قرار داشته‌اند.

در سیستم مدیریت روسازی که برای پیش‌بینی عملکرد یا زوال از روش مارکوفی استفاده می‌شود، پیش-بینی زوال روسازی از یک حالت به حالت دیگر به وسیله اعداد احتمالاتی صورت می‌گیرد که استخراج این اعداد برای تمامی حالت‌ها منجر به تشکیل یک ماتریس $n \times n$ می‌شود. این ماتریس احتمالاتی انتقال^۱ است که در آن n تعداد حالت‌ها است. درایه‌های ماتریس انتقالی اعداد ثابت احتمالاتی هستند که نیاز است برای هر شبکه از راه‌ها استخراج شوند. اگر برای پیش‌بینی کل روند زوال روسازی از یک ماتریس انتقال احتمالاتی استفاده شود، به آن روش مارکوف همگن گفته می‌شود. پژوهشگران باتوجه به این محدودیت (همگنی)، در روش مارکوف همگن با تعریف چند ناحیه زمانی و با استفاده از ماتریس‌های مختلف برای این بازه‌های زمانی (دوره)، این محدودیت را تقریباً از بین برده‌اند، که به این روش، روش مارکوف ناهمگن گفته می‌شود (یانگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ شاهین، ۲۰۰۵).

یکی از چالش‌های مهم پیش روی مدل‌های احتمالی، دشواری به دست آوردن ماتریس‌های انتقال آن می‌باشد. در مواقعی که بانک داده‌ای غنی برداشت شده

۱- Transition Probability Matrix (TPM)

وضعیت روسازی بدون اعمال عملیات تعمیر و نگهداری امکان پذیر نخواهد بود. بنابراین، در یک مدل صرفاً نزولی، بدون در نظر گرفتن عملیات تعمیر و نگهداری، و با توجه به تعریف درایه‌های ماتریس انتقال، مشخص است که فقط درایه‌های بالامثلثی ماتریس، اعداد غیر صفر به خود می‌گیرند. به عبارتی، سیستم می‌تواند فقط از حالت i به j انتقال یابد که $i \leq j$ است. علاوه بر این، احتمال نزول از یک حالت به دو حالت پایین‌تر یا بیشتر در طول یک دوره کار (که معمولاً یک سال است) بسیار بعید است. بنابراین، ماتریس انتقال احتمالاتی به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$TPM = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{(n-1)(n-1)} & P_{(n-1)(n)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

برای پیش‌بینی وضعیت آینده، یک بردار اولیه باید برقرار شود. این بردار اولیه احتمال یا توزیع قطعه روسازی را در شرایط خاص یا حالت‌های خاص نشان می‌دهد. بنابراین، در یک زنجیره‌ی مارکوفی n حالتی، توزیع درصدی هر حالت نسبت به کل شبکه را می‌توان با یک مقدار احتمالاتی به نام بردار حالت، به صورت بردار کلی زیر نشان داد (لی و همکاران، ۱۹۹۶):

$$P(t) = [p_1^t, p_2^t, \dots, p_n^t], \sum p_i^t = 1 \quad (4)$$

که در آن p_i^t نسبتی از کل شبکه است که در زمان t در حالت i قرار دارد.

عملکرد شبکه روسازی در آینده (سال t ام) با رابطه (۵) پیش‌بینی می‌شود:

$$p_t = p_0 P^t \quad (5)$$

که p_t توزیع وضعیت روسازی در سال پیش‌بینی t .

رابطه (۲)، با فرض این که $p_{ii} \geq 0$ ، احتمالی که جاده به حالت بعدی افت کند را نشان می‌دهد:

$$p_{ij} = 1 - p_{ii} \quad (2)$$

در ابتدا، بات و همکاران (۱۹۸۷) ماتریس انتقال را توسط مقادیر احتمال یک قطعه در حفظ وضعیت فعلی خود در طول یک چرخه و رفتن به یک وضعیت پایین‌تر که براساس به حداقل رساندن مجموع مربعات خطا^۱ از خرابی‌های روسازی در طول n انتقال بود، ساختند. با این حال، کاربرد این رویکرد برای تخمین احتمالات انتقال مارکوف بسیار پیچیده بود. زیرا به حداقل رساندن این فرایند شامل تعداد زیادی از متغیرها (یعنی احتمالات انتقال) بود. نتایج نشان داد که این مدل، مقادیر PCI را بسیار نزدیک به مقادیر واقعی پیش‌بینی کرده که مدل آن با استفاده از ترکیبی از زنجیره مارکوف توسعه یافته است. شکل کلی ماتریس احتمالاتی انتقال به صورت زیر است که در آن p_{ij} احتمال زوال روسازی از حالت i به j در طول یک دوره کاری است (بات و همکاران، ۱۹۸۷):

$$TPM = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \dots & \dots & P_{nn} \end{pmatrix} \begin{cases} 0 \leq P_{ij} \leq 1 & i, j = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 & i, j = 1, \dots, n \end{cases}$$

احتمال انتقال p_{ij} نشان‌دهنده احتمال این است که قطعه‌ای از روسازی از حالت i به حالت j در طول یک چرخه، برای مثال یک دوره کاری یک ساله از زوال، حرکت نماید.

$$P_{ij} = P(X_{t+1} = j | X_t = i) = P(X_1 = j | X_0 = i) \quad (3)$$

علاوه بر این، مجموع درایه‌ها در هر سطر ماتریس، احتمالات گذار P ، باید برابر با یک باشد و تمام مقادیر باید مثبت باشند.

احتمال انتقال p_{ij} از داده‌های تاریخی ساخته شده است. برای ساختن مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی، p_{ij} با فرمول (۱) محاسبه می‌شود. در یک شبکه راه، بهبود

1-Sum of Squared Errors (SSE)

از یک حالت به حالت دیگر منتقل می‌شوند، ارائه شد. همچنین، برای پیش‌بینی زوال روسازی معادله چپمن-کلموگروف مورد استفاده قرار گرفت.

مدنت و همکاران (۱۹۹۵) یک مدل پروبیت ترتیبی را برای استخراج احتمالات انتقال از داده‌های طبقه‌بندی روسازی براساس حالت‌ها ارائه نمودند. مدل مذکور زوال روسازی را به عنوان یک متغیر وابسته و روند زوال را وابسته به چند متغیر توصیفی و نیز یک متغیر تصادفی برای در نظر گرفتن خصوصیت نهفته روسازی، در نظر گرفتند. نهایتاً یک مدل زوال تجمعی با استفاده از مدل پروبیت ترتیبی برای محاسبه ماتریس احتمالات انتقال وابسته به زمان ارائه گردید. در این روش، داده‌ها برای اولین بار به گروه‌هایی که رفتار با ویژگی‌های مشابه دارند، تقسیم می‌شوند. یک مدل رگرسیون خطی برای هر گروه و نرخ وضعیت به عنوان متغیر وابسته و سن به عنوان متغیر مستقل، تنظیم شد. سپس، یک ماتریس انتقال برای هر گروه با اندازه‌گیری حداقل فاصله بین مقدار مورد انتظار و نرخ وضعیت به دست آمده از زنجیره مارکوف، برآورد شد.

لی و همکاران (۱۹۹۶) در مورد توسعه برنامه احتمالاتی مارکوف غیرهمگن برای مدل‌سازی زوال روسازی بحث کردند. یک مدل احتمالاتی ناهمگن برحسب وضعیت‌ها، مراحل و توالی ماتریس‌های انتقال، تعریف می‌شود. ماتریس‌های انتقال براساس شماره ESALها که رویه می‌تواند قبل از زوال به حالت بعدی مقاومت کند و تعداد واقعی ESALهایی که از ترافیک موجود و نرخ رشد برآورد شده ترافیک، محاسبه می‌شوند؛ بودند. سپس این ماتریس‌های انتقال با استفاده از رویکرد احتمالی خلفی بیزی با مجموعه‌ای از داده‌های واقعی عملکرد روسازی، به روز شدند.

P_0 توزیع وضعیت روسازی در سال صفر (وضعیت اولیه) و P^t ماتریس احتمالاتی انتقالی که به توان t رسیده است. لیتون و کاستلو فرضیه فرایند مدل مارکوف را به شرح زیر بیان کردند (لیتون، ۱۹۸۷؛ لی و همکاران، ۱۹۹۶) که در این پژوهش نیز صدق می‌کنند:

۱. تعداد محدودی حالت وجود دارد که طیف وسیعی از شاخص‌های خرابی و سرویس‌دهی را توصیف می‌کند. فرایند تصادفی باید یک فضای حالت شمارش‌پذیر یا محدود باشد. تعداد حالات باتوجه به تعریف وضعیت باید قابل شمارش باشد.

۲. احتمال انتقال از یک حالت به یک حالت دیگر فقط به وضعیت کنونی بستگی دارد و فرایند مارکوف، احتمالات حالت وضعیت روسازی را قبل و بعد از انتقال توصیف می‌کند.

۳. روند انتقال ثابت است. احتمال انتقال از یک حالت به دیگری مستقل از زمان است. با این حال، این فرض به طور کلی برای شرایط روسازی درست نیست، زیرا روسازی متأثر از شرایط آب‌وهوایی و بارگذاری سنگین می‌باشد.

۴. فرایند تصادفی باید در زمان گسسته باشد. به این معنا که فاصله زمانی برای ساختن TPM باید در یک واحد قابل اندازه‌گیری باشد. در مورد مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی، زمان معمولاً توسط سال‌ها اندازه‌گیری می‌شود.

وانگ و همکاران (۱۹۹۴) TPMهای مارکوف را برای سازمان حمل و نقل آریزونا با استفاده از تعداد زیادی از اطلاعات مشاهده شده از عملکرد بزرگراهی با چندین وضعیت اولیه مختلف به کار بردند. در این مطالعه، زوال عملکرد روسازی در مقابل سن به عنوان یک مارکوف همگن با یک TPM ثابت در طول دوره برنامه-ریزی مدل‌سازی شد و درایه‌های ماتریس احتمالات که

کاران (۱۹۹۷) توابع زوال روسازی را از طریق مدل-سازی فرایند مارکوف برای نگهداری رویه در شبکه جاده‌ای منطقه‌ای واترپلو، اُنتاریو، بررسی کرد. لی و همکاران (۱۹۹۷) نیز مدل اصلاح شده هزینه‌های تحلیل روسازی‌های انتاریو را که یک مدل قطعی برای طراحی روسازی انعطاف‌پذیر در اوایل دهه ۱۹۷۰ بود، اصلاح کردند. آن‌ها از ماتریس انتقال ناهمگن مارکوف برای پیش‌بینی وضعیت عملکرد روسازی در یک سال، همراه با تکنیک بیزی برای بهبود نتایج پیش‌بینی، استفاده کردند. داده‌های مورد نیاز برای ساخت ماتریس شامل وضعیت حالت روسازی پس از ساخت‌وساز و یا بهسازی، حجم اولیه ترافیک سالانه، تعداد خطوط، خیز بستر، یا مدول برجهنگی و عدد سازه روسازی، بودند. در این تحقیق، از مدل احتمالاتی تبدیل یافته یک‌سری ماتریس‌های انتقال غیرهمگن که با استفاده از مدل‌سازی مونت کارلو به دست آمده بودند، استفاده شد.

دملو سیلوا و همکاران (۲۰۰۰) مقایسه‌ای بین دو مدل رشد لجستیک قطعی و ماتریس‌های انتقال مارکوف انجام دادند. مدل‌ها در چهار بخش با سطوح مختلف زوال در ایالت میشیگان ایالات متحده آمریکا، مورد استفاده قرار گرفت. در پایان، نتیجه‌گیری شد که هر دو مدل پیش‌بینی نرخ‌های زوال مشابه دارند. اما در مدل قطعی، دوره پیش‌بینی، عملکرد کمتری از مدل ماتریس انتقال مارکوف دارد.

آبازا (۲۰۰۴) یک رویکرد قطعی را برای برآورد احتمالات انتقال همگن براساس دوره زمانی سپری شده در حالات متفاوتی از وضعیت ارائه داد که از منحنی عملکرد ایجاد شده با استفاده از مدل پیش‌بینی عملکرد آشتو حاصل شده بود.

در تحقیقی که توسط اورتیز گارسیا و همکاران (۲۰۰۶) انجام شد، سه مسئله بهینه‌سازی غیرخطی برای

استخراج درایه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بررسی هیستوگرام‌های مربوط به توزیع وضعیت روسازی نشان دادند که روش سوم که با تابع هدف کمینه کردن اختلاف بین توزیع حالت‌های واقعی به دست آمده از داده‌های ثبت شده با حالت‌های پیش‌بینی شده انجام شده، بهترین مدل برای استخراج درایه‌های ماتریس است. هرچند منحنی زوال به دست آمده برازش مناسبی با داده‌های واقعی ندارد.

در تحقیق کوبایاشی و همکاران (۲۰۱۰) برای استخراج درایه‌های ماتریس انتقالی پس از رتبه‌بندی حالت‌های روسازی، روند زوال به صورت مدل خطر بررسی شد. در این تحقیق، درایه‌های ماتریس انتقالی به صورت مدل خطر نمایی مدل‌سازی و استخراج شدند. مدل پیشنهادی آن‌ها به‌خوبی توانست درایه‌ها را تعیین کند. همچنین، پژوهشگران کاربرد این روش را در سیستم مدیریت کره جنوبی بررسی کرده و کارایی آن را نشان دادند.

کوبایاشی و همکاران (۲۰۱۲) یک روش برآورد بیزی برای بهبود پیش‌بینی زوال سیستم‌های زیربنایی با مدل زنجیره مارکوف که در آن ارزیابی روند زوال مبتنی بر تصمیم‌گیری‌های تجربی مدیران در مراحل اولیه است، ارائه داده‌اند.

سورندراکومار و همکاران (۲۰۱۳) روند مارکوف را برای توسعه یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای مدیریت نگهداری مورد استفاده قرار دادند. در این مطالعه، یک توزیع پواسون برای توسعه ماتریس‌های احتمالات انتقال مورد استفاده قرار گرفت.

حسن و همکاران (۲۰۱۷) زنجیره‌های مارکوف را برای پیش‌بینی نرخ خرابی‌های سطحی برای جاده‌های آسفالتی با استفاده از ۵ نوع خرابی (ترک‌خوردگی، آسیب بافت سطحی، جدایی دانه‌ها از سطح، وصله و

استفاده شده است.

۳-۲. بررسی PCI توصیفی مسیر

با توجه به اینکه در داخل کشور بانک داده مناسب وجود ندارد، در این پژوهش از پایگاه داده‌ای در آمریکا استفاده شده است (FHWA، ۲۰۰۸). داده‌های انتخاب شده مربوط به یک مسیر اصلی بزرگراهی به شماره ۳۶ و به طول ۱۵۳ کیلومتر که شمالی-جنوبی بوده و در غرب ایالت نیویورک واقع شده است، می‌باشد. انتهای شمالی این مسیر به بزرگراه ۳۱ در اوگدن و انتهای جنوبی آن به تروپسبورگ در ایالت پنسیلوانیا ختم می‌شود. مسیر فوق دارای یک لایه آسفالت رویه، لایه آستر، اساس و زیراساس است. داده‌های موجود برای شاخص وضعیت روسازی در این پایگاه داده‌ای با توجه به نوع بارگذاری، شرایط آب‌وهوایی و نیز نوع کاربری جاده‌ها و سایر عوامل مؤثر بر نوع خانواده، در خانواده‌هایی تقسیم‌بندی شده‌اند. بنابراین، پس از بررسی کلیه داده‌های موجود در این پایگاه برای تطابق هرچه بیشتر، داده‌های اولیه با شرایط و فرضیات حاکم در این پژوهش، داده‌های مسیر که طی ۲۰ سال، ۱۰۰ داده در هر سال جمع‌آوری و تحت حداقل شرایط نگهداری بوده‌اند، برای انجام پژوهش مورد توجه قرار گرفت. لازم به ذکر است که داده‌های موجود بعد از حذف خطاهای موجود در برداشت ۲۰ ساله، برای انجام مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به بردار حالت و ماتریس انتقال مربوط به هر یک از دسته‌بندی‌ها می‌توان پیش‌بینی وضعیت روسازی موجود را برای هر دسته‌بندی (۱۰ تایی و ۲۰ تایی) به انجام رسانید. دوره کاری برای یک روسازی به عنوان دوره‌ای از آب و هوا و ترافیک تعریف می‌شود. بنابراین، با فرض ثابت بودن این شرایط در هر سال برای مسیر مورد نظر، مطالعه انجام گرفته است. جدول ۱ اطلاعات آنالیز آماری مقادیر PCI مسیر تحت مطالعه را به صورت سالانه و در یک دوره ۲۰ ساله نشان داده است.

تغییرشکل) به دست آوردند. تنها متغیر مستقل برای پیش‌بینی، عمر روسازی در نظر گرفته شد. در این مطالعه، اکثریت قطعه‌ها تنها اطلاعات مربوط به دو بازرسی متوالی را در اختیار داشتند که این امر سبب شد برآورد احتمالات انتقال، کمتر قابل اعتماد باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، نسبت به بررسی افزایش بُعد ماتریس انتقال پژوهش خاصی مشاهده نشد. لذا، بر اساس اهمیت موضوع و موارد بیان شده، برنامه-ریزی برای انجام تحقیق حاضر تدوین شد.

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. روش تحقیق

از آنجایی که نتایج سیستم مدیریت روسازی، متکی بر اطلاعات جمع‌آوری و ذخیره شده در بانک اطلاعاتی است و مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی ابزار مهم پردازش اطلاعات اولیه هستند، لذا، در این پژوهش، ابتدا با جمع‌آوری و مطالعه پژوهش‌های قبلی انجام شده در این زمینه، به بررسی سوابق پژوهشی مشابه پرداخته شده است. سپس، برای استفاده از روش زنجیره مارکوف، با استفاده از داده‌های PCI در دسترس برای یک دوره معین، ابتدا ماتریس احتمال انتقال متناظر با دو دسته‌بندی ۱۰ تایی و ۲۰ تایی تشکیل و در ادامه با استناد به بردار حالت موجود در پژوهشی مشابه و از یک خانواده، اقدام به ارائه مدل پیش‌بینی عملکرد آینده روسازی گردید. در ادامه، برای سنجش میزان دقت این روش، دو نمودار حاصل از هر یک از دسته‌بندی‌ها با هم مقایسه گردیدند. برای ارزیابی بهتر نتیجه حاصل شده، مدل پیش‌بینی مارکوفی با یک مدل رگرسیونی که بر اساس داده‌های اولیه ساخته شد نیز مقایسه شد. لازم به توضیح است که در این پژوهش از نرم‌افزارهای Matrix Calculator، SPSS 25 و Excel 2016 برای انجام محاسبات و مدل‌سازی‌ها

مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، سال ششم، پیاپی بیست و دوم، تابستان ۱۳۹۹
 جدول ۱. اطلاعات آنالیز آماری PCI مسیر تحت مطالعه به تفکیک سال‌های اول تا بیستم (FHWA, ۲۰۰۸)

سال مطالعه	تعداد	میانگین	واریانس	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	دامنه تغییرات
اول	۱۰۰	۹۹/۱۴	۰/۹۵۰	۰/۹۷۵	۹۷	۱۰۰	۳
دوم	۱۰۰	۹۸/۲۹	۲/۲۴۸	۱/۴۹۹	۹۰	۱۰۰	۱۰
سوم	۱۰۰	۹۶/۳۰	۹/۹۹۰	۳/۱۶۱	۸۵	۱۰۰	۱۵
چهارم	۱۰۰	۹۴/۶۷	۱۶/۳۰۴	۴/۰۳۸	۸۳	۹۹	۱۶
پنجم	۱۰۰	۹۲/۹۶	۲۰/۲۰۰	۴/۴۹۴	۸۱	۹۹	۱۸
ششم	۱۰۰	۹۱/۲۲	۲۸/۰۳۲	۵/۲۹۵	۷۵	۹۸	۲۳
هفتم	۱۰۰	۸۹/۳۱	۴۴/۵۱۹	۶/۶۷۲	۷۰	۹۷	۲۷
هشتم	۱۰۰	۸۴/۵۰	۵۵/۹۴۹	۷/۴۸۰	۶۰	۹۱	۳۱
نهم	۱۰۰	۸۱/۶۸	۵۱/۱۸۹	۷/۱۵۵	۵۵	۸۸	۳۳
دهم	۱۰۰	۷۲/۲۴	۷۶/۴۲۷	۸/۷۴۲	۴۵	۸۰	۳۵
یازدهم	۱۰۰	۶۸/۴۵	۱۰۰/۷۵۵	۱۰/۰۳۸	۳۵	۸۰	۴۵
دوازدهم	۱۰۰	۶۳/۵۱	۳۶/۴۳۴	۶/۰۳۶	۳۷	۷۲	۳۵
سیزدهم	۱۰۰	۵۸/۷۹	۲۱/۸۸۵	۴/۶۷۸	۴۶	۶۹	۲۳
چهاردهم	۱۰۰	۵۵/۳۹	۱۷/۰۸۹	۴/۱۳۴	۴۷	۶۷	۲۰
پانزدهم	۱۰۰	۴۸/۱۲	۲۱/۹۲۵	۴/۶۸۲	۳۳	۵۹	۲۶
شانزدهم	۱۰۰	۴۱/۳۶	۱۱/۷۲۸	۳/۴۲۵	۳۴	۵۲	۱۸
هفدهم	۱۰۰	۳۷/۱۴	۱۲/۱۰۱	۳/۴۷۹	۲۹	۴۴	۱۵
هجدهم	۱۰۰	۳۱/۹۸	۱۷/۷۱۷	۴/۲۰۹	۶	۴۳	۳۷
نوزدهم	۱۰۰	۳۰/۸۳	۶۰/۲۲۳	۷/۷۶۰	۸	۵۴	۴۶
بیستم	۱۰۰	۲۸/۶۸	۹۶/۷۴۵	۹/۸۳۶	۵	۶۴	۵۹

سال رخ داده است. البته با بررسی پارامتری مانند واریانس می‌توان نتیجه گرفت که در برخی سال‌ها تعمیر و نگهداری جزئی و موضعی روی روسازی مورد نظر انجام شده است و به همین سبب است که افت ۱۰ تایی در مقدار PCI تقریباً هر سه سال یک بار رخ داده است.

۳-۲-۲. بررسی توصیفی PCI مسیر با استفاده از واریانس و انحراف معیار

واریانس و انحراف معیار جدول ۱ نشان می‌دهند که با گذشت زمان مقدار این دو پارامتر به طور کلی افزایش می‌یابد. این امر بیانگر افزایش اختلاف میان داده‌ها با میانگین آن‌ها در هر سال است. اما باید توجه داشت این افزایش برای هر دو سال متوالی یا برای همه سال‌ها به

۱-۲-۳. بررسی توصیفی PCI مسیر با استفاده از میانگین میانگین PCI که در ستون سوم جدول ۱ ارائه شده نشان می‌دهد که طی دوره ۲۰ ساله، با گذشت زمان رو به کاهش بوده و در سال‌های نخست، زوال روسازی با سرعت بسیار کمتری ادامه یافته که با توجه به نوساز بودن جاده امری غیرمنطقی نیست. اگر مبنای سنجش، کاهش ۱۰ واحدی نسبت به آخرین مقدار PCI اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شود، کاهش ۱۰ واحد نخست در مقدار PCI (نزول از ۱۰۰ به ۹۰) در سال‌های اول تا پایان سال ششم، یعنی طی ۶ سال، رخ داده است. اما کاهش ۲۰ واحد در مقدار PCI (نزول از ۸۹ به ۶۹) در سال‌های هفتم تا پایان سال یازدهم، یعنی طی ۵ سال، رخ داده است و کاهش ۱۰ واحدهای بعدی، هر یک تقریباً در ۳

نتیجه گرفت که نگهداری موضعی تأثیر زیادی بر بهبود قطعاتی که PCI بیشتری داشته‌اند، نداشته است. با این حال، کاهش مقدار حداکثر از سال دوازدهم به بعد مجدداً به صورت تدریجی کاهش یافته که این موضوع بیانگر بی‌تأثیر نبودن نگهداری و تعمیرات جزئی می‌باشد. در سال نوزدهم، مقدار متناظر با هر دو ستون نسبت به سال‌های قبل خود افزایش قابل توجهی داشته که این امر بیانگر اجرای مجدد تعمیر و نگهداری موضعی روسازی می‌باشد که تأثیر شایانی بر برخی قطعات داشته است. مثلاً می‌توان مشاهده کرد که حداکثر PCI، ۱۰ واحد افزایش داشته، در سال بیستم به ۶۴ رسیده، ولی قطعات کاملاً اضمحلال یافته را تغییر چندانی نداده است.

۴-۲-۳. بررسی توصیفی PCI مسیر با استفاده از دامنه

تغییرات

دامنه تغییرات که نشان‌دهنده اختلاف بین کوچکترین داده و بزرگترین داده است مرتباً در حال افزایش است زیرا کاهش حداقل PCI با گذشت زمان، بیشتر از کاهش حداکثر PCI متناظر می‌باشد. شکل ۳، تغییرات خطی PCI مسیر طی یک دوره ۲۰ ساله را نشان می‌دهد که برای توصیف بهتر، مقدار افزایش‌ها و کاهش‌ها به صورت خطی ترسیم شده‌اند. مشاهده می‌شود که PCI از سال اول تا سال ششم افت تدریجی دارد و از سال هفتم تا سال نهم مقدار افت با شیب بیشتری نسبت به قبل ادامه می‌یابد و شیب خط موجود بین سال‌های نهم و دهم به بیشترین مقدار خود رسیده است. شیب منفی بین سال‌های دهم تا چهاردهم نسبت به قبل به طرز محسوسی کاهش یافته که این امر حاکی از انجام تعمیر و نگهداری موضعی در این بازه زمانی است. از سال چهاردهم تا هجدهم مجدداً افزایش افت در مقدار PCI و متناظر با آن افزایش شیب منفی رخ داده است. این موضوع حاکی از احساس نیاز به انجام کارهای تعمیر و نگهداری در این بازه زمانی است. از سال نوزدهم، شیب منفی در حال کاهش است که می‌توان اظهار داشت در این بازه زمانی

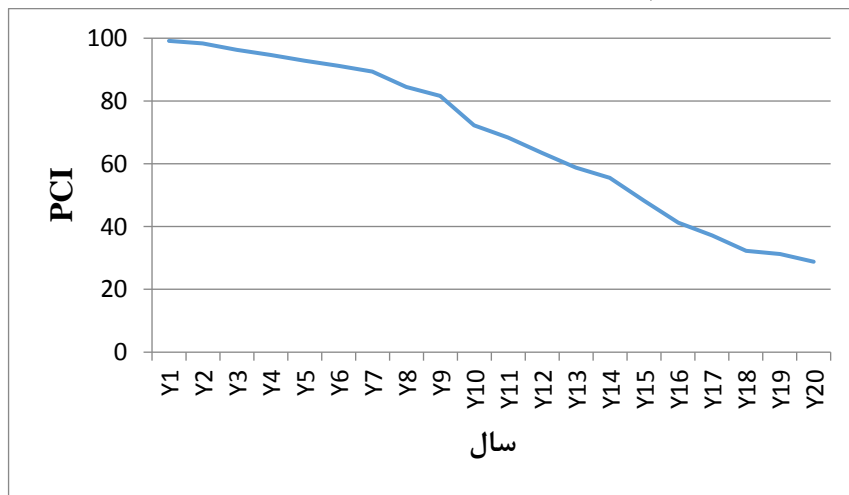
یک اندازه نیست و برخی سال‌ها نسبت به سال‌های قبل تر افزایش بیشتری داشته‌اند. به طور مثال، پس از سال ششم، در این دو پارامتر نسبت به سال‌های قبل افزایش زیادی مشاهده می‌شود. این موضوع را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که هر چقدر سرعت زوال روسازی در سال‌های نخست مطالعه بیشتر شود، اختلاف بین PCI قطعات بیشتر شده و بدین ترتیب داده‌های پراکنده بیشتری را می‌توان در میان داده‌ها مشاهده کرد. در سال دوازدهم، کاهش ناگهانی این دو پارامتر ممکن است ناشی از نوعی نگهداری موضعی باشد. در سال‌های پایانی، این دو مقیاس نسبت به سال‌های قبل خود مقدار کمتری دارند و این موضوع بیانگر این است که تقریباً تمام قطعات مورد مطالعه دچار زوال شده و همگی دارای مقادیر کمی از PCI هستند و پراکندگی زیادی بین آن‌ها دیده نمی‌شود. البته در دو سال پایانی، مقدار این دو مقیاس افزایش قابل توجهی نسبت به سال‌های قبل داشته است که این امر بیانگر اجرای مجدد تعمیر و نگهداری موضعی روی روسازی است که تأثیر شایانی بر برخی قطعات داشته، ولی قطعات کاملاً اضمحلال یافته را تغییر چندانی نداده و این موجب افزایش اختلاف بین داده‌ها گردیده است.

۴-۲-۳. بررسی توصیفی PCI مسیر با استفاده از

حداقل و حداکثر داده‌ها

مشاهده می‌شود که در جدول ۱ مقدار حداقل داده‌ها با گذشت زمان مرتباً در حال کاهش است. ولی در سال دوازدهم، مقدار حداقل نسبت به سال قبل خود افزایش داشته و این افزایش تا سه سال بعد مشهود است. این موضوع بیانگر اعمال نوعی نگهداری موضعی می‌باشد که موجب شده قطعات نسبت به زوال موجود خود کمی بهبود یابند. در ستون هفتم، که بیشترین مقدار PCI را در هر ۱۰۰ داده سالانه نشان می‌دهد، می‌توان کاهش تدریجی این مقدار را مشاهده کرد که البته پس از سال هفتم این کاهش بسیار محسوس‌تر از سایر سال‌ها است. با مشاهده مقدار حداکثر متناظر با سال دوازدهم می‌توان

مجدداً اقدامات تعمیر و نگهداری انجام گرفته است.



شکل ۳. روند تغییرات PCI مسیر مورد مطالعه طی یک دوره ۲۰ ساله

بردار اولیه باید برقرار شود. فراوانی و درصد فراوانی PCI

مسیر تحت مطالعه در ۱۰ حالت و در دسته‌بندی ۱۰ تایی در جدول ۲ ارائه شده است. علاوه بر این، بردار اولیه بر اساس یک خانواده روسازی که دقیقاً مشابه مسیر مورد نظر است و با استفاده از روابط (۴) و (۵) تولید شده‌اند، انتخاب شده و در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. فراوانی و درصد فراوانی PCI مسیر تحت مطالعه در ۱۰ حالت و در دسته‌بندی ۱۰ تایی

درصد	N	دسته‌بندی	حالت
۳۰/۷	۶۱۳	۱۰۰-۹۰	۱
۱۲/۲	۲۴۳	۹۰-۸۰	۲
۹/۹	۱۹۷	۸۰-۷۰	۳
۸/۶	۱۷۱	۷۰-۶۰	۴
۱۰/۳	۲۰۵	۶۰-۵۰	۵
۹/۰	۱۸۰	۵۰-۴۰	۶
۱۳/۳	۲۶۵	۴۰-۳۰	۷
۵/۳	۱۰۶	۳۰-۲۰	۸
۰/۹	۱۷	۲۰-۱۰	۹
۰/۲	۳	۱۰-۰	۱۰
۱۰۰	۲۰۰۰		مجموع

جدول ۳. بردار اولیه برای دسته‌بندی ۱۰ تایی

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
$P_0 =$	۰/۸۸	۰/۷۸	۰/۷۲	۰/۵۵	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۲۴

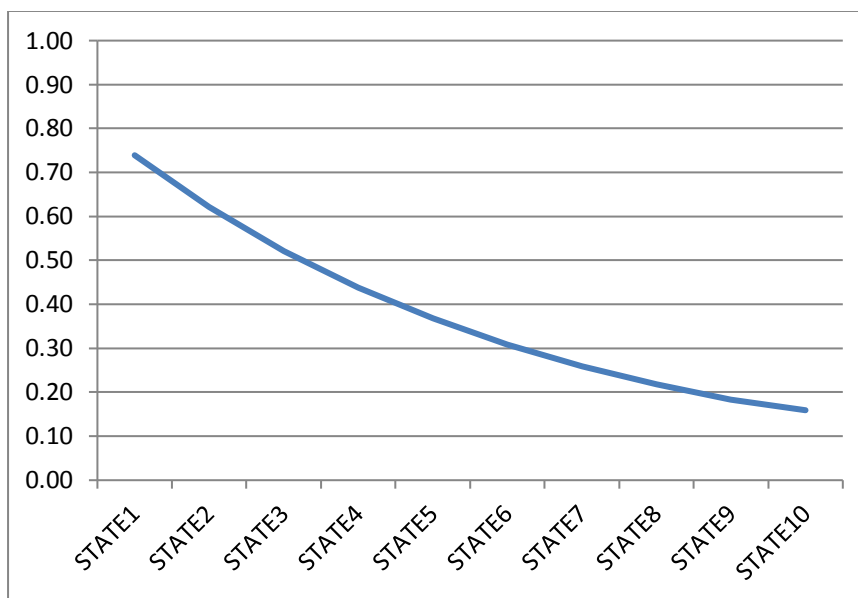
با این فرض که وضعیت روسازی در یک چرخه خدمت بیشتر از یک حالت نزول نخواهد کرد، ماتریس احتمال انتقال مارکوفی را می‌توان به دست آورد. درایه‌های ماتریس احتمالاتی انتقال (p_{ij}) برای دسته‌بندی‌های ۱۰ تایی که برای هر سطر با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آیند به صورت جدول ۴ می‌باشند.

جدول ۴. درایه‌های ماتریس احتمالاتی انتقال برای دسته‌بندی ۱۰ تایی

	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	i \ j
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۲۶۱	۰/۷۳۹	۱
۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۳۷۹	۰/۶۲۱	۰	۲
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴۷۸	۰/۵۲۲	۰	۰	۳
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۶۲	۰/۴۳۸	۰	۰	۰	۴
۵	۰	۰	۰	۰	۰/۶۳۲	۰/۳۶۸	۰	۰	۰	۰	۵
۶	۰	۰	۰	۰/۶۹۱	۰/۳۰۹	۰	۰	۰	۰	۰	۶
۷	۰	۰	۰/۷۴۰	۰/۲۶۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷
۸	۰	۰/۷۸۲	۰/۲۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸
۹	۰/۸۱۷	۰/۱۸۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹
۱۰	۰/۱۵۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰

شده است. شکل ۴، منحنی پیش‌بینی PCI مسیر طی یک دوره ۲۰ ساله در دسته‌بندی ۱۰ تایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شیب خط مماس بر این نمودار به صورت یکنواخت تغییر می‌کند که این موضوع بیانگر یکنواخت بودن سرعت زوال به کمک این نحوه دسته‌بندی است.

مطابق با این روش، برای پیش‌بینی وضعیت آینده روسازی، بردار حالت برای هر چرخه خدمت t با ضرب کردن بردار حالت اولیه p_0 در ماتریس انتقال p_{ij} که به توان t رسیده است، به دست می‌آید. لازم به ذکر است که محاسبات لازم برای استفاده از رابطه $p_t = p_0 P^t$ جهت انجام پیش‌بینی‌ها با نرم‌افزار Matrix Calculator انجام



شکل ۴. منحنی پیش‌بینی PCI مسیر طی یک دوره ۲۰ ساله در دسته‌بندی ۱۰ تایی

بردار مورد استفاده در دسته‌بندی ۱۰ تایی می‌باشد. با این تفاوت که برای ۵ تایی شدن این بردار، بین هر دو حالت یک حالت میانی تعریف شده است و درایه مربوط به آن، میانگین درایه‌های دو حالت قبل و بعد هستند. بر این اساس، طبقه‌بندی اطلاعات در این حالت در جدول ۵ و بردار حالت اولیه برای دسته‌بندی ۲۰ تایی به صورت جدول ۶ خواهد بود.

۳-۴. پیش‌بینی PCI مسیر با استفاده از زنجیره

مارکوف و دسته‌بندی ۵ تایی

در این پژوهش، پیشنهاد شد که در روش زنجیره مارکوف، PCI که در بازه صفر تا ۱۰۰ قرار دارد به ۲۰ حالت وضعیت با عرضی معادل ۵ واحد تقسیم‌بندی شود. بنابراین، مراحل بخش ۳-۳ با دسته‌بندی‌های ۵ تایی تکرار شد. بردار حالت اولیه در این دسته‌بندی، همان

جدول ۵. طبقه‌بندی اطلاعات براساس دسته‌بندی ۵ تایی

حالت	دسته‌بندی	N	درصد
۱	۱۰۰-۹۵	۴۴۱	۲۲/۰۵
۲	۹۵-۹۰	۱۷۳	۸/۶۵
۳	۹۰-۸۵	۱۶۵	۸/۲۵
۴	۸۵-۸۰	۷۵	۳/۷۵
۵	۸۰-۷۵	۱۰۴	۵/۲۰
۶	۷۵-۷۰	۹۵	۴/۷۵
۷	۷۰-۶۵	۷۴	۳/۷۰
۸	۶۵-۶۰	۹۳	۴/۶۵
۹	۶۰-۵۵	۱۰۱	۵/۰۵
۱۰	۵۵-۵۰	۱۰۹	۵/۴۵
۱۱	۵۰-۴۵	۷۹	۳/۹۵

ابوطالبی اصفهانی، مؤمنی

۴/۹۰	۹۸	۴۵-۴۰	۱۲
۶/۸۰	۱۳۶	۴۰-۳۵	۱۳
۶/۵۵	۱۳۱	۳۵-۳۰	۱۴
۳/۳۵	۶۷	۳۰-۲۵	۱۵
۱/۹۰	۳۸	۲۵-۲۰	۱۶
۰/۶۵	۱۳	۲۰-۱۵	۱۷
۰/۲۰	۴	۱۵-۱۰	۱۸
۰/۱۵	۳	۱۰-۵	۱۹
۰/۰۵	۱	۵-۰	۲۰
۱۰۰	۲۰۰۰		مجموع

جدول ۶. بردار اولیه برای دسته‌بندی ۵ تایی

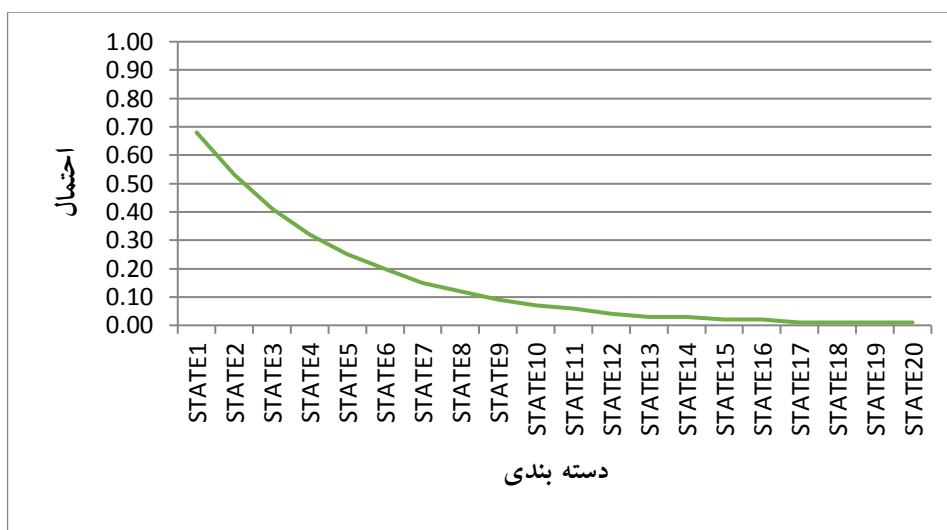
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
$P_0 =$	۰/۸۸	۰/۸۳	۰/۷۸	۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۶۴	۰/۵۵	۰/۵۱	۰/۴۶	۰/۴۵
	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}
$P_0 =$	۰/۴۴	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۲۴

هر سطر با استفاده از رابطه $p_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i}$ به دست می‌آیند که در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

مثل حالت قبل، با این فرض که وضعیت روسازی در یک چرخه خدمت بیشتر از یک حالت نزول نخواهد کرد، درایه‌های ماتریس احتمال انتقال مارکوفی (p_{ij}) برای دسته‌بندی‌های ۵ تایی نیز مشابه با بازه‌های ۱۰ تایی، برای

می‌دهد. این منحنی که مشابه با منحنی شکل ۴ است، احتمال زوال روسازی برای هر دسته‌بندی را نشان داده، به صورتی که هر یک از دسته‌بندی‌ها در این نمودار، دارای عرض ۵ واحد است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شیب خط مماس بر این نمودار به صورت یکنواخت تغییر نمی‌کند که این موضوع بیانگر یکنواخت نبودن سرعت زوال به کمک این نحوه دسته‌بندی است که با واقعیت تطابق بیشتری دارد.

همانند حالت قبل، محاسبات با استفاده از رابطه $p_t = p_0 P^t$ جهت انجام پیش‌بینی وضعیت آینده روسازی با نرم‌افزار Matrix Calculator انجام شد. در این محاسبات، برای پیش‌بینی وضعیت آینده روسازی، بردار حالت برای هر چرخه خدمت t با ضرب کردن بردار حالت اولیه p_0 در ماتریس انتقال p_{ij} که به توان t رسیده است، به دست آمد. شکل ۵، منحنی پیش‌بینی PCI مسیر طی یک دوره ۲۰ ساله در دسته‌بندی ۵ تایی را نشان



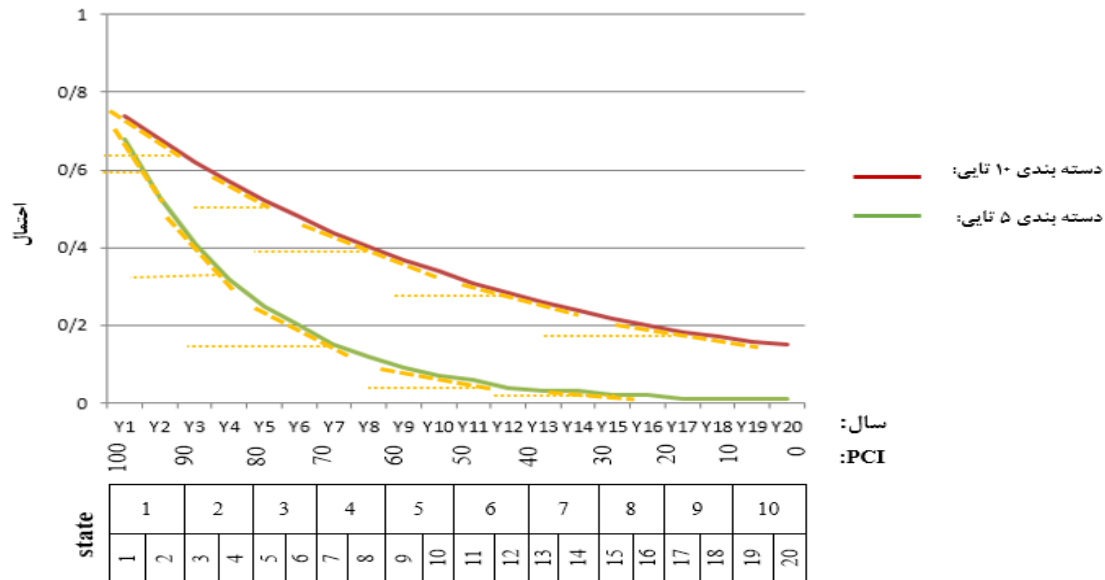
شکل ۵. منحنی پیش‌بینی PCI مسیر طی یک دوره ۲۰ ساله در دسته‌بندی ۵ تایی

تعاریف موجود در سیستم مدیریت روسازی، وجود ندارد، بنابراین، می‌توان این مقایسه را با توجه به مواردی که در ادامه خواهد آمد انجام داد.

۳-۵. بحث و مقایسه پیش‌بینی PCI مسیر با استفاده از زنجیره مارکوف با دو نوع دسته‌بندی متفاوت

۳-۵-۱. مقایسه با استفاده از شیب خط مماس بر منحنی‌های زوال
با ترسیم خطوطی بر منحنی‌های زوال در PCI‌های مختلف می‌توان تغییرات شیب را در طول زوال برای دو منحنی ترسیم شده بهتر دنبال کرد. لذا، مطابق شکل ۶ ملاحظه می‌شود که در دو منحنی زوال و در دو نوع دسته‌بندی ارائه شده، سرعت زوال در منحنی حاصل از دسته‌بندی ۱۰ تایی نسبت به سرعت زوال در منحنی حاصل از دسته‌بندی ۵ تایی یکنواخت‌تر است.

به منظور سنجش دقت افزایش تعداد حالات پیشنهاد شده، باید نقطه بحرانی به دست آمده از هر دو دسته‌بندی بعد از پیش‌بینی PCI مسیر برای یک دوره ۲۰ ساله در دسته‌بندی‌های ۱۰ تایی و ۵ تایی با هم مقایسه شوند. شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که این دو مدل تنها زوال کلی زوال PCI مسیر را بیان می‌کنند و هیچ‌گونه نقطه بحرانی که در ابتدای پژوهش مد نظر بوده است در این دو مدل مشاهده نمی‌شود. با توجه به این که امکان مقایسه دو نوع دسته‌بندی از طریق نقطه بحرانی، مطابق با



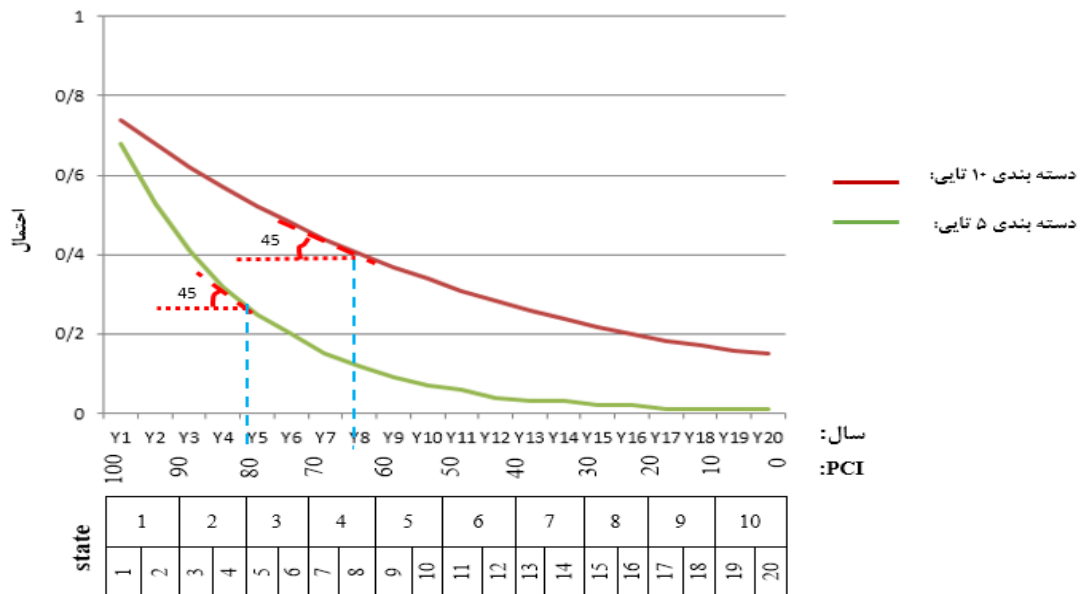
شکل ۶. مقایسه پیش‌بینی دو نوع دسته‌بندی با استفاده از شیب خط مماس بر منحنی زوال

بحرانی در آنجا لحاظ شود. اما در بیشتر منحنی‌های خانواده ارائه شده در پژوهش‌ها و کتاب‌ها، ملاحظه شد که نقطه عطف در شیبی بسیار نزدیک به 45° اتفاق افتاده است. لذا، شیب فوق‌الذکر انتخاب شد. با بررسی شیب خط مماس بر هر دو منحنی ایجاد شده در شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که نقطه بحرانی قراردادی برای دسته‌بندی ۱۰ تایی و ۵ تایی به ترتیب پس از گذشت سال هشتم و سال چهارم رخ می‌دهد.

۲-۵-۳. تعریف نقطه بحرانی قراردادی و مقایسه دو

نوع پیش‌بینی

با توجه به تفاوت‌هایی که در نمودارهای حاصل از دو نوع دسته‌بندی مشاهده می‌شود (شکل ۶)، می‌توان به صورت قراردادی نقطه‌ای با شیب خط مماس بر منحنی زوال به مقدار 45° را به عنوان نقطه بحرانی در نظر گرفت. این نقطه می‌تواند با هر شیب دیگری نیز تعریف شود. البته باید نقطه عطف منحنی به دست آید و نقطه



شکل ۷. مقایسه پیش‌بینی دو نوع دسته‌بندی با استفاده از نقطه بحرانی قراردادی

۳-۵-۳. مقایسه دو نوع منحنی در یک سال مشترک

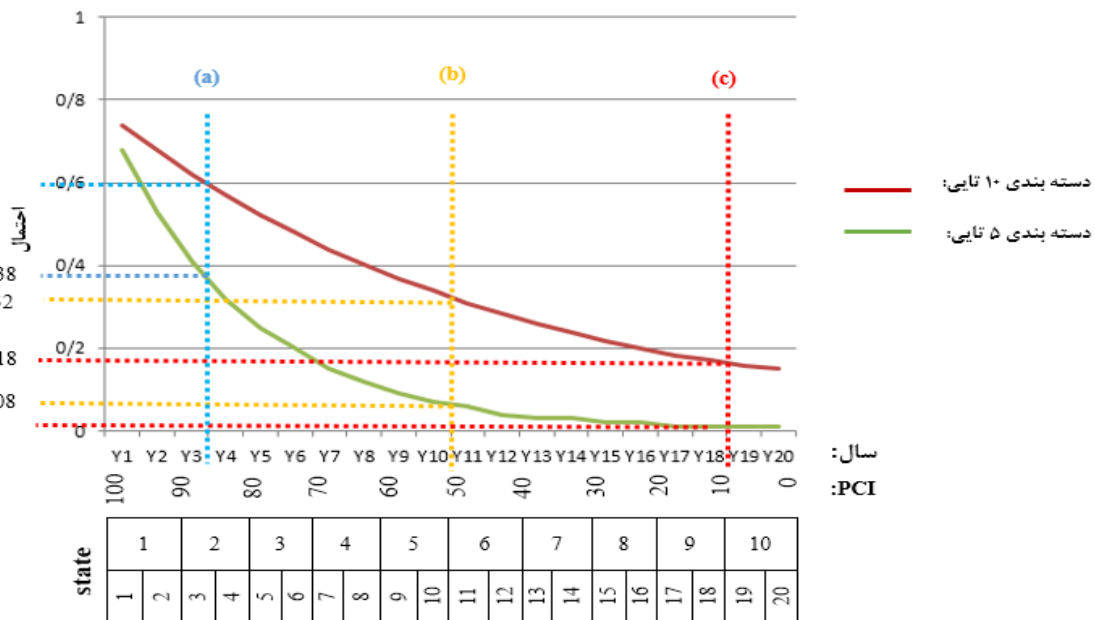
برای این مقایسه، سال‌های سوم (در شروع مطالعه (a))، دهم (وسط مطالعه (b)) و هجدهم (در پایان مطالعه (c)) انتخاب شدند. بدین ترتیب، شکل ۸ ترسیم شده، که موارد زیر از آن قابل استخراج است:

- در حالت (a): در سال سوم پیش‌بینی، احتمال مقدار PCI روسازی در دسته‌بندی ۱۰ تایی معادل ۰/۶ است. در حالی که در همین سال، این احتمال برای دسته‌بندی

۵ تایی تقریباً معادل ۰/۳۸ است.

- در حالت (b): در سال دهم پیش‌بینی، احتمال مقدار PCI روسازی در دسته‌بندی ۱۰ تایی معادل ۰/۳۲ است. در حالی که در همین سال، این احتمال برای دسته‌بندی

۵ تایی تقریباً معادل ۰/۰۸ است. - در حالت (c): در سال هجدهم پیش‌بینی، احتمال مقدار PCI روسازی در دسته‌بندی ۱۰ تایی معادل ۰/۱۸ است. در حالی که در همین سال، این احتمال برای دسته‌بندی



شکل ۸. مقایسه پیش‌بینی دو نوع دسته‌بندی در یک سال خاص

ترسیم مقادیر PCI برداشت شده اولیه و PCI حاصل از معادله (۶) برای یک دوره ۲۰ ساله در شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که پارامترهای ارائه شده جدول ۸ نشان می‌دهند تطابق بسیار خوبی بین مقادیر PCI واقعی و مدل ارائه شده وجود دارد. در هر دو نمودار، وضعیت اولیه روسازی در وضعیت عالی نزدیک به ۱۰۰ قرار دارد و پس از آن با گذشت زمان، به تدریج روال کلی زوال را در پیش می‌گیرد که سرعت زوال با افزایش عمر روسازی مرتباً افزایش می‌یابد. در هر دو نمودار، در حدود سال نهم، افزایش شیب زوال به وضوح دیده می‌شود که می‌توان چنین تعبیر کرد که با تقریب خوبی پس از سال نهم عمر روسازی، زوال با شدت بیشتری نسبت به سال‌های

۳-۶. پیش‌بینی PCI با استفاده از رگرسیون

با استفاده از روش رگرسیون و داده‌های موجود در نرم-افزار Spss می‌توان مدل ریاضی پیش‌بینی PCI را بر حسب سال ارائه کرد. جدول ۸، ضریب همبستگی، آنالیز واریانس و ضرایب رگرسیون میان متغیرهای PCI و سال را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با مقدار R برابر با ۰/۹۹۸ همبستگی مناسبی بین متغیرها وجود دارد و سطوح معناداری نیز کمتر از ۰/۰۵ بوده که بیانگر ارائه مدل رگرسیونی معنادار است. بر این اساس، رابطه ریاضی مدل پیش‌بینی به صورت رابطه ۶ است:

$$PCI = 0.952287 + 0.025848year - 0.006413year^2 + 0.000171year^3 \quad (6)$$

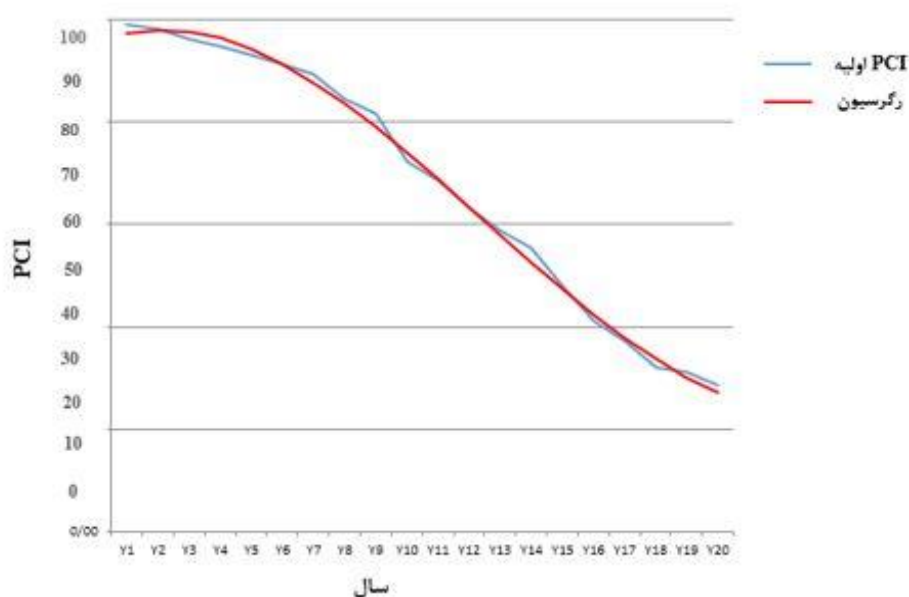
قبل ادامه خواهد داشت.

جدول ۸. ضریب همبستگی، آنالیز واریانس متغیرها و ضرایب رگرسیونی PCI و سال

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.998	0.996	0.996	0.016

	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Regression	1.198	3	0.399	1475.704	0.000
Residual	0.004	16	0.000		
Total	1.202	19			

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	T	Sig.
	B	Beta			
Year	0.025848	0.007	0.608	3.576	0.003
year ** 2	-0.006413	0.001	-3.261	-8.120	0.000
year ** 3	0.000171	0.000	1.707	6.924	0.000
(Constant)	0.952287	0.018		53.002	0.000



شکل ۹. تطابق مقادیر PCI برداشت شده و PCI به دست آمده از مدل رگرسیون

۴. جمع بندی و نتیجه گیری

در روش مارکوف، با تقسیم PCI به ۱۰ حالت وضعیت ۱۰ قسمتی، مدل زوال روسازی ارائه شده است. در این پژوهش، پیشنهاد شد که تعداد حالات به ۲۰ حالت با عرض ۵ واحد افزایش یابد. ممکن است بتوان با این افزایش به برآورد دقیق تری از روند اضمحلال روسازی دست یافت. بنابراین، براساس روش مارکوف همگن برای دو دسته بندی ۱۰ تایی و ۵ تایی PCI و داده های

معتبر ۲۰ ساله یک روسازی، مدل سازی انجام شد. با توجه به نتایج کسب شده از دو نوع دسته بندی ۱۰ تایی و ۵ تایی موارد زیر قابل نتیجه گیری است:

- در پیش بینی حاصل از دسته بندی ۵ تایی شیب خط مماس بر منحنی دارای تغییرات بیشتری بوده (شکل ۶) و سرعت زوال بیشتری دارد و این موضوع با منطق روسازی که با گذشت زمان تشدید خرابی ها و زوال بیشتر را تجربه می کند، کاملاً سازگار است. با توجه به این مقایسه می توان نتیجه گرفت که دسته بندی ۵ تایی

روسازی نشان می‌دهد که این موضوع بیانگر حداقل بودن مقدار PCI در دسته‌بندی ۵ تایی و در نتیجه بحرانی بودن این دسته‌بندی نسبت به دسته‌بندی ۱۰ تایی می‌باشد (شکل ۸).

– شکل ۹ نشان داد که روش رگرسیون و معادله ریاضی درجه سه برازش داده شده به خوبی توانسته با مقادیر واقعی PCI تطابق یابد. همچنین، شروع زوال روسازی با شیب زیاد از این منحنی قابل استخراج است.

مطالعات فوق با یک سری داده انجام شد. قطعاً در صورتی که داده‌های چندین روسازی مسیرهای مختلف از یک خانواده به صورت پیوسته ۲۰ ساله و با سطح یکسان بهره‌برداری در دسترس بود، نتایج قابل اعتمادتر و مطلوب‌تری به دست می‌آمد. لذا، توصیه می‌شود همین روند با تعداد بیشتری از داده‌ها در صورت امکان صورت گیرد. همچنین، پیشنهاد می‌شود با استفاده از پایگاه داده‌ای مناسب، مدل‌های دیگر پیش‌بینی عملکرد آینده روسازی مورد بررسی قرار گیرند و نتایج آن‌ها با نتایج حاصل از روش این پژوهش مقایسه گردد.

روش مارکوف در پیش‌بینی زوال روسازی سازگارتر از دسته‌بندی ۱۰ تایی در این روش است.

– نقطه بحرانی قراردادی برای دسته‌بندی ۱۰ تایی و ۵ تایی به ترتیب پس از گذشت سال هشتم و سال چهارم رخ می‌دهد (شکل ۷). رخداد زودتر نقطه بحرانی در دسته‌بندی ۵ تایی بیانگر این موضوع است که با استفاده از این نوع دسته‌بندی می‌توان قبل از رسیدن به حالت بحرانی و یا فوق بحرانی، اقدام به فعالیت‌های پیشگیرانه و یا فراییشگیرانه برای روسازی نمود و حتی می‌توان تخمین صحیحی از نوع فعالیت پیشگیرانه‌ای که باید صورت بگیرد، انجام داد. بنابراین، می‌توان با توجه به تفاوت نقطه بحرانی قراردادی مورد نظر در این دو نوع دسته‌بندی نتیجه‌گیری نمود که دسته‌بندی ۵ تایی نسبت به دسته‌بندی ۱۰ تایی در پیش‌بینی زوال آینده روسازی عملکرد موفق‌تری دارد.

– بررسی احتمال مقدار PCI روسازی در یک سال مشترک برای دو منحنی ایجاد شده نشان داد که منحنی حاصل از دسته‌بندی ۱۰ تایی نسبت به منحنی حاصل از دسته‌بندی ۵ تایی احتمال بیشتری را برای مقدار PCI

۵. مراجع

- Abaza, K. A. 2004. "Deterministic performance prediction model for rehabilitation and management of flexible pavement". *Int. J. Pavement Eng.*, 5(2): 111-121.
- Amin, M. S. R. 2015. "The pavement performance modeling: Deterministic vs. stochastic approaches". PP. 179-196. *In: Hami, A. (Ed.), Numerical Methods for Reliability and Safety Assessment, Springer.* https://doi.org/10.1007/978-3-319-07167-1_5
- Butt, A. A., Shahin, M. Y., Feighan, K. J. and Carpenter, S. H. 1987. "Pavement performance prediction model using the Markov process". *Transport. Res. Record*, 1123: 12-19.
- de Melo e Silva, F., Van Dam, T. J., Bulleit, W. M. and Ylitalo, R. 2000. "Proposed pavement performance models for local government agencies in Michigan". *Transport. Res. Record*, 1699(1): 81-86.
- Haas, R. 2003. "Good technical foundations are essential for successful pavement management". *Proc. of Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control Conference, Instituto dos Estrados de Portugal.*
- Hassan, R., Lin, O. and Thananjeyan, A. 2017. "Probabilistic modelling of flexible pavement distresses for network management". *Int. J. Pavement Eng.*, 18(3): 216-227.
- Karan, M. 1997. "Municipal pavement management system". Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Kobayashi, K., Do, M. and Han, D. 2010. "Estimation of Markovian transition probabilities for pavement deterioration forecasting". *KSCCE J. Civ. Eng.*, 14(3): 343-351.
- Kobayashi, K., Kaito, K. and Lethanh, N. 2012. "A Bayesian estimation method to improve deterioration prediction for infrastructure system with Markov chain model". *Int. J. Arch. Eng. Constr.*, 1(1): 1-13.
- Li, N., Xie, W. C. and Haas, R. 1996. "Reliability-based processing of Markov chains for modeling pavement network deterioration". *Transport. Res. Record*, 1524(1): 203-213.
- Li, N., Haas, R. and Xie, W. C. 1997. "Development of a new asphalt pavement performance prediction

- model". *Can. J. Civ. Eng.*, 24(4): 547-559.
- Lytton, R. L. 1987. "Concepts of pavement performance prediction and modeling". *Proc. of the 2nd North American Conference on Managing Pavements*.
- Madanat, S., Mishalani, R. and Ibrahim, W. H. W. 1995. "Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data". *J. Infrastruct. Sys.*, 1(2): 120-125.
- Ortiz-García, J. J., Costello, S. B. and Snaith, M. S. 2006. "Derivation of transition probability matrices for pavement deterioration modeling". *J. Transport. Eng.*, 132(2): 141-161.
- Rada, G. R., Perl, J. and Witzczak, M. W. 1986. "Integrated model for project-level management of flexible pavements". *J. Transport. Eng.*, 112(4): 381-399.
- Ross, S. M. 2014. "Introduction to probability models". Academic Press.
- Shahin, M. Y. 2005. "Pavement management for airports, roads, and parking lots". Vol. 501, Springer, New York.
- Su, C. H., Chen, S. J., Mao, L. J. and Xu, S. L. 2014. "Establishment of multiobjective system for maintenance engineering of high-grade highway asphalt pavement". China National Knowledge Infrastructure. www.cnki.net
- Surendrakumar, K., Prashant, N. and Mayuresh, P. 2013. "Application of Markovian probabilistic process to develop a decision support system for pavement maintenance management". *Int. J. Sci. Technol. Res.*, 2(8): 295-303.
- Tavakoli, A., Lapin, M. S. and Figueroa, J. L. 1992. "PMSC: Pavement management system for small communities". *J. Transport. Eng.*, 118(2): 270-280. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(1992)118:2(270)
- The Federal Highway Administration (FHWA). (2008). "Long-term pavement performance (LTPP) program". Retrieved from <https://infopave.fhwa.dot.gov>
- Wang, K. C., Zaniewski, J. and Way, G. 1994. "Probabilistic behavior of pavements". *J. Transport. Eng.*, 120(3): 358-375.
- Yang, J., Gunaratne, M., Lu, J. J. and Dietrich, B. 2005. "Use of recurrent Markov chains for modeling the crack performance of flexible pavements". *J. Transport. Eng.*, 131(11): 861-872.