

مدل‌سازی تخریب هندسه مسیر راه‌آهن برای پیش‌بینی چرخه زیرکوبی

مقاله علمی - پژوهشی

سید حسام الدین ذگردی^{*}، استاد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
اسماعیل پاپی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
بختیار استادی، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zegordi@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۱۹۶-۱۷۳

چکیده

شرایط هندسی مسیر راه‌آهن یک عامل مهم و اثرگذار بر ایمنی و راحتی عملیات قطار و کنترل چرخه‌های زیرکوبی خطوط راه‌آهن می‌باشد. مدیران زیرساخت‌های راه‌آهن در راستای استفاده بهینه از منابع محدود تعمیر و نگهداری، براساس درک دقیق قوانین تخریب هندسه مسیر، چرخه‌های زیرکوبی را برنامه‌ریزی می‌کنند. در این مقاله با در نظر گرفتن هر قطعه مسیر ۲۰۰ متری به عنوان یک بخش تحقیقاتی، عدم قطعیت و ناهمگونی تخریب هندسه مسیر براساس ارزیابی شرایط هندسه مسیر تحلیل می‌شود. بر این اساس، مدل احتمال انتقال مارکوف برای پیش‌بینی روند زوال بخش‌های مسیر ریلی ارائه شده‌است. همچنین وضعیت فرسودگی بخش‌های مسیر به چندین رتبه طبقه‌بندی و احتمالات گذار مارکوف بین حالات خرابی، که با فواصل غیر یکنواخت و نامنظم بین نقاط بازرسی در زمان تعریف و توسط مدل‌های خطر نمایی توصیف شده است، به منظور تأیید اعتبار روش پیشنهادی، مطالعه موردی خط راه‌آهن ناحیه لرستان در حوزه راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران بررسی شده‌است. نتایج حاصل از مدل زوال در حد قابل قبولی امکان پیش‌بینی وضعیت آینده مسیر را محقق ساخته‌است. همچنین نتایج تخمین پارامترهای مدل، تاثیر عوامل ناهمگون آب‌وهوا را بر فرآیندهای زوال هندسه مسیر و چرخه‌های زیرکوبی مسیر نشان می‌دهد، که مسیرهای تحت تاثیر شرایط آب‌وهوایی شدیدتر، دارای طول عمر و چرخه‌های زیرکوبی کوتاه‌تری می‌باشد. همچنین رویکرد پیشنهادی برای برنامه‌ریزی عملیات تعمیر و نگهداری و کمک به مدیریت نگهداری و تعمیر قطعات خطوط راه‌آهن حائز اهمیت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خرابی هندسی، زیرکوبی، زنجیره مارکوف، شاخص TQI، مدل زوال راه‌آهن

۱-مقدمه

نگهداری را به طور منظم تنظیم می‌کنند. در یک عملیات تعمیر و نگهداری در دسترس آینده، اصلی‌ترین چالش تعیین دقیق بخشی از مسیر، که نیاز به اصلاح و بهبود دارد تا کیفیت مسیر با لحاظ محدودیت‌های موجود، در سطح مطلوبی حفظ گردد. معیار مهمی که باید در حد قابل قبولی حفظ شود، هندسه مسیر است. برای این منظور، هندسه مسیر باید بازرسی شود تا سطح فعلی مسیر با آستانه‌های استاندارد مقایسه شود. شرایط هندسه به طور دوره‌ای در عملیات‌های بازرسی اندازه‌گیری می‌شود تا نقص‌ها قبل از اینکه به سطح غیرقابل قبول برسند، تشخیص داده

مدیران زیرساخت راه‌آهن باید یک سیستم مطمئن و ایمن برای اطمینان از راحتی مسافران فراهم کنند. از آنجایی که یک خط راه‌آهن یک سیستم خطی و غیر اضافی است، در دسترس بودن و ایمنی یک خط ریلی مستقیماً به قابلیت اطمینان و کیفیت تمام بخش‌های مسیر بستگی دارد. از این رو نیاز به یک سیستم برنامه‌ریزی مناسب برای حفظ کیفیت هندسه مسیر در سطح قابل قبول حائز اهمیت و تأثیر مثبتی بر دردسترس بودن و ظرفیت مسیر دارد. مدیران زیرساخت به منظور انجام فعالیت‌های بهبود به گونه‌ای که ترافیک عادی را مختل نکند، عملیات‌های تعمیر و

از داده‌های پارامترهای هندسه مسیر ریلی، با در نظر گرفتن اثرات ناهمگن مختلف ارائه شده است، تا دقت را در برآورد نتایج تخمین زمان و مکان چرخه‌های نگهداری، بهبود بخشید. از این رو خط آهن به بخش‌های کوچکتر تقسیم می‌گردد و شرایط بخش مسیر بین دو عملیات متوالی به چند حالت مجزا تقسیم شده است، سپس براساس فرض عوامل مختلف ناهمگن مدلی برای توسعه هر بخش از مسیر ارائه گردیده است.

۲-پیشینه تحقیق

نتایج حاصل از بررسی مقالات سالیان اخیر در رابطه با تخریب هندسی مسیر راه آهن به شرح ذیل ارائه شده است:

[Elkhoury et al., 2018] در مقاله خود عنوان می‌کنند که، مدل‌های آماری مبتنی بر مشاهدات ساختار مسیر ریلی و عوامل تأثیرگذار مانند ترافیک، اجزای مسیر و متغیرهای تعمیر و نگهداری هستند. این مدل‌ها سعی می‌کنند شرایط واقعی را با معادلات ریاضی شبیه‌سازی کنند تا پیش‌بینی کنند که چگونه مسیرها در آینده تخریب می‌شوند. مدل‌های آماری را می‌توان به قطعی، احتمالی و تصادفی طبقه‌بندی کرد.

[Famurewa et al, 2015] مدل‌سازی خرابی و بهینه‌سازی زمان‌بندی را با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های مستقیم مداخله و مالکیت مسیر و حفظ کیفیت هندسه در سطح مطلوب با کمک یک تابع زوال‌نمایی برای مدل‌سازی کیفیت هندسه و یک مدل تجربی برای بازیابی پس از مداخله زیرکوبی ارائه می‌کنند.

[Khajehei et al, 2021] یک مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی زمان‌بندی پیشگیرانه با استفاده از رویکرد OM با هدف کاهش در هزینه‌های تعمیر و نگهداری و دفعات اقدامات زیرکوبی اصلاحی در یک افق زمانی معین پیشنهاد گردیده است. همچنین از پارامترهای انحراف استاندارد سطح طولی (SDLL) و مقادیر شدید عیوب جدا شده از سطح طولی، شیب و پیچش جهت اندازه‌گیری وضعیت کیفیت مسیر استفاده گردیده است و از یک تابع‌نمایی برای مدل‌سازی تخریب هندسه مسیر و مدل رگرسیون لجستیک دوتایی برای تخمین احتمال وقوع نقایص جدا شده شدید پیشنهاد شده است. به منظور دستیابی به یک برنامه بهینه برای زیرکوبی پیشگیرانه، مسئله به‌عنوان یک مدل MILP فرموله شده است و OM در مدل به شکل وابستگی اقتصادی و ساختاری در نظر گرفته شده است.

شوند. چنین بازرسی می‌تواند به مدیران زیرساخت کمک کند تا در کوتاه‌مدت و بلندمدت تصمیمات بهتری بگیرند. [Famurewa et al., 2016] هندسه خط راه‌آهن تحت بارهای ترافیکی تخریب می‌شود و تحت عملیات تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط قرار می‌گیرد. اقدامات تعمیر و نگهداری معمولی که به منظور بازیابی کیفیت هندسه مسیر انجام می‌شود عبارتند از: زیرکوبی، سنگ زنی، آستر مسیر، مهاربندی محکم ریل و تراورس و تعویض (پابند ریل، تراورس، لنت و عناصر فتر) می‌باشد که در مراحل بعدی عمر مسیر، هنگامی که بالاست رسوب می‌کند، اقدامات تعمیر و نگهداری فوق از نظر کیفیت خروجی و دوام بی‌اثر می‌شوند [Veit, 2007].

زیرکوبی بالاست عملیات اصلی تعمیر و نگهداری است که هندسه مسیر را بازیابی می‌کند. الزامات این مداخله معمولاً به سطوح کیفیت هندسه مسیر مربوط می‌شود که بر راحتی و ایمنی کاربر تأثیر مستقیم دارد. ماشین‌آلات سنگین و منابع انسانی برای انجام مداخلات زیرکوبی موردنیاز است؛ بنابراین به دلیل محدودیت‌های لجستیکی و بودجه، مدیران زیرساخت‌های راه‌آهن باید این عملیات را تا یک سال قبل برنامه‌ریزی کنند [Caetano and Teixeira, 2016]. مدیران زیرساخت‌های راه‌آهن باید چرخه زیرکوبی را دقیقاً تخمین زده و نیازهای زیرکوبی را براساس قوانین تخریب هندسه مسیر پیش‌بینی کنند تا از قبل برنامه‌ریزی عملیات زیرکوبی، تخصیص منطقی منابع نگهداری محدود و کنترل هزینه‌های نگهداری را انجام دهند. باید به این نکته توجه داشت که شرایط تنزل کیفیت هندسه مسیر در مکان‌های مختلف از الگوی یکسانی پیروی نمی‌کند، بنابراین فرآیندهای خرابی هندسه مسیر و چرخه‌های تراکم در مکان‌های مختلف ناهمگن هستند [Bai et al., 2015]. روند تخریب هندسه مسیر تحت تأثیر عوامل زیادی قرار می‌گیرد، از جمله عوامل شرایط مسیر مانند قوس، شیب، نوع ریل، نوع تراورس و ضخامت بالاست. عوامل وسیله نقلیه مانند سرعت قطار و بار ترافیکی، بارمحوری و عوامل محیطی مانند دما، آب‌وهوا و شرایط زمین‌شناسی بستگی دارد. پارامترهای هندسه مسیر شامل، عرض خط، شیب عرضی، سطح طولی چپ، سطح طولی راست، تراز چپ، تراز راست و پیچش است. در این مقاله با توجه به اهمیت هندسه مسیر در ایمنی و راحتی مسافران و اهمیت کمبود منابع به بررسی متوسط زمان بین خرابی‌های مسیر پرداخته و مدلی برای پیش‌بینی تخریب هندسه مسیر بالاستی با استفاده

مسیر با استفاده از توزیع‌های ویبال برای برآورد دقیق چرخه تراکم هر بخش مسیر پیشنهاد شده است. با در نظر گرفتن چندین عامل ناهمگن در مدل، مدل‌سازی فردی برای بخش‌های مختلف مسیر ارائه شده است. نتایج برآورد پارامترهای مدل نشان‌دهنده تأثیر عوامل ناهمگونی مختلف بر روی فرآیندهای خرابی هندسه مسیر و چرخه‌های تراکم بخش‌های مسیر است.

[Falamarzi et al, 2018] یک مدل جنگل‌های تصادفی (RF) برای پیش‌بینی شاخص زوال در آینده ایجاد کردند. همچنین از پارامتر انحراف سطح طولی به عنوان پارامتر اصلی برای توسعه شاخص انتخاب شده است. براساس نتایج این تحقیق، مقدار R^2 تعدیل شده مدل پیشنهادی به طور قابل توجهی بالا و خطای پیش‌بینی ناچیز است که نشان می‌دهد مدل عملکرد معقولی در پیش‌بینی شاخص زوال دارد.

[Andrade and Teixeira, 2014] نیازهای تعمیر و نگهداری را در مورد تخریب هندسه مسیر راه‌آهن باهدف یافتن احتمال تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی نشده (اصلاحی) در یک بخش ریلی مشخص را با استفاده از یک مدل رگرسیون لجستیک بررسی کردند. یافته‌های اصلی این مقاله، این است که انحرافات استاندارد شیب عرضی و سطح طولی پیش‌بینی‌کننده‌های قابل‌اعتمادی برای تعمیر و نگهداری برنامه‌ای و غیر برنامه‌ای هستند.

[Jovanovic et al, 2015] از یک مدل خوشه‌بندی برای تخریب مسیر ریلی در رابطه با توسعه سیستم‌های مدیریت نگهداری زیرساخت راه‌آهن (RMMS) استفاده کردند. RMMS پیشنهادی شامل وظایف مختلفی مانند نظارت بر وضعیت راه‌آهن، مدل‌سازی پیش‌بینی تخریب و توسعه استراتژی‌های نگهداری و برنامه‌ریزی است. نتایج ارزیابی برای بهبود عملکرد نظارت بر وضعیت یک سیستم راه‌آهن، بررسی مداوم و منظم پارامترهای مختلفی، مانند نوع ریل، نوع بالاست، وضعیت زیر بالاست، وضعیت چفت‌وبست، وضعیت تراورس و مسیر راه‌آهن عنوان شده است.

[Caetano and Teixeira, 2015] مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی عملیات تعمیر و بازسازی زیرساخت‌های مختلف ریل مانند بالاست، تراورس و ریل به منظور به حداقل رساندن هزینه چرخه عمر مسیر راه‌آهن ایجاد کردند. برای پیش‌بینی عیوب خستگی ریل از تابع ویبال به عنوان توزیع احتمال استفاده شده است. پارامترهای توزیع ویبال با استفاده از نتایج مطالعات

[Lee et al, 2018] مدلی را برای به حداقل رساندن تعداد عملیات زیرکوبی و تجدید و کاهش هزینه‌های نگهداری به طور هم‌زمان پیشنهاد کردند. در این مطالعه SDL، به عنوان پارامتر اندازه‌گیری شاخص کیفیت مسیر در نظر گرفته شد و از یک مدل خطی برای پیش‌بینی تخریب هندسه مسیر در آینده استفاده گردیده است. در مدل تخریب، نرخ تخریب تابعی از تعداد اقدامات زیرکوبی است و با افزایش تعداد اقدامات زیرکوبی، اثربخشی کاهش می‌یابد.

[Soleimanmeigouni et al, 2018a] برای مدل‌سازی بهبودی پس از زیرکوبی، از رویکرد احتمالی با در نظر گرفتن شرایط هندسه مسیر قبل از تراکم به عنوان عامل غالب برای مدل‌سازی پارامترهای مدل و تجزیه و تحلیل همبستگی برای اندازه‌گیری رابطه خطی بین بازیابی‌های مختلف اندازه‌گیری هندسی مسیر پیشنهاد می‌کنند. نتایج یک رابطه متوسط بین بازیابی سطح طولی و شیب عرضی و ارتباط ضعیف بین بازیابی سطح طولی و انحنا را نشان می‌دهد. همچنین از رگرسیون خطی و فرآیند وینر برای مدل تخریب هندسی مسیر و به دست آوردن نرخ تخریب استفاده شد. اثر زیرکوبی بر میزان تخریب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و مشاهدات نشان داد که میزان تخریب پس از ضربه زدن افزایش می‌یابد.

[Bai et al, 2015] یک مدل زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی بی‌نظمی‌های مسیر راه‌آهن بر اساس داده‌های مدیریت نگهداری راه‌آهن چین ارائه کردند. شاخص کیفیت مسیر در چهار حالت طبقه‌بندی شده و از یک فرآیند تصادفی مارکوف به کمک یک مدل خطر با استفاده از ناهمگونی واحدهای نگهداری ماتریسی از احتمالات انتقال مارکوف پیشنهاد می‌شود.

[Shafahi and Hakhmaneshi, 2009] از مدل مارکوف برای پیش‌بینی تخریب مسیر استفاده کرده‌اند. آن‌ها مسیر را با توجه به بار قطار، موقعیت جغرافیایی و شرایط مسیر به شش طبقه تقسیم می‌کنند که با استفاده از شاخص ثبت خرابی ترکیبی (CTR) توسط پنج دسته توصیف می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مدل مارکوف بهتر از مدل‌های رگرسیونی مرسوم مانند مدل ORE است.

[An et al, 2018] با در نظر گرفتن هر بخش مسیر ۲۰۰ متری به عنوان یک هدف تحقیق، عدم قطعیت و ناهمگونی تخریب هندسه مسیر را بر اساس ارزیابی گسسته شرایط هندسه مسیر تجزیه و تحلیل می‌کنند. براین اساس، یک مدل تخریب هندسی

قبله پیش‌بینی شده است. برای مطالعه موردی از داده‌های تاریخی مربوط به یک خط ریلی در پرتغال استفاده شده است. بر اساس نتایج این مطالعه می‌توان با انتخاب فواصل زمانی مناسب برای مداخلات تجدید به نگهداری بهینه دست یافت.

[Audley and Andrews, 2013] از توزیع دو پارامتری ویبال برای تجزیه و تحلیل توزیع تخریب هندسه مسیر در طول زمان پس از نگهداری استفاده شده است و در مطالعه موردی داده‌های شبکه ریلی انگلستان مورد بررسی و انحراف استاندارد سطح طولی به‌عنوان متغیر وابسته انتخاب شده است. سرعت خط و سابقه نگهداری هر دو متغیر مستقل در این تحقیق بودند. نتایج این مطالعه این نظریه را اثبات کرد که زیرکوبی بالاست می‌تواند به بالاست آسیب برساند و هندسه مسیر را با سرعت بیشتری تخریب کند

در این مقاله سعی شده است که برخی از خلاءها و کاستی‌های بیان شده در مطالعات قبله پوشش داده شود، در مرور انجام شده برای تعیین وضعیت مسیر اغلب از پارامتر سطح طولی استفاده شده است، اثر سایر پارامترها بر تخریب هندسه مسیر در نظر گرفته نشده است که این مسئله به‌عنوان یک خلأ تحقیقاتی باید بررسی شود در این مطالعه برای تعیین وضعیت مسیر از شاخص (CoCD) بر اساس استاندارد EN13848-6 با لحاظ پارامترهای سطح طولی، شیب عرضی، عرض خط و تراز خط استفاده شده است.

همچنین وضعیت مسیر تحت تأثیر چندین عامل بیرونی تنزل پیدا می‌کند که در مرور ادبیات عمده عوامل بررسی شده سرعت عبوری، بارمحوری، ضریب ساختار مسیر، سال ساخت و نوع ادوات استفاده شده است، با این حال، علی‌رغم مشارکت‌های مهم در ادبیات شرایط آب‌وهوایی در کنار سایر عوامل بر میزان تخریب هندسه مسیر مؤثر می‌باشد که در این مقاله به دلیل خلأ در ادبیات، شرایط آب‌وهوا به‌عنوان یک عامل ناهمگن در تخریب هندسه مسیر در بررسی شده است.

۳- روش تحقیق

در این مقاله با توجه به این که فرآیند تخریب هندسه مسیر یک فرآیند احتمالی و توأم با عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای مدل می‌باشد. طبق بررسی و مرور مقالات گذشته که از مدل‌های گوناگونی برای پیش‌بینی تخریب مسیر پیشنهاد گردیده است، که در مدل مارکوف نتایج با دقت بیشتر محقق گردیده است، از این رو در این مقاله برای پیش‌بینی تخریب هندسه مسیر از مدل مارکوف و جهت بررسی عدم قطعیت و ناهمگونی در تخریب مسیر از تابع توزیع نمایی استفاده شده است.

۳-۱- ویژگی‌های مسیر

یک مسیر ریلی بالاستی را می‌توان در دو گروه طبقه‌بندی کرد: ۱- روسازی مسیر، از ریل، تراورس و سیستم بست‌بند تشکیل شده است.

۲- زیرسازی مسیر که شامل بالاست، زیر بالاست و زیرسازی می‌شود. شکل (۱) اجزای مسیر را نشان می‌دهد.

بنابراین برای بهره‌برداری از یک مسیر ریلی نیاز به حفظ هر دو بخش از مسیر می‌باشد، که در این مقاله به بررسی وضعیت هندسی مسیر و برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر به کمک عملیات زیرکوبی پرداخته شده است. هندسه مسیر به موقعیت هر ریل با خط مرکزی مسیر در فضای سه‌بعدی اشاره دارد. طبق استاندارد [EN13848-1, 2008] کیفیت هندسه مسیر به عنوان ویژگی‌های هندسی طراحی مسیر با پارامترهای مشخص شده در سطوح عمودی و جانبی تعریف می‌شود. پارامترهای هندسی اصلی مورد استفاده برای ارزیابی کیفیت مسیر و برنامه‌ریزی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری عبارتند از:

[Hashemian, 2021]

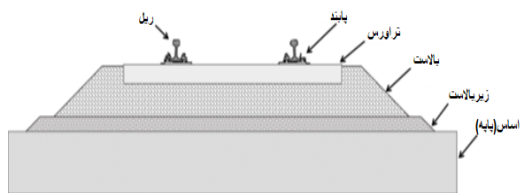
افتادگی ریل چپ و راست

-انحراف افقی ریل چپ و راست

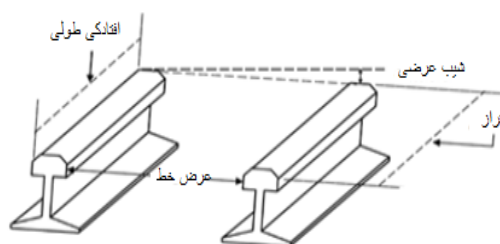
-عرض خط

-دور (شیب عرضی)

-پیچش



شکل ۱. ساختار مسیر [Attoh-Okine, ۲۰۱۷]



شکل ۲. برخی از پارامترهای هندسه مسیر (He, ۲۰۱۵)

۲-۳- زیرکوبی

در بالاست بین تراورس‌ها فرورفته و سپس به سمت همدیگر فشرده می‌شود هر دوی این مراحل با ارتعاش همراه خواهد بود مقدار نیروهای اعمال شده از طرف کلنگ‌های یک مقدار ثابت بوده و نهایتاً سبب ایجاد تراکم بالاست در زیر تراورس می‌گردد (Sancho, ۲۰۲۱). عوامل اصلی مؤثر بر کیفیت زیرکوبی مسیر عبارت‌اند از فرکانس و دامنه ارتعاشات کلنگی‌ها، فشار کوبش، سرعت فشردن، زمان و عمق کوبش (Zaayman, ۲۰۱۷).

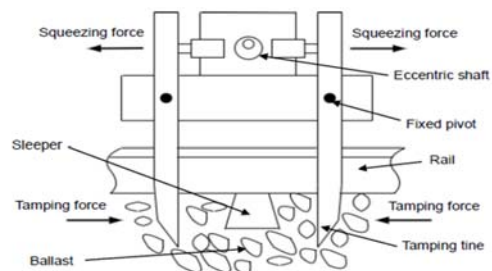
زیرکوبی یک روش تعمیر و نگهداری برای مسیر راه‌آهن بالاستی است که به منظور تصحیح و بهبود کیفیت و پایداری مسیر به صورت دوره‌ای انجام می‌شود. عمل زیرکوبی به وسیله ماشین‌آلات خاص صورت می‌پذیرد که دارای توانمندی اندازه‌گیری میزان نشست و همچنین بلندکردن خط آهن و فشردن بالاست در زیر تراورس‌ها به طور هم‌زمان و از سرعت بالایی برخوردار هستند، فرآیند این عملیات بسیار ساده می‌باشد به طوری که ابتدا پنجه‌های ماشین زیرکوب شکل (۳)

۳-۳- روش‌های ثبت پارامترهای هندسی خط آهن

به طور کلی اندازه‌گیری به منظور بازرسی به سه روش انجام می‌شود که عبارتند از:

- ۱) روش دستی
- ۲) استفاده از ماشین‌آلات سبک خطی
- ۳) استفاده از ماشین‌آلات سنگین (ماشین‌آلات مکانیزه خطی)، مانند ماشین اندازه‌گیری خط

در جهت بهره‌برداری از مسیر ریلی پارامترهای هندسی مسیر باید به طور منظم طبق رویه‌های فنی تعریف شده در استانداردها اندازه‌گیری شود. اصولاً پارامترهای مختلف هندسی که شامل، پارامترهای عرض خط، دور و پیچش به صورت مطلق و پارامترهای افتادگی و انحراف افقی با استفاده از روش انحراف از وسط وتر اندازه‌گیری می‌شوند. پارامترهای مرتبط با اجزای خط عموماً به صورت مطلق اندازه‌گیری می‌شوند (ذاکری، ۱۳۹۴).



شکل ۳. نمایش شماتیک یک ماشین زیرکوب (Sancho, ۲۰۲۱)

۳-۴- شاخص کیفیت مسیر

(Fortunato, ۲۰۰۷). در این مقاله مسیر به بخش‌های ۲۰۰ متری تقسیم می‌شود که با استفاده از انحرافات استاندارد پارامتر هندسی برای هرکدام از بخش‌ها، شاخص کیفیت مسیر محاسبه می‌گردد. شاخص CoSD از حاصل انحراف استانداردهای پارامترهای هندسی با معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 - \bar{x}_i^2} \quad (1)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}$$

کیفیت مسیر معمولاً با قراردادن یک یا مجموعه‌ای از پارامترهای هندسه مسیر در یک متریک یا مجموعه‌ای از متریک‌ها ارزیابی می‌شود. این معیارها به‌عنوان شاخص کیفیت هندسی شناخته می‌شوند و برای تعیین زمان مداخلات مسیر و مقایسه وضعیت مسیر قبل و بعد از مداخلات استفاده می‌شود

است. n تعداد نقاط نمونه برداری در بخش واحد است. فاصله بین دو نقطه نمونه برداری مجاور در راه‌آهن ایران ۰٫۲۵ متر و برای طول ۲۰۰ متر تعداد آن ۸۰۰ است.

که در آن σ_i : انحراف استاندارد یک پارامتر هندسی (واحد: میلی متر) است، \bar{x}_i (متر) پارامتر هندسی را نشان می‌دهد، \bar{x}_i مقدار متوسط نقاط نمونه‌گیری پارامتر \bar{x}_i است (واحد: میلی متر). x_{ij} مقدار پارامتر \bar{x}_i در نقطه نمونه برداری j (واحد: میلی متر)

$$CoSD = \sqrt{\frac{w_{AL}SD_{AL}^2 + w_GSD_G^2 + w_{CL}SD_{CL}^2 + w_{LL}SD_{LL}^2}{4}} \quad (2)$$

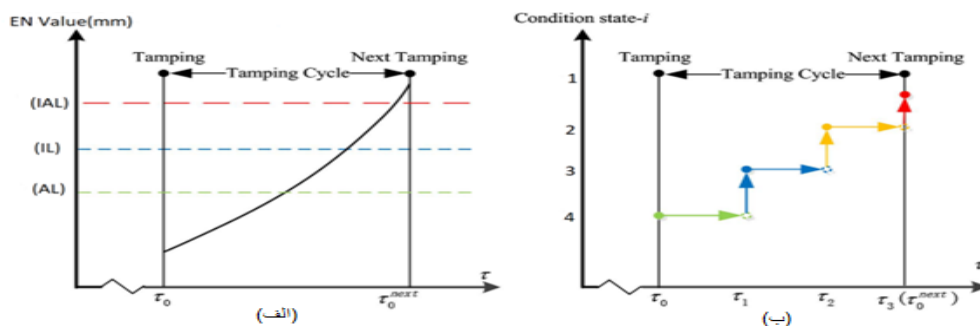
بر روی CoSD توسط عوامل وزنی تنظیم می‌شود که توسط مدیر زیرساخت مشخص شده است.

شاخص که در استاندارد اروپایی EN13848-6 پیشنهاد شده است، ترکیب وزنی از پارامترهای سطح طولی (LL)، تراز (AL)، گیب مسیر (G) و سطح مقاطع (CL) است که با انحراف استاندارد مربوطه بیان می‌شوند. تأثیرات نسبی آن‌ها

۳-۵- فرآیند تخریب هندسه مسیر در طول یک چرخه زیرکوبی

می‌دهند، که در آن حالت وضعیت ۴ به حالت وضعیت ۳، وضعیت ۳ به وضعیت ۲ و حالت ۲ به ترتیب به حالت وضعیت ۱ تغییر می‌کند. فرآیند تخریب هندسه مسیر تحت تأثیر عوامل بسیاری از جمله عوامل وضعیت مسیر مانند قوس، شیب، نوع ریل، نوع تراورس و ضخامت بالاست قرار داد. همچنین عوامل مرتبط با وسیله نقلیه مانند سرعت قطار و ترافیک باری و عوامل محیطی مانند دما، آب‌وهوا و شرایط زمین‌شناسی بستگی دارد، بسیاری از مطالعات اثرات این عوامل را تحلیل کرده‌اند و آن‌ها را به‌عنوان عوامل ناهمگن در نظر گرفته‌اند با توجه به تأثیر عوامل ناهمگن، فرآیندهای تخریب هندسه مسیر بخش‌های مختلف عدم قطعیت و ناهمگنی را نشان می‌دهد. (An et al, ۲۰۱۸)

فرآیند تخریب هندسه مسیر در طول یک چرخه عملیات زیرکوبی با لحاظ نوع بهره‌برداری از مسیر، کلاس خط و سایر عوامل بیان شده متفاوت می‌باشد. با در نظر گرفتن این موضوع در یک دوره زیرکوبی، وضعیت مسیر به حالت‌های مختلف تقسیم می‌شود؛ وضعیت $i=4$ در زمان اولیه بهترین شرایط هندسه مسیر است. با گذشت زمان، مقدار شاخص به طور مداوم افزایش می‌یابد و شرایط هندسه مسیر به تدریج بدتر می‌شود. هنگامی که وضعیت به حالت $i=1$ تغییر می‌کند، مدیران عملیات زیرکوبی بعدی را برای بخش مسیر برنامه‌ریزی می‌کنند. شکل (۴) شماتیکی از روند تخریب هندسه مسیر بین دو عملیات زیرکوبی متوالی قطعات مسیر را نشان می‌دهد. در شکل (ب) (τ_1, τ_2, τ_3) در محور افقی (زمان) زمان‌هایی را در چرخه زیرکوبی نشان



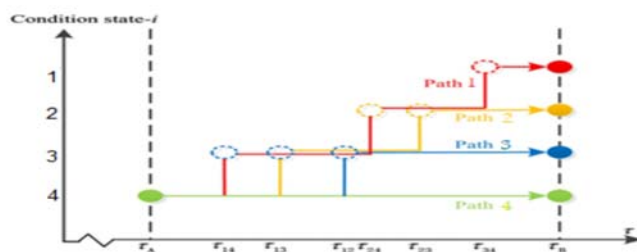
شکل ۴. شماتیک فرآیند تخریب هندسه مسیر در طول چرخه زیرکوبی یک قطعه مسیر: (الف) تغییر مقدار EN با زمان

(ب) وضعیت تنزل وضعیت

۳-۵-۱- عدم قطعیت در فرآیند زوال

در مجموعه نامتناهی از مسیرهای زوال احتمالی باشد. شکل (۵) چهار مسیر احتمالی زوال را نشان می‌دهد. در شکل (۵)، τ_{12} ، τ_{13} و τ_{14} به ترتیب زمانی را نشان می‌دهند که در آن حالت وضعیت ۴ به وضعیت ۳ تغییر می‌کند. بعلاوه τ_{23} ، τ_{24} و τ_{34} به ترتیب نشان دهنده زمانی هستند که در آن وضعیت ۳ به وضعیت ۲ تغییر می‌کند و τ_{34} زمانی را نشان می‌دهد که در آن حالت وضعیت ۲ به حالت وضعیت ۱ تغییر می‌کند (An et al, 2018).

عدم قطعیت در فرآیند تخریب هندسه مسیر به این واقعیت اشاره دارد که تغییر در حالت‌های شرایط بین دو بازرسی متوالی، تصادفی و نامشخص است، زیرا تغییر در مقدار شاخص (CoSD) بین دو فعالیت بازرسی متوالی تصادفی و نامشخص است. در این مطالعه، τ_A و τ_B دو تاریخ بازرسی متوالی را نشان می‌دهند که بین دو عملیات زیرکوبی متوالی زمانی که توسط ماشین‌های اندازه‌گیری مسیر بازرسی می‌شود، رخ می‌دهد. با فرض اینکه وضعیت ۴ در زمان بازرسی τ_A مشاهده می‌شود، وضعیت مشاهده شده در τ_B ممکن است یکی از چهار حالت

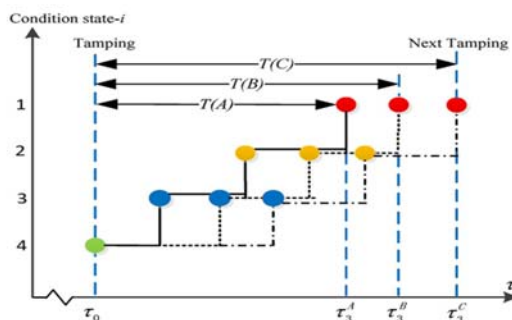


شکل ۵. شماتیک عدم قطعیت در روند تخریب هندسه مسیر

۳-۵-۲- ناهمگونی در فرآیند زوال

که در آن عملیات کوبیدن انجام می‌شود، و τ_3^A , τ_3^B , τ_3^C به ترتیب زمان‌هایی را نشان می‌دهند که در آن شرایط هندسه مسیر برای این سه بخش مسیر به حالت وضعیت ۱ منتقل می‌شود، یعنی زمان‌های که به عملیات کوبیدن نیاز است. چرخه‌های زیرکوبی این سه بخش مسیر به ترتیب $T(A)$ ، $T(B)$ و $T(C)$ هستند.

ناهمگونی در فرآیند تخریب هندسه مسیر به این واقعیت اشاره دارد که به دلیل تأثیرات عوامل ناهمگن مختلف، نرخ زوال بخش‌های مختلف مسیر متفاوت است و در نتیجه دوره‌های زیرکوبی متفاوتی ایجاد می‌شود. شکل (۶) ناهمگونی سه بخش مسیر را نشان می‌دهد. در این شکل، τ_0 نشان‌دهنده زمانی است



شکل ۶. شماتیک ناهمگونی در فرآیند زوال برای بخش‌های مختلف مسیر

۳-۶- مدل تخریب هندسه مسیر

در بسیاری از این کاربردها، احتمالات انتقال مارکوف به‌سادگی با استفاده از فرکانس انتقال نسبی حالت‌های وضعیت تخمین زده می‌شود که بر اساس نتایج بازرسی تعیین می‌شود. بازرسی‌های مسیر در طی یک سال چندین بار انجام می‌شود. با این حال، موارد زیادی وجود دارد که در آن اطلاعات به‌دست‌آمده از بازرسی‌های مسیر به تفاوت‌ها در ویژگی‌های ساختاری مسیر، شرایط محیطی یا حتی فواصل زمانی بین بازرسی‌ها اشاره نمی‌کند که دقت تخمین‌های احتمال انتقال مارکوف را به خطر می‌اندازد. به‌منظور تخمین احتمالات انتقال مارکوف بر اساس چنین داده‌های متنوعی، مطلوب است که یک روش تخمینی ایجاد شود

باتوجه به عدم قطعیت و ناهمگونی فرآیند تخریب هندسه مسیر بین دو عملیات زیرکوبی متوالی، در این مقاله یک روش مدل‌سازی تخریب هندسه مسیر بر اساس مدل احتمال مارکوف توسعه داده شده است، مدل زنجیره مارکوف یک مدل آماری است که برای پیش‌بینی پیشرفت زوال یک قطعه مسیر استفاده می‌شود. در این مدل، یک ترتیب وضعیت به‌عنوان نتایج بازرسی‌های مسیر، شرایط قطعه را نشان می‌دهد و ماتریس احتمالات گذار مارکوف برای توصیف پیشرفت زوال بین دو حالت متوالی برآورد می‌شود. مدل زنجیره مارکوف با توجه به انعطاف‌پذیری مدل‌سازی و عملکرد بالا کاربردی است.

شرایط آب‌وهوایی وابسته به زمان به‌منظور تخمین زوال قطعات مسیر به روشی مجزا مورد استفاده قرار گرفته است. مدل خطر نمایی ارائه شده امکان تخمین احتمالات انتقال مارکوف را برای فواصل زمانی دلخواه می‌دهد. مزایای این مدل‌ها این است که باتوجه به اطلاعات دو زمان بازرسی، خرابی آینده را پیش‌بینی می‌کنند و به داده‌های تاریخی گسترده نیاز ندارند. مدل مارکوف پیشنهاد شده کاربرد گسترده‌ای در بسیاری از زمینه‌ها دارد. با این حال، احتمال گذار مارکوف با این واقعیت مشخص می‌شود که روند زوال به تدریج زوال گذشته بستگی ندارد. علاوه بر این، هیچ تضمینی وجود ندارد که فرآیند زوال واقعاً ویژگی‌های مارکوف را برآورده کند، به‌ویژه در مواردی که کل مدت زمان عملیات زیرساخت برآورد می‌شود. این محدودیت انگیزه‌ای برای توسعه این مطالعه ایجاد کرده است که انتقال چندحالتی بین حالت‌های شرایط و زمان عملیات تاریخی را در نظر می‌گیرد.

که بتواند ویژگی‌های خاص هر قطعه مسیر را در نظر بگیرد. در این مقاله مدل خطر برای برآورد زوال یک قطعه مسیر بر اساس اطلاعات خاص استفاده شده است و با استفاده از این نتایج، یک روش دومرحله‌ای برای تخمین احتمالات انتقال مارکوف ارائه شده است. هدف مدل خطر تعیین احتمالات انتقال است که فرآیند زوال هر قطعه مسیر را مشخص می‌کند همچنین روشی برای تخمین احتمالات گذار مارکوف برای پیش‌بینی خرابی یک قطعه مسیر و تعیین چرخه‌های زیرکوبی پیشنهاد گردیده است. پیشرفت انتقال بین مجموعه‌ای از حالت‌های وضعیت که شرایط هر قطعه مسیر را نشان می‌دهند با استفاده از مدل‌های خطر نمایی بیان شدند و به کمک داده‌های بازرسی دوره‌ای، از روش حداکثر درست‌نمایی برای تعیین پارامترهای مدل خطر نمایی استفاده شده است. داده‌های بازرسی ناهمگن مربوط به ویژگی‌های ساختاری خاص و شرایط استفاده با در نظر گرفتن یک ناحیه مشخص در این مطالعه یکسان لحاظ شده است و داده‌های

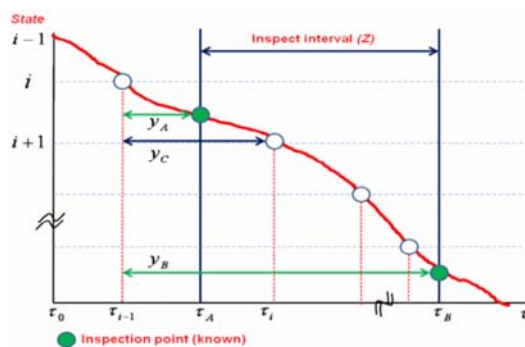
۳-۶-۱- احتمالات انتقال مارکوف

که وضعیت مطلوبی دارد $i=4$ ، و مقدار متغیر حالت J در نظر گرفته می‌شود که با پیشرفت زوال، افزایش می‌یابد. مقدار $J=i$ نشان می‌دهد که یک بخش به پایان عمر خود رسیده و نیاز به بهبود دارد. اطلاعات مربوط به روند تخریب یک بخش روسازی را می‌توان از طریق بازرسی‌های دوره‌ای به دست آورد. با این حال، کسب اطلاعات در مورد وضعیت بر اساس بازرسی مداوم دشوار است.

در این مورد، دو بازرسی دوره‌ای در زمان‌های τ_A و τ_B در نظر گرفته می‌شود. فرض بر این است که در زمان τ_A حالت شرط مشاهده شده توسط بازرسی $i(i = 1, \dots, J - 1)$ است.

به‌منظور تخمین مدلی برای پیش‌بینی خرابی بخش‌های مسیر، لازم است داده‌های سری زمانی در مورد وضعیت بخش‌ها جمع‌آوری شود. روند زوال یک بخش مسیر ریلی بر حسب زمان $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i$ بیان می‌شود. در واقع، عدم قطعیت در پیشرفت زوال مسیر وجود دارد و علاوه بر این، وضعیت در هر نقطه از محور زمانی تا هنگامی که بازرسی انجام شد، محدود می‌شود. در شکل (۷)، τ نشان دهنده زمان است.

خراب شدن روسازی مسیر ریلی بلافاصله پس از بهره‌برداری در زمان τ_1 شروع می‌شود. وضعیت یک بخش با وضعیت J نشان دهنده یک متغیر حالت $i(i=1, \dots, J)$ بیان می‌شود. برای بخشی



شکل ۷. طرح بازرسی دوره ای وضعیت

ساده‌تر شدن، احتمالات انتقال مارکوف برای پیش‌بینی خرابی یک بخش روسازی با استفاده از طرح بازرسی دوره‌ای تعریف شده‌اند. وضعیت مشاهده شده بخش مسیر در زمان τ_A با استفاده از متغیر حالت $h(\tau_A)$ بیان می‌شود. اگر حالت وضعیت مشاهده شده در زمان $\tau_A = i$ باشد، متغیر حالت $h(\tau_A) = i$ می‌باشد. یک احتمال انتقال مارکوف، با توجه به حالت وضعیت $h(\tau_A) = i$ که در زمان τ_A مشاهده می‌شود، احتمال تغییر حالت وضعیت در زمان آینده (مثلاً τ_B) به $h(\tau_B) = j$ را تعریف می‌کند. به این معنا که:

$$Prob[h(\tau_B) = j | h(\tau_A) = i] = \pi_{ij}$$

$$\pi_{ij} \geq 0$$

$$\pi_{ij} = 0 \quad (i > j)$$

$$\sum_{j=1}^J \pi_{ij} = 1$$

ماتریس احتمالات گذار مارکوف را می‌توان با استفاده از احتمالات انتقال بین هر دو وضعیت (i, j) به صورت زیر تعریف کرد.

$$\Pi = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \dots & \pi_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \pi_{JJ} \end{bmatrix}$$

است. از آنجایی که تا زمانی که هیچ تعمیری انجام نشود، خرابی ادامه دارد ($i > j$) و $\pi_{ij} = 0$ می‌باشد (Kobayashi et al., 2010).

وقتی که:

(۴)

پیشرفت وخامت در زمان‌های آینده نامشخص است. به این معنا که علی‌رغم اینکه در زمان بازرسی دوره‌ای، تغییر در وضعیت قابل مشاهده است اما به دست آوردن اطلاعات در مورد زمان‌هایی که این انتقال‌ها در آن رخ می‌دهند ممکن نیست. مدت زمان بین دو بازرسی با Z بیان می‌شود. روند انتقال وضعیت برای بخش روسازی مسیر ریلی نامشخص است و پیش‌بینی وضعیت‌های آینده نمی‌تواند به طور قطعی انجام شود. احتمال انتقال مارکوف برای نشان دادن انتقال نامشخص وضعیت یک بخش در طول دونقطه از زمان استفاده می‌شود. احتمالات انتقال مارکوف را می‌توان برای فواصل زمانی دلخواه تعریف کرد. برای

احتمال انتقال مارکوف، انتقال بین حالت‌های وضعیت‌ها را در دوزمان معین τ_A و τ_B نشان می‌دهد، بنابراین، واضح است که مقادیر یک احتمال انتقال برای بازه‌های زمانی مختلف متفاوت

۳-۶-۲-مدل خطر نمایی

یک بخش مسیر، فرض می‌شود که سطح شرایط در زمان τ_{i-1} از $i-1$ به i تغییر کرده است. زمان τ_{i-1} مبدأ $\mathcal{Y}_i = 0$ محور زمان در نظر گرفته می‌شود. زمان نشان داده شده توسط محور زمان نمونه از هم اکنون به عنوان "نقطه زمانی" نامیده می‌شود و با محور زمانی متفاوت است. مشاهده می‌شود که $\mathcal{Y}_A = \tau_A - \tau_{i-1}$ ، $\mathcal{Y}_B = \tau_B - \tau_{i-1}$ می‌باشد. اطلاعات مربوط به وضعیت i در ابتدای زمان τ_{i-1} را نمی‌توان در طرح بازرسی دوره‌ای به دست آورد. بنابراین، نقاط زمانی \mathcal{Y}_A و \mathcal{Y}_B در محور زمان نمونه نیز نمی‌توانند به درستی به دست آیند. با این وجود، می‌توان از اطلاعات موجود در $\mathcal{Y}_C = \tau_C - \tau_A \in [0, Z)$ استفاده کرد. برای سهولت توصیف، فرض بر این است که اطلاعات در مقاطع زمانی به منظور توسعه مدل شناخته شده است، علی‌رغم اینکه این فرض لزوماً ضروری

احتمال انتقال مارکوف را می‌توان با استفاده از یک مدل خطر که فرآیند زوال یک بخش مسیر ریلی را نشان می‌دهد، تعریف کرد. اطلاعات به دست آمده از بازرسی نه تنها شامل داده‌هایی درباره وضعیت یک بخش مسیر است، بلکه داده‌های مجزای خاص برای بخش مسیر مانند ویژگی‌های ساختاری، شرایط اقلیمی، یا شرایط استفاده از روسازی را نیز شامل می‌شود. فواصل بازرسی نیز ممکن است از یک بخش به بخش دیگر متفاوت باشد. به منظور تخمین احتمالات انتقال مارکوف بر اساس چنین داده‌های متنوعی، مطلوب است که یک روش تخمینی ایجاد شود که ویژگی‌های خاص هر بخش مسیر را در نظر بگیرد. فرآیند زوال یک بخش مسیر معین را می‌توان با استفاده از مدل خطر فرموله کرد. در این مقاله مدل خطر به طور مختصر معرفی می‌شود تا برخی مفاهیم اساسی روشن شود. برای فرآیند خرابی

است. تابع توزیع $F_i(y_i)$ نشان دهنده احتمال تجمعی انتقال در حالت وضعیت از i به $i+1$ است، زمانی که i در نقطه زمانی اولیه $y_i = 0$ (زمان τ_A) و برای بازه اندازه‌گیری شده در طول محور نقطه زمانی y_i ($\tau_{i-1} + y_i$) زمان نمونه تنظیم شود. بنابراین، با استفاده از احتمال تجمعی $F_i(y_i)$ ، احتمال $S_i(y_i)$ یک انتقال در حالت وضعیت i در طول بازه زمانی $y_i = 0$ تا $y_i \in [0, \infty)$ توسط $S_i(y_i)$ تعریف می‌شود.

$$F_i(y_i) = \int_0^{y_i} f_i(\zeta_i) d\zeta_i$$

$$S_i(y_i) = \text{Prob}\{\zeta_i \geq y_i\} = 1 - F_i(y_i) \quad (5)$$

تابع احتمال $\lambda_i(y_i)$ که به عنوان تابع خطر از آن یاد می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\lambda_i(y_i) = \frac{f_i(y_i)}{S_i(y_i)} = \frac{\frac{dS_i(y_i)}{dy_i}}{S_i(y_i)} = \frac{d}{dy_i} (-\log S_i(y_i)) \quad (6)$$

خطر $\lambda_i(y_i) = \theta_i$ ، احتمال $S_i(y_i)$ که امید به زندگی وضعیت i بزرگتر از y_i می‌شود به صورت زیر بیان می‌شود.

$$S_i(y_i) = \exp[-\int_0^{y_i} \lambda_i(u) du] = \exp(-\theta_i y_i)$$

تابع چگالی احتمال $f_i(\zeta_i)$ امید به زندگی وضعیت i به صورت زیر داده می‌شود.

$$f_i(\zeta_i) = \theta_i \exp(-\theta_i \zeta_i) \quad (8)$$

۳-۶-۳- تعیین احتمالات انتقال مارکوف

احتمالات انتقال مارکوف بر اساس مدل خطر نمایی با سه وضعیت بر اساس سرعت زوال بیان می‌شود.

مورد ۱: حفظ وضعیت فعلی تا زمان بازرسی بعدی

حالت وضعیت با بازرسی بعدی در نقطه زمانی $y_B = y_A + Z$ مشاهده شود با موارد زیر بیان می‌شود.

احتمال انتقال مارکوف $[h(y_B) = i | h(y_A) = i]$ به صورت π_{ii} نشان داده می‌شود. برای یک وضعیت که با بازرسی در نقطه زمانی y_A به دست می‌آید، احتمال اینکه همان

$$\pi_{ii} = \text{Prob}[h(y_B) = i | h(y_A) = i]$$

$$= \frac{S_i(y_A + Z_i)}{S_i(y_A)} = \frac{\exp\{-\theta_i(y_A + Z_i)\}}{\exp(-\theta_i y_A)} = \exp(-\theta_i Z) \quad (9)$$

ثابت بماند، $(S_i = y_A + Z_i, (Z_i \in [0, Z]))$ وضعیت حالت در نقطه زمانی $y_A + Z_i$ به $i+1$ تغییر می کند و (3) بین y_B و $y_A + Z_i$ ثابت می ماند.

اگرچه زمان دقیق انتقال حالت از i به $i+1$ را نمی توان با بازرسی دوره ای شناسایی کرد، می توان به طور موقت فرض کرد که انتقال در نقطه زمانی $(y_A + \bar{Z}_i) \in [y_A, y_B)$ اتفاق می افتد. با این حال، توضیح بالا برای یک مقدار ثابت $\bar{S}_i = y_A + \bar{Z}_i$ اعمال شده است. امید به زندگی ζ_i یک وضعیت شرطی i در واقع یک متغیر تصادفی است، بنابراین ممکن است \bar{Z}_i در محدوده $[0, Z]$ تغییر کند. احتمال انتقال مارکوف مبنی بر تغییر حالت شرط از i به $i+1$ در طول نقاط زمانی y_A و y_B به صورت زیر بیان می شود.

$$\begin{aligned} \pi_{ii+1} &= \text{prob}[h(y_B) = i + 1 | h(y_A) = i] \\ &= \int_0^Z q_{i+1}(Z_i | \zeta_i \geq y_A) dz_i \\ &= \int_0^Z \theta_i \exp(-\theta_{i+1}Z) \exp\{-(\theta_i - \theta_{i+1})Z_i\} dz_i \\ &= \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{-\exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1}Z)\} \end{aligned}$$

بماند، $(\bar{S}_i = y_A + \bar{Z}_i \in [y_A, y_B))$ وضعیت حالت در نقطه زمانی به $i+1$ تغییر می کند $(\bar{S}_i = y_A + \bar{Z}_i)$ وضعیت حالت $i+1$ در طول بازه زمانی ثابت می ماند $\bar{S}_i = y_A + \bar{Z}_i$ و در این نقطه به $i+2$ تغییر می کند. (4) سطح حالت به j تغییر می کند در نقطه ای از زمان $\bar{S}_{j-1} (\leq y_B)$ تا نقطه زمانی y_B ثابت می ماند. بنابراین، احتمالات انتقال مارکوف π_{ij} که یک انتقال در حالت وضعیت از i به $j (j \geq i + 2)$ بین نقاط زمانی بازرسی y_A و y_B رخ می دهد به صورت: (Mishalani and Madanat, 2002, An et al., 2018) (Kobayashi et al., 2010, TSUDA et al., 2006)

$$\begin{aligned} \pi_{ij} &= \text{prob}[h(y_B) = j | h(y_A) = i] \\ &= \int_0^Z \int_0^{Z-Z_i} \dots \int_0^{Z-\sum_{m=i}^{j-1} Z_m} q_j(Z_i, \dots, Z_{j-1} | \zeta_i \geq y_A) dz_i \dots dz_{j-1} \\ &= \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) \end{aligned}$$

می توان نتیجه گرفت که $0 < \pi_{ij} < 1$ مستقل از اندازه نسبی بین $(\theta_k$ و $\theta_{m+1})$ و $(\theta_k$ و $\theta_m)$ است.

$$\prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} = 1 \quad k = i$$

جایی که Z فاصله بین دو زمان بازرسی را بیان می کند. هنگامی که یک تابع خطر نمایی استفاده می شود، احتمال انتقال π_{ii} تنها به نرخ خطر θ_i و بازه بازرسی Z وابسته است. بنابراین، بدون استفاده از اطلاعات قطعی در نقاط زمانی y_A و y_B امکان تخمین احتمالات انتقال وجود دارد (An et al., 2018, Kobayashi et al., 2010)

مورد ۲: تغییر وضعیت از i به $i+1$ در طول بازه بازرسی Z

با استفاده از یک تابع خطر نمایی احتمال تغییر حالت وضعیت در نقاط زمانی بازرسی y_A و y_B از i به $i+1$ را می توان بدست آورد.

این انتقال می تواند اتفاق بیفتد اگر (1) وضعیت حالت i بین یک نقطه زمانی y_A تا یک نقطه زمان $S_i = y_A + Z_i$

(۱۰)

که در آن $\pi_{i,i+1} > 0$ صرف نظر از اندازه نسبی بین θ_j و θ_i برآورده می شود. فرض $\theta_i \neq \theta_{i+1}$ دلالت بر $\pi_{i,i+1} < 1$ دارد. تابع توزیع و تابع چگالی احتمال طول دوره ای که در آن حالت j ثابت می ماند به ترتیب با $F_j(y_j)$ و $f_j(y_j)$ نشان داده می شود. تابع خطر مربوط به حالت j با $\lambda_j(y_j) = \theta_j$ (An et al., 2018) (Kobayashi et al., 2010, TSUDA et al., 2006)

مورد ۳: تغییر وضعیت از j در طول بازه بازرسی Z

انتقال وضعیت حالت از i به j در بازه زمانی $[y_A, y_B)$ می تواند رخ دهد اگر (1) وضعیت حالت i در بازه زمانی y_A ثابت

(۱۱)

$$\prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} = 1 \quad k = j$$

π_{ij} با استفاده از شرایط احتمالات گذار مارکوف به صورت زیر مرتب می‌شود.

$$\pi_{ij} = 1 - \sum_{j=i}^{J-1} \pi_{ij} \quad (12)$$

۳-۶-۴- تنظیم زمان احتمال انتقال مارکوف

همان‌طور که در معادلات ۹ تا ۱۲ نشان داده شده است. احتمالات انتقال مارکوف به مقدار فاصله بازرسی Z بستگی دارد. برای وضوح بیان، احتمال انتقال مارکوف به صورت $\pi_{ij}(Z)$

$$\Pi(Z) = \begin{bmatrix} \pi_{11}(Z) & \cdots & \pi_{1J}(Z) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{JJ}(Z) \end{bmatrix} \quad (13)$$

برای یک مقدار صحیح n دو بازه بازرسی Z و nZ در نظر گرفته می‌شود. ماتریس‌های احتمالات انتقال مارکوف $\Pi(nz)$ و $\Pi(z)$ فرآیند زوال یکسانی را برای دو بازه زمانی مختلف توصیف می‌کنند. بنابراین، ماتریس احتمالات گذار مارکوف $\Pi(nz)$ بر حسب ماتریس احتمالات انتقال مارکوف به صورت $\{ \Pi(z) \}^n$ بیان می‌شود. شرط بیان شده در بالا به عنوان شرایط تعدیل زمان ماتریس احتمال انتقال مارکوف نامیده می‌شود. برای رسیدن به این شرط، یک ساختار ریاضی ثابت بین احتمالات انتقال مارکوف π_{ij} باید برقرار باشد (Kobayashi et al., 2010, TSUDA et al., 2006).

۳-۷-۳- برآورد احتمالات گذار مارکوف

۳-۷-۳-۱- محتویات داده‌های بازرسی دوره‌ای

فرض کنید داده‌های بازرسی دوره‌ای همگن در K بخش مسیر ریلی موجود باشد. یک نمونه بازرسی k ($k = 1, \dots, K$) در بازرسی دوره‌ای پیوسته را توصیف می‌کند که در زمان‌های (τ_A) و (τ_B) انجام می‌شوند و شرایط مربوطه رتبه‌بندی $(h\tau_A)$ و $(h\tau_B)$ اندازه‌گیری شده در آن زمان‌ها را بیان می‌کند. بر اساس داده‌های بازرسی فوق، بازه بازرسی یک نمونه k به صورت $(Z^k = \tau_B^k - \tau_A^k)$ تعریف می‌شود.

علاوه بر این، یک متغیر ساختگی بر اساس الگوهای پیشرفت زوال بین دوزمان بازرسی برای هر $\delta_{ij}^k(i, j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K)$ با موارد زیر تعریف می‌شود.

$$\delta_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{وقتی که } h(\tau_A^k) = i, h(\tau_B^k) = j \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

فرآیند زوال برای یک داده نمونه به صورت $\lambda_i^k(y_i^k) = \theta_i^k (i = 1, \dots, J-1) k (k = 1, \dots, K)$ نشان می‌دهند، از آنجایی که حالت وضعیت J حالت جذب یک زنجیره مارکوف است و $\pi_{JJ} = 1$ نرخ خطر تعریف نشده است. توصیف روند زوال یک بخش مسیر در رابطه با بردار x^k به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

علاوه بر این، ویژگی‌های ساختاری، شرایط استفاده و شرایط آب هوایی از یک بخش مسیر که بر سرعت زوال یک بخش تأثیر می‌گذارد، با بردار $x^k = (x_1^k, \dots, x_m^k)$ که در آن $x_m^k (m = 1, \dots, M)$ مقدار یک متغیر مشخصه m مشاهده در داده‌های نمونه k را نشان می‌دهد. اطلاعات موجود در داده‌های نمونه بازرسی k را می‌توان به صورت $\Xi^k = (\delta_{ij}^k, Z^k, x^k)$ نشان داد. از سوی دیگر، تابع خطر نمایی

نرخ خطر θ_i^k ($i = 1, \dots, J - 1; k = 1, \dots, K$) که فرآیند زوال یک بخش مسیر را مشخص می‌کند، در رابطه با بردار x^k به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$\theta_i^k = x^k \beta_i \quad (14)$$

ارائه شده توسط این مقاله امکان تخمین احتمالات انتقال مارکوف را برای هر بخش جداگانه فراهم می‌کند. با این حال، تعیین یک استراتژی تعمیر بهینه برای هر بخش مسیر می‌تواند کاربرد آن را در عملکرد مدیریت روسازی پیچیده کند. به همین دلیل، در بسیاری از موارد می‌توان آن را راحت‌تر فرض کرد که یک تخمین احتمال انتقال میانگین مارکوف را برای آن بخش‌ها فرض می‌شود. تخمین میانگین احتمال انتقال مارکوف با استفاده از مدل خطر نمایی برآورد شده در فصل بعد توضیح داده شده است. علاوه بر این، با استفاده از مدل‌های خطر نمایی می‌توان یک شاخص مدیریت ریسک برای مدیریت روسازی نیز استخراج کرد.

که در آن $\beta_i = (\beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,M})$ بردار ضرایبی از پارامترهای ناشناخته است $\beta_{i,m} = (m = 1, \dots, M)$ و نماد نشان می‌دهد که بردار جایجا شده است. قدرمطلق β_i معیاری از تاثیر عامل ناهمگن بر نرخ وضعیت i در هندسه مسیر است. برای به دست آوردن احتمالات انتقال مارکوف، اولین مرحله شامل تخمین تابع خطر نمایی $\lambda_i^k(y_i^k) = \theta_i^k$ بر اساس اطلاعات نمونه بازرسی $\Xi^k = (k = 1, \dots, K)$ است. در بخش زیر تخمین تابع خطر نمایی توضیح داده شده است. به عنوان گام دوم، احتمالات انتقال مارکوف با استفاده از توابع خطر نمایی یافت شده در مرحله قبل تخمین زده می‌شود. روش

۳-۷-۲- برآورد مدل خطر

(\bar{Z}^k) که در آن داده‌ها مشاهده شده است، بستگی دارد. برای وضوح بیان، احتمال انتقال π_{ij} به عنوان تابعی از داده‌های اندازه‌گیری شده (\bar{Z}^k, \bar{x}^k) بدست آمده از بازرسی‌های دوره‌ای و پارامترهای ناشناخته (β_i) در $(\bar{Z}^k, \bar{x}^k; \beta_i)$ بیان می‌شود. اگر پیشرفت زوال بخش‌های مسیر در نمونه K به طور متقابل مستقل فرض شود، تابع لگاریتم درست‌نمایی که تابع احتمال هم‌زمان الگوی انتقال زوال را برای همه نمونه‌های بازرسی بیان می‌کند با موارد زیر بیان می‌شود (An et al., 2018) (Kobayashi et al., 2010, TSUDA et al., 2006).

اطلاعات $\Xi^k = (\delta_{ij}^k, \bar{Z}^k, \bar{x}^k)$ را می‌توان در رابطه با نمونه بازرسی k به دست آورد، جایی که نماد "-" یک اندازه‌گیری واقعی را نشان می‌دهد. احتمالات انتقال مارکوف را می‌توان بر حسب توابع خطر بیان کرد.

اگرچه نرخ خطر θ_i^k ($i = 1, \dots, J - 1; k = 1, \dots, K$) هر وضعیت در احتمالات انتقال مارکوف موجود است، می‌توان آن را با معادله (۱۴) نشان داد. هنگام استفاده از یک بخش مسیر علاوه بر بردار (\bar{x}^k) ، احتمال انتقال زوال نیز به بازه بازرسی

$$\begin{aligned} \ln[\Gamma(\beta)] &= \ln \left[\prod_{i=1}^{J-1} \prod_{j=1}^J \prod_{K=1}^K \{\pi_{ij}(\bar{Z}^k, \bar{x}^k; \beta)\}^{\delta_{ij}^k} \right] \\ &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^J \sum_{j=i}^J \delta_{ij}^k \ln[\pi_{ij}(\bar{Z}^k, \bar{x}^k; \beta)] \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن \bar{x}^k و δ_{ij}^k و \bar{Z}^k همه توسط مقادیر بازرسی تعیین می‌شوند و β_i ($i = 1, \dots, J - 1$) پارامترهایی هستند که باید تخمین زده شوند. تخمین پارامترهای β را می‌توان با حل شرایط بهینه حاصل از به حداکثر رساندن تابع معادله (۱۵) \log -likelihood به دست آورد.

$$\frac{\partial \ln[\Gamma(\beta)]}{\partial \beta_{i,m}} = 0, (i = 1, \dots, J - 1; m = 1, \dots, M) \quad (16)$$

۳-۷-۳- تخمین چرخه کوبیدن

دوره سپری شده مورد انتظار از زمان رسیدن به وضعیت مورد نظر تا رسیدن به وضعیت زیر در نتیجه پیشرفت زوال (که به عنوان امید به زندگی مورد انتظار یک رتبه نامیده می شود) با استفاده از تابع بقا $S_i(y_i^k)$ به صورت زیر تعریف می شود (An et al., 2018) (Kobayashi et al., 2010, TSUDA et al., 2006)

$$RMD_i^k = \int_0^{\infty} S_i(y_i^k) dy_i^k \quad (17)$$

با تعریف تابع بقا $S_i(y_i^k)$ بر حسب تابع خطر نمایی مانند معادله (۸)، امید به زندگی مورد انتظار یک رتبه بندی با موارد زیر بیان می شود.

$$RDM_i^k = \int_0^{\infty} \exp(-\theta_i^k y_i^k) dy_i^k = \frac{1}{\theta_i^k} \quad (18)$$

همان طور که قبلاً گفته شد، هنگامی که وضعیت قطعه مسیر k به وضعیت بدتر ۱ منتقل می شود، عملیات زیرکوبی مورد نیاز است. بنابراین، چرخه زیرکوبی، TC^k قطعه مسیر k ، مجموع امید به زندگی حالت های وضعیت ۴، ۳ و ۲ است.

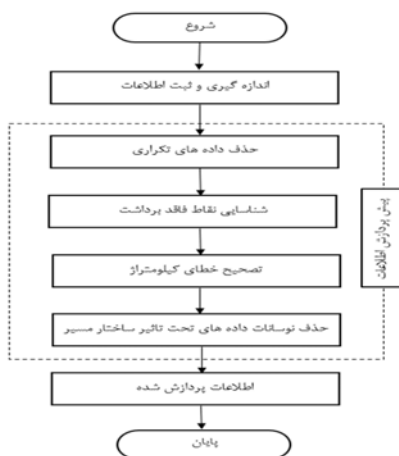
$$TC^k = \sum_{i=1}^3 RDM_i^k \quad (19)$$

۴- نتایج مطالعه موردی

۴-۱- پیش پردازش داده ها

- ۱) حذف داده های تکراری در برداشت توسط ماشین اندازه گیری خط
- ۲) مشخص کردن نقاط فاقد برداشت در بلاک
- ۳) تصحیح خطای کیلومترژ در برداشت های مختلف
- ۴) حذف مقدار نوسانات داده های تحت تأثیر ساختار مسیر

در این مقاله داده ها به صورت خام از شرکت راه آهن جمهوری اسلامی ایران دریافت شده و جهت استفاده در مدل نیاز به بررسی و پردازش دارد، پردازش های انجام شده روی داده ها جهت تبدیل به داده های پایه برای تجزیه و تحلیل وضعیت خط انجام گرفته شده است. مراحل تبدیل داده های خام ماشین اندازه گیری وضعیت مسیر به داده های پردازش شده به شرح ادامه می باشد.



شکل ۸ الگوریتم و فرآیند پردازش اطلاعات

۴-۲- نرمال سازی داده ها

سال، ۶ ماه اول سال و ۶ ماه دوم سال، به بررسی اثر دو عامل میانگین بارندگی و میانگین دما پرداخته شده است. توجه داشته باشید که بخش هایی با سوزن نیز ممکن است بر روند تخریب هندسه مسیر تأثیر بگذارند. از این رو در این مقاله این بخش مسیر تجزیه و تحلیل شده و بخش های بدون سوزن در بررسی لحاظ گردیده است. ابعاد و واحدهای اندازه گیری دو عامل میانگین بارندگی و دما متفاوت است. بنابراین در این مطالعه جهت ختنی کردن اثر ناهمگونی در ابعاد و واحد اندازه گیری عوامل ناهمگن با استفاده از روش نرمال سازی حداقل - حداکثر، نرمال سازی انجام شده است، به طوری که نتایج در بازه [۰، ۱] تبدیل شده است. تابع نرمال ساز به شرح زیر است.

$$x^* = \frac{x - \min}{\max - \min}$$

که در آن x = مقدار اصلی؛ \max = حداکثر مقدار داده های نمونه و \min = حداقل مقدار داده های نمونه است.

باتوجه به محدودیت داده های بازرسی دوره ای در رابطه با عوامل ناهمگن، به دلیل استفاده از یک ناحیه ریلی برای انجام این تحقیق تعداد عوامل اثرگذار بر روند تخریب هندسه مسیر که تحت تأثیر عوامل ناهمگن مختلفی است و با توجه به مرور ادبیات در این مطالعه از نظر شرایط زیرساخت، سرعت حرکت قطار، میانگین و بارمحوری یکسان است و تناژ عبوری به دلیل وجود تقاضای بیشتر از ظرفیت در مسیر در وضعیت نهایت بهره برداری است و در تقسیم بندی انجام شده یکسان فرض شده است و به خاطر وابستگی عامل شرایط جوی و آب و هوا با زمان این عامل برای طبقه بندی انجام شده متفاوت در نظر گرفته شده است. در این مقاله با تقسیم بندی شرایط آب و هوایی به دو دوره در

(۲۰)

۴-۳- نتایج تخمین پارامترهای ناشناخته

استفاده شده است. مقادیر p -value برای نتایج تخمینی هر پارامتر به دست آمده همگی کوچکتر از ۰،۰۵ هستند، به این معنی که نتایج برآورد شده از نظر آماری در سطح معنادار ۰،۰۵، معنی دار هستند. نتایج تخمین $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}, (i = 3, 2)$ منعکس کننده تأثیر عوامل ناهمگن بر روند تخریب هندسه مسیر است. جهت تأثیر پارامترهای ناشناخته بر مدل خطر، قدرمطلق مقادیر $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}, (i = 3, 2)$ در بررسی لحاظ شده است. در جدول (۱) عوامل ناهمگن ارائه شده است.

در این مقاله به دلیل محدودیت های موجود در دوره های برداشت داده ها برای تخمین پارامترها فرض شده است که کل مسیر در یک قطعه متمرکز شده است و تمام قطعات دارای رفتار و نرخ خرابی یکسانی هستند؛ از این رو برای جبران کمبود دوره های برداشت این فرض در این مطالعه اعمال شده است. با داده های نمونه جمع آوری و پردازش شده و بر اساس معادلات (۱۴)-(۱۶)، روش بهینه سازی حداقل درست نمایی در پایتون برای تخمین پارامترهای ناشناخته $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}, (i = 3, 2)$

جدول ۱. ناهمگون تخریب هندسه مسیر

ردیف	عوامل ناهمگن	نماد	توضیحات
۱	میانگین بارندگی	x_1^k	میانگین بارندگی در شش ماه های تقسیم شده اول و دوم سال
۲	میانگین دما	x_2^k	میانگین دما در شش ماه های تقسیم شده اول و دوم سال

مرتبط با شرایط هر دسته در زیر ارائه شده است. بر اساس معادلات (۲۱)-(۲۲) پارامترهای ناشناخته که در مدل خطر نمایی باید تخمین زده شوند شامل $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}, (i = 3, 2)$ است، در این مطالعه از روش تخمین حداکثر درست نمایی برای تخمین مقادیر این پارامترها استفاده شده است. مقدار پارامترهای ناشناخته در جداول (۲)-(۳) ارائه شده است.

در این مطالعه باتوجه به یکسان بودن مسیر، در تمامی بخش ها فرض شده است که سایر عوامل تأثیرگذار بر نرخ خرابی مسیر یکسان است و تنها اثرگذاری دو عامل میانگین بارندگی و میانگین دما در مدل بررسی شده است. در ادامه با استفاده از داده های مرتبط با عوامل ناهمگن و تقسیم بندی ناحیه از نظر شرایط آب و هوایی به نیم سال اول و دوم، معادلات تابع خطر

$$\phi_i^A = \beta_{i1}^A + 0.2072\beta_{i2}^A + 0.3091\beta_{i3}^A \quad (21)$$

$$\phi_i^B = \beta_{i1}^B + 0.2161\beta_{i2}^B + 0.2365\beta_{i3}^B \quad (22)$$

جدول ۲. نتایج برآورد پارامترهای ناشناخته در مدل پیشنهادی A

وضعیت	β_{i1}	β_{i2}	β_{i3}
۳	۰,۰۸۲۷	۱,۶۹۱۰	-۰,۷۴۷۶
۲	۰,۷۳۳۰	۰,۷۳۷۳	-۰,۱۹۷۲

جدول ۳. نتایج برآورد پارامترهای ناشناخته در مدل پیشنهادی B

وضعیت	β_{i1}	β_{i2}	β_{i3}
۳	۰,۱۳۷۳	۱,۵۴۸۰	-۰,۶۹۳۴
۲	۰,۰۱۶۳	۱,۷۱	-۰,۰۰۶۸

سپس با کمک پارامترهای تخمین زده شده میزان خطر در هر وضعیت را برای دوره‌های مورد مطالعه به دست می‌آوریم، و در ادامه با کمک معادلات (۹)-(۱۲) ماتریس احتمال انتقال را برای هر دوره جداگانه حساب می‌کنیم.

جدول ۴. احتمالات انتقال برای واحد تعمیر و نگهداری مسیر A از برآورد مارکوف

وضعیت	۳	۲	۱
۳	۰,۷۱۷۴	0.2555	0.0271
۲	۰	۰,۸۲۴۰	0.1760
۱	۰	۰	۱

جدول ۵. احتمالات انتقال برای واحد تعمیر و نگهداری مسیر B از برآورد مارکوف

وضعیت	۳	۲	۱
۳	۰,۶۸۹۳	0.2723	0.0384
۲	۰	۰,۷۷۸۰	0.2220
۱	۰	۰	۱

۴-۴- ارزیابی نتایج مدل مارکوف

است. سپس نتایج تخمین زده شده توسط مدل با نتایج واقعی مقایسه می‌شود. نتایج در جدول ۶ و ۷ ذکر شده است.

جهت بررسی و ارزیابی مدل، ابتدا ماتریس احتمال انتقال مارکوف وضعیت واقعی مسیر مورد مطالعه بر اساس احتمال انتقال نسبی در امتداد بخش‌های مسیر با رابطه (۲۳) محاسبه شده

$$\bar{\pi}_{ij} = \frac{\text{تعداد}\{h(t_A=i), h(t_B=j), k \in [1, 2, \dots, k]\}}{\text{تعداد}\{h(t_A = |i|), k \in [1, 2, \dots, k]\}} \quad (23)$$

در ادامه به کمک معادله (۲۳) ماتریس احتمال انتقال شرایط واقعی خط محاسبه می‌شود.

جدول ۶. احتمالات انتقال برای واحد نگهداری مسیر A با استفاده از روش ساده شده

وضعیت	۳	۲	۱
۳	0.7049	0.2736	0.0215
۲	0	0.8344	0.1656
۱	0	0	1

جدول ۷. احتمالات انتقال برای واحد نگهداری مسیر B با استفاده از روش ساده شده

وضعیت	۳	۲	۱
۳	0.7046	0.2636	0.0318
۲	0	0.7758	0.2242
۱	0	0	1

وجود دارد، لذا این نتیجه حاصل شده است که مدل توانسته است به خوبی وضعیت مسیر را پیش‌بینی کند.

همان‌طور که از نتایج تخمین زده شده و نتایج واقعی ماتریس احتمال انتقال وضعیت مسیر مشخص است اختلاف بسیار ناچیزی بین نتایج تخمین زده شده توسط مدل و نتایج واقعی

۴-۵- تخمین چرخه کوبیدن

زیرکوبی بررسی شده است. به کمک معادلات ۱۷ و ۱۸ ابتدا تابع بقا را برای هر وضعیت به دست آورده و بعد به کمک معادله (۱۹) چرخه زیرکوبی تخمین زده شده است. نتایج به دست آمده در جداول (۸) - (۹) ارائه شده است.

تخمین چرخه زیرکوبی به مدیران این بخش جهت برنامه‌ریزی بهینه کمک می‌کند تا بتوانند عملیات تعمیر و نگهداری را برای مسیر ریلی به صورت بهتر انجام دهند. در این مطالعه چرخه زیرکوبی باتوجه به زمان رسیدن به وضعیت موردنظر جهت

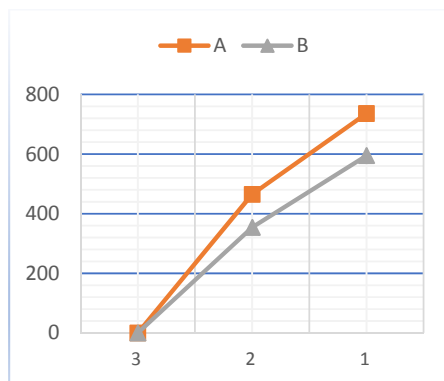
جدول ۸. میزان خطر و طول عمر واحد تعمیر و نگهداری مسیر A

وضعیت	θ_i^A	RDM_i^A (روز)
۳	۰,۶۶۴۱	۲۷۱,۰۱۹۷
۲	۰,۳۸۷۰	۴۶۵,۰۸۸۶

جدول ۹. میزان خطر و طول عمر واحد تعمیر و نگهداری مسیر B

وضعیت	θ_i^B	RDM_i^B (روز)
۳	۰.7442	241.8796
۲	۰.5077	354.5378

نتایج حاصل از تخمین چرخه زیرکوبی به کمک تغییر وضعیت هندسه مسیر در نمودار (۹) برای دو دوره مختلف نشان داده شده است.

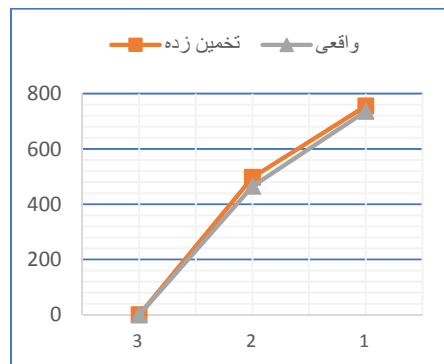


شکل ۹. تخمین چرخه زیرکوبی برای دوره‌های A و B

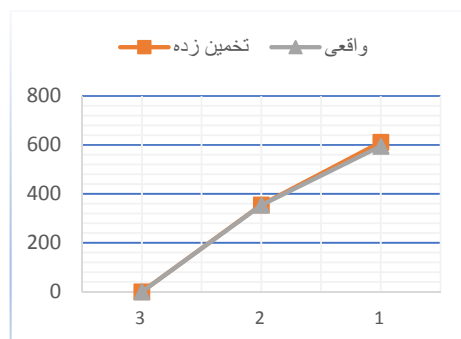
همان‌طور که از نمودار تخمین چرخه زیرکوبی مشخص است، دوره زیرکوبی در وضعیت B که تحت تأثیر بیشتر عوامل آب‌وهوایی قرار می‌گیرد کوتاه‌تر می‌باشد و الزام بهبود توسط ماشین زیرکوب برای این دوره نسبت به شرایط دوره A زودتر لحاظ می‌شود.

۴-۶- ارزیابی چرخه‌های زیرکوبی

جهت ارزیابی چرخه‌های زیرکوبی، دوره‌های تخمین زده شده توسط مدل با شرایط واقعی مسیر مطابقت داده شده است، که خروجی نتایج در نمودارهای (۱۰) (۱۱) قابل مشاهده است.



شکل ۱۰. اختلاف میان چرخه تخمین زده شده توسط مدل و مقادیر واقعی دوره اول (A)



شکل ۱۱. اختلاف میان چرخه تخمین زده شده توسط مدل و مقادیر واقعی دوره دوم (B)

استفاده از یک ناحیه ریلی با سایر عوامل یکسان، شرایط آب‌وهوایی بر چرخه زیرکوبی مؤثر می‌باشد، اگر امید به زندگی در هر وضعیت کمتر باشد دوره زیرکوبی قطعه مسیر کوتاه‌تر می‌شود. بنابراین، نتیجه برآورد حاضر با مشاهدات عملی مطابقت دارد. اگرچه مقادیر تخمینی $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}, (i = 3, 2)$ کوچک است، اما تفاوت‌های شرایط فاکتور ناهمگن همچنان منجر به تفاوت ظاهری در چرخه‌های کوبشی، طبق معادلات می‌شود. عامل ناهمگن بسیار تاثیرگذار بر چرخه زیرکوبی، میانگین بارندگی می‌باشد.

باتوجه به نتایج تخمین پارامترهای ناشناخته در جدول ۸ و ۹، برای بخش‌های مسیر، امید به زندگی هر وضعیت با استفاده از معادلات بیان شده برآورد شد. براین اساس، چرخه‌های زیرکوبی بخش‌های مسیر، به کمک نتایج امید به زندگی وضعیت مسیر برآورد شده است. نتایج تخمین زده شده از چرخه‌های زیرکوبی با مقادیر واقعی شرایط وضعیت مسیر توسط داده‌های جمع‌آوری شده تعمیر و نگهداری، مقایسه شده است و خطاهای برآورد، تجزیه و تحلیل شدند. نتایج ارزیابی مدل با نتایج واقعی نشان می‌دهد که اختلاف بین دوره‌های تخمین زده شده و واقعی حداکثر ۱۹ روز می‌باشد. همچنین باتوجه به مطالعه انجام شده و

۵- نتیجه گیری

-کمک به مدیران برای ارائه برنامه‌ریزی بلندمدت تعمیر و نگهداری و زیرکوبی برای حفظ کیفیت هندسه مسیر .
در این بخش پیشنهادهای به منظور بهبود مدل‌های ارائه شده و توسعه برنامه در آینده ارائه شده است. تا در تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرند.

- طبقه‌بندی خطوط راه‌آهن باتوجه به سایر مشخصات خط نظیر جنس خاک، ضریب آلودگی بستر، آب‌وهوا و آلودگی محیطی در کارهای آتی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

- استفاده از مدل حاضر برای مقایسه چند شاخص کیفیت نیز از پیشنهادهای دیگر در ادامه مطالعه است.

-باتوجه به نقاط ضعفی که در شاخص‌های موجود برای استفاده در راه‌آهن کشور وجود دارد، ارائه یک شاخص واحد برای تشخیص وضعیت مسیر در شبکه ریلی ایران بسیار مفید واقع می‌شود.

- داده‌های ثبت شده دقیق در مورد شرایط هندسی و اقدامات تعمیر و نگهداری انجام شده، الزامات اصلی تجزیه و تحلیل تخریب هندسه مسیر است. باین حال، داده‌های موجود برای این مطالعه برای تجزیه و تحلیل دقیق تخریب ناکافی است. استفاده از بانک اطلاعاتی قوی می‌تواند نتایج بهتری جهت تحلیل وضعیت هندسه مسیر ارائه دهد، لذا توصیه می‌شود در تحقیقات آتی از یک بانک اطلاعاتی بزرگ‌تر جهت بررسی وضعیت هندسه مسیر استفاده شود.

-بررسی مدل استفاده شده در این مطالعه جهت مقایسه دو ناحیه متفاوت، برای تحلیل اثر شرایط آب‌وهوا در نواحی مختلف شبکه ریلی.

حمل و نقل ریلی به‌عنوان یک متد حمل و نقل با پتانسیل بالا و ایمن شناخته شده است، از این رو افزایش ایمنی و حفظ مسیر برای مدیران این بخش بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله سعی شد که مدلی برای بررسی وضعیت خطوط راه‌آهن در آینده و پیش‌بینی چرخه‌های زیرکوبی ارائه شود. باتوجه به این موضوع که حفظ نقاط حساس در شبکه بسیار حائز اهمیت است در این مطالعه ناحیه لرستان به‌عنوان گلوگاه محور جنوب بررسی شده است. اطلاعات ناحیه خط‌آهن لرستان طی ۳ سال متوالی جهت بررسی در این مقاله استفاده شده است، در ادامه ضمن پردازش داده‌های برداشت شده از مسیر، از مدل مارکوف به کمک یک تابع خطر جهت مدل‌سازی تخریب هندسه مسیر و تخمین چرخه‌های زیرکوبی استفاده شده است. از نتایج و دستاوردهای این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- برطرف کردن خطای کیلومترژ با الگوریتم‌های ریاضی.
- در نظر گرفتن چندین شاخص با پارامترهای هندسی بیشتر در مدل مارکوف جهت پیش‌بینی کیفیت مسیر.

-بررسی چگونگی کارکرد شاخص پیشنهادی با مطالعه آن در برآورد وضعیت خطوط مطالعه و بیان شاخص مطابق با شرایط ناحیه بررسی شده.

-بررسی رابطه میان پارامترهای خرابی هندسه مسیر.
-تحلیل روند تغییرات انتقال از وضعیت‌های استفاده شده با کمک تغییرات شاخص در مسیر.

-ارزیابی اثر زیرکوبی باتوجه به تغییرات شاخص استفاده شده در مدل.

-تخمین چرخه‌های زیرکوبی باتوجه به وضعیت هندسه مسیر.

-باتوجه به نتایج خروجی در این مقاله تهیه یک مدل برنامه‌ریزی بهینه نگهداری و تعمیرات، توسط ماشین زیرکوب می‌تواند یک موضوع چالش‌برانگیز برای مدیران زیرساخت شبکه ریلی باشد.

-استفاده از مدل ارائه شده و عوامل ذکر شده در این مقاله برای بررسی وضعیت سایر ابنیه فنی در راه‌آهن.

۶-مراجع

- Mechanical Engineers, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 230, 1118-1130.
- Famurewa, S. M., Xin, T., Rantatalo, M. & Kumar, U. (2015). Optimisation of Maintenance Track Possession Time: A Tamping Case Study. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 229, 12-22.
- Jovanovic, S., Guler, H. & Coko, B. (2015). Track Degradation Analysis in the Scope of Railway Infrastructure Maintenance Management Systems. *Gradevinar*, 67, 247-257.
- Elkhoury, N., Moridpour, S. & Hesami, R. (2018). Fuzzy Approach in Rail Track Degradation Prediction. *Journal of Advanced Transportation*.
- Khajehei, H., Haddadzade, M., Ahmadi, A., Soleimanmeigouni, I. & Nissen, A. (2021). Optimal Opportunistic Tamping Scheduling For Railway Track Geometry. *Structure and Infrastructure Engineering*, 17, 1299-1314.
- Hashemian, Seyed Elias, Shefahi, & Moghaddas Nejad. (2021). Life Cycle Cost Analysis Of Repair And Maintenance Decisions Using Markov Prediction Model Output Based On Railway Track Measuring Machine Information. *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 53(2), 555-574.
- Lee, J. S., Choi, I. Y., Kim, I. K. & Hwang, S. H. (2018). Tamping and Renewal Optimization of Ballasted Track Using Track Measurement Data and Genetic Algorithm. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144, 04017081.
- Mishalani, R. G. & Madanat, S. M. (2002). Computation of Infrastructure Transition Probabilities Using Stochastic Duration Models. *Journal of Infrastructure Systems*, 8, 139-148.
- Shafahi, Y. & Hakhamaneshi, R. (2009). Application of a Maintenance Management Model for Iranian Railways based on the Markov Chain and Probabilistic Dynamic Programming. *Scientia Iranica*, 16.
- An, R., Sun, Q., Wang, F., Bai, W., Zhu, X. & Liu, R. (2018). Improved Railway Track Geometry Degradation Modeling For Tamping Cycle Prediction. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144, 04018025.
- Andrade, A. R. & Teixeira, P. F. Unplanned-Maintenance Needs Related to Rail Track Geometry. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, (2014). Thomas Telford Ltd, 400-410.
- Attoh-Okine, N. O. 2017. Big Data and Differential Privacy, Analysis Strategies for Railway Track Engineering, *John Wiley & Sons*.
- Audley, M. & Andrews, J. (2013). The Effects of Tamping on Railway Track Geometry Degradation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 227, 376-391.
- Bai, L., Liu, R., Sun, Q., Wang, F. & Xu, P. (2015). Markov-Based Model for the Prediction of Railway Track Irregularities. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 229, 150-159.
- Caetano, L. F. & Teixeira, P. F. (2015). Optimisation Model To Schedule Railway Track Renewal Operations: A Life-Cycle Cost Approach. *Structure And Infrastructure Engineering*, 11, 1524-1536.
- Caetano, L. F. & Teixeira, P. F. (2016). Predictive Maintenance Model for Ballast Tamping. *Journal of Transportation Engineering*, 142, 04016006.
- Elkhoury, N., Hitihamillage, L., Moridpour, S. & Robert, D. (2018). Degradation Prediction of Rail Tracks: A Review Of The Existing Literature. *The Open Transportation Journal*, 12.
- Falamarzi, A., Moridpour, S., Nazem, M. & Hesami, R. (2018). Rail Degradation Prediction Models For Tram System: Melbourne Case Study. *Journal of Advanced Transportation*.
- Famurewa, S. M., Juntti, U., Nissen, A. & Kumar, U. (2016). Augmented Utilisation of Possession Time: Analysis For Track Geometry Maintenance. Proceedings of the Institution of

- Engineering/Earthquake Engineering*, 23, 241s-256s.
- Kobayashi, K., Kaito, K. & Lethanh, N. (2010). Deterioration Forecasting Model With multistage weibull hazard functions. *Journal of infrastructure systems*, 16, 282-291.
- VEIT, P. (2007). Track Quality-Luxury or Necessity? Railway technical review/RTR special, 8-12.
- Sancho, L. C., Braga, J. A., & Andrade, A. R. (2021). Optimizing maintenance decision in rails: a Markov decision process approach. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems*, Part A. Civil Engineering, 7(1), 04020051.
- Shafahi, Y., Masoudi, P. & Hakhmaneshi, R. (2008). Track Degradation Prediction Models, Using Markov Chain, Artificial Neural and Neuro-Fuzzy Network. 8th World Congress on Railway Research, 1-9.
- Soleimanmeigouni, I., Ahmadi, A., Arasteh Khouy, I. & Letot, C. (2018a). Evaluation of the Effect of Tamping on the Track Geometry Condition: A Case Study. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 232, 408-420.
- Tsuda, Y., Kaito, K., Aoki, K. & Kobayashi, K. (2006). Estimating Markovian Transition Probabilities For Bridge Deterioration Forecasting. *Structural*

Railway Track Geometry Degradation Modeling for Tamping Cycle Prediction

*Seyed Hessameddin Zegordi, Professor, Faculty of Industrial & Systems Engineering,
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*Esmail Papi, M.Sc., Grad., Faculty of Industrial & Systems Engineering,
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*Bakhtiar Ostadi, Associate Professor, Faculty of Industrial & Systems Engineering,
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

E-mail: zegordi@modares.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

The geometric conditions of railway tracks are a critical factor influencing the safety, comfort of train operations, and the scheduling of track tamping cycles. Railway infrastructure managers, aiming for optimal use of limited maintenance resources, plan tamping cycles based on a precise understanding of the rules governing track geometry deterioration. In this paper, by considering each 200-meter track segment as a research unit, the uncertainty and heterogeneity of track geometry degradation are analyzed based on the evaluation of track geometry conditions. Accordingly, a Markov transition probability model is proposed to predict the degradation trend of railway track segments. Furthermore, the deterioration states of track segments are classified into multiple ranks, and Markov transition probabilities among failure states—with irregular and non-uniform intervals between inspection points over time, described by exponential hazard models—are developed. To validate the proposed method, a case study on the railway line in the Lorestan region of the Islamic Republic of Iran is conducted. The results from the degradation model demonstrate an acceptable accuracy in forecasting the future condition of the track. Additionally, the parameter estimation results indicate the significant impact of heterogeneous climatic factors on the track geometry deterioration processes and tamping cycles, where tracks exposed to harsher climatic conditions exhibit shorter service lives and tamping intervals. The proposed approach is also valuable for maintenance operation planning and assists in the management of maintenance and repair of railway track components.

Keywords: Geometric Deterioration, Tamping, Markov Chain, TQI Index, Railway Degradation Model