

توسعه مدل احتمالاتی زوال بر مبنای توزیع ویبال برای سایش ریل با مطالعه موردی راه آهن محور لرستان

جبارعلی ذاکری (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
شهربانو شهریاری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حسین عسگری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E- mail: zakeri@iust.ac.ir

چکیده

سامانه های مدیریت نگهداری و تعمیر در چند دهه اخیر مورد توجه صاحبان قرار گرفته و در صنایع مختلف بکار گرفته شده است. در راه آهن نیز سامانه مدیریت نگهداری و تعمیر خط آهن جهت بهینه کردن فعالیتها و هزینه های مرتبط با آنها مطالعه و پیاده سازی شده است. چنین سامانه هایی برای پیش بینی وضعیت آتی خرابی از تکنیکهای مختلفی استفاده کرده اند. در این مقاله ابتدا شاخص خرابی ریل تعریف شده و سپس با بکارگیری توزیع ویبال، وضعیت آتی سایش ریل تخمین زده شده است. تابع زوال برای سایش به وسیله ماتریس احتمالات گذر (انتقال) گسسته مارکوف بیان شده است. عموماً برای همه کاربردهای عملی در مدیریت روسازی راه و راه آهن، از مدل های نا همگن استفاده می شود. در تمام کارهایی که تاکنون در سطح کشور انجام شده است، به پیش بینی وضعیت مسیر بر اساس مدل های همگن پرداخته شده است و عوامل سببی در مدل های زوال دخالت داده نشده اند. از طرفی مهم ترین متغیر سببی موثر بر سایش ریل، ترافیک عبوری است. در این تحقیق، به منظور ساده سازی، تنها این متغیر در حل مدل زوال دخالت داده شده است. در واقع می توان با داشتن دو متغیر زمان و ترافیک عبوری از خط، وضعیت آتی ریل را پیش بینی کرده و عمر ریل را از دیدگاه سایش برآورد نمود. در این تحقیق، سایش ریل در قوسهای ۲۵۰ متری و با برداشتهای میدانی در فواصل ۶ ماهه صورت گرفته و با کمک مدل احتمالاتی زوال عمر ریل پیش بینی شده است.

واژه های کلیدی: مدل زوال، تئوری مارکوفین، سایش ریل، عمر ریل

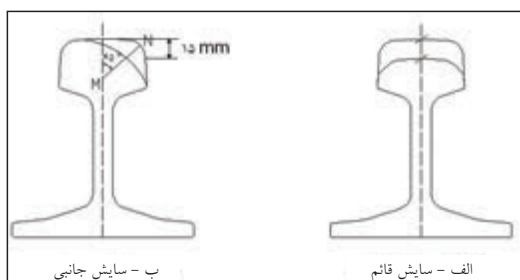
۱. مقدمه

زوال دخالت داده شده است. توسعه مدل پیشنهادی زوال بر مبنای توزیع ویبال است.

در این مقاله حدود سایش ریل و کلاس آن را در هر لحظه از زمان و عبور هر بار ترافیک پیش‌بینی می‌شود. به عبارت دیگر تنها با داشتن دو متغیر زمان و ترافیک عبوری از خط، وضعیت آتی ریل به صورت کلاس خط به دست می‌آید. از طرفی از طریق مدل زوال به دست آمده، عمر ریل از نظر سایش برآورد می‌شود.

۲. سایش ریل

ناپوستگیهای داخلی ریل که باعث افزایش خستگی در آن می‌شود و نیز تغییراتی که در خواص مکانیکی ریل تحت تاثیر عبور و مرور قطار اتفاق می‌افتد خرابیهای ریل نامیده می‌شود. سایش یکی از رایج‌ترین خرابیهای ریل است [محمدیان، ۱۳۸۶]. سایش یکی از مهم‌ترین عوامل در کاهش طول عمر در خطوط راه آهن ایران است که در دو حالت قائم و جانبی ایجاد می‌شود.



شکل ۱. سایش قائم و جانبی

مطابق مشخصات فنی و عمومی روسازی خطوط بالاستی راه آهن حداکثر سایش مجاز کلاهدک ریل UIC60 برای طبقات مختلف خطوط (A, B, C, D) به صورت جدول ۱ است. سایش مجاز سایر ریلها را می‌توان از حاصلضرب مقادیر ذکر شده در جدول ۱ در نسبت ارتفاع ریل مورد نظر به ارتفاع ریل UIC60 محاسبه کرد. حداکثر سایش جانبی ریل در امتداد MN مطابق شکل ۱ به فاصله ۱۵ میلی‌متر از سطح کلاهدک ریل UIC60، نباید از ۱۸ میلی‌متر بیشتر باشد (M مرکز سطح کلاهدک ریل است). مجموع سایش قائم و جانبی نباید از ۲۵ میلی‌متر بیشتر باشد. با توجه به جدول ۱ و توضیحات فوق، برای ریل U33 در محور

منظور از ارائه مدل زوال، ارائه روند تغییرات وضعیت خط در طول زمان و شناخت الگوی این تغییرات است. نحوه توصیف روند زوال در مدل‌های زوال بر مبنای تعریفی که مدل در بیان شاخص زوال دارد، متفاوت است. روشهای مختلفی برای تخمین وضعیت خط در آینده وجود دارد. در این تحقیق زنجیره مارکوف که از رایج‌ترین و مطرح‌ترین شیوه برخورد با مسئله تعمیر و نگهداری است، به عنوان مدل تخمین وضعیت خط انتخاب شده است.

در این روش تابع زوال به وسیله ماتریس احتمالات گذر (انتقال) گسسته مارکوف بیان می‌شود. یک فرآیند انتقال مارکوف می‌تواند به صورت همگن و یا ناهمگن باشد. در انتقال همگن، متغیرهایی سببی همچون بار ترافیک، وضعیت محیطی، مقاومت ساب‌گرید و... در تمام طول دوره تحلیل، ثابت در نظر گرفته می‌شوند و به همین دلیل ماتریس احتمال P در همه گامهای زمانی بدون تغییر باقی می‌ماند. عموماً برای همه کاربردهای عملی در مدیریت روسازی، از مدل‌های ناهمگن استفاده می‌شود. در مدل‌های ناهمگن ماتریس احتمال در هر گام زمانی تغییر خواهد کرد و تحت تاثیر متغیرهای سببی قرار دارد. در مطالعاتی که تاکنون در سطح کشور انجام شده است، به پیش‌بینی وضعیت خط بر اساس مدل‌های همگن پرداخته شده است و عوامل سببی در مدل‌های زوال دخالت داده نشده‌اند [هخامنشی، ۱۳۸۴].

با توجه به وسعت خرابیهای ریل و بالا بودن هزینه‌های نگهداری آن که اغلب منجر به تعویض ریل می‌شود، نیز گسترش خرابی سایش ریل در ابعاد وسیع در خطوط کشور و با توجه به اینکه تنها سایش ریل در سطح شبکه در کشور دارای بانک اطلاعاتی است و تنها اندازه‌گیری این عیب از عیوب بی‌شمار ریل در راه آهن کشور با بکارگیری ماشین اندازه‌گیری خط امکان پذیر است، در نتیجه در این تحقیق به پیش‌بینی وضعیت ریل بر مبنای سایش آن پرداخته شده است. از طرفی مهم‌ترین متغیر سببی که بر سایش ریل موثر است، ترافیک عبوری است. با عبور ترافیک از روی ریل روز به روز بر میزان سایش آن افزوده می‌گردد. در این تحقیق به منظور ساده سازی تنها این متغیر در حل مدل

جدول ۱. میزان مجاز سایش ریل

طبقه خط	سرعت (کیلومتر بر ساعت)	سایش مجاز قائم (میلی متر)	سایش مجاز جانبی (میلی متر)
A	۱۶۰~۲۰۰	۹	۱۰
B	۱۲۰~۱۶۰	۱۲	۱۲
C	۸۰~۱۲۰	۱۵	۱۶
D	کمتر از ۸۰	۱۸	۱۸

به عنوان مثال:

$$PCS(1) = P_1 PCS(0)$$

$$PCS(2) = P_2 PCS(1) = P_2 P_1 PCS(0) \quad (2)$$

$$PCS(t) = P_t PCS(t-1) = P_t P_{t-1} \dots P_1 PCS(0)$$

که P_t ، ماتریس احتمال انتقال در گام زمانی t و $PCS(t)$ بردار وضعیت در گام زمانی t است. PCS ، ما را به کیفیت وضعیت ریل همچون شاخص سایش ریل و یا هر مقیاس مناسب برای تحلیل کمی سوق می‌دهد. اگر یک مقیاس وضعیت از ۰ تا ۲ مورد استفاده قرار گیرد که ۰ و ۲ به ترتیب نمایانگر بهترین و بدترین وضعیت باشند، آنگاه $PCS(2)$ که بردار وضعیت در گام دوم است را می‌توان به عنوان مثال به صورت $\{0/4$ و $0/3$ و $0/3\}$ نشان داد که هر درایه بردار، احتمال قرارگیری وضعیت ریل در یکی از ۳ حالت است (۰ تا ۲). عموماً گامهای زمانی به صورت مجموعه‌ای از دوره‌های متوالی یک ساله در نظر گرفته می‌شوند. اکنون شرایطی را که باید در مورد ماتریس انتقال برقرار باشد بررسی می‌کنیم: [جبه دار مارالانی، ۱۳۷۱].

الف- چون تمام عناصر این ماتریس احتمالات انتقال هستند پس:

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad \text{برای تمام } i \text{ و } j \quad (3)$$

p_{ij} احتمال رفتن از حالت i به حالت j را نشان می‌دهد.

ب- ماتریس مربعی $P = [p_{ij}]$ را ماتریس احتمال گویند که هر سطر آن از یک بردار احتمال تشکیل شده است. یعنی هر عنصر این ماتریس عددی نامنفی بوده و مجموع عناصر هر سطر آن برابر یک است.

$$\sum_{j=1}^k p_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (4)$$

راه آهن لرستان با حداکثر سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت (طبقه D) سایش جانبی مجاز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$WRS_e = \frac{H_{U33}}{H_{UIC60}} \times 18 = \frac{145}{172} \times 18 = \quad (1)$$

$$0.843 \times 18 = 15.17 \approx 15mm$$

به منظور اندازه‌گیری میزان سایش ریل، تجهیزات دستی و مکانیزه متعددی وجود دارد. یکی از تجهیزات مکانیزه موجود در راه آهن ایران، ماشین اندازه‌گیر EM120 است که با سیستم غیر تماسی، اندازه‌گیری پروفیل ریل را انجام می‌دهد تا مقدار سایش تاج ریل و میزان اعوجاج آنرا برداشت کند. لازم به توضیح است که این ماشین اطلاعات مربوط به سایش را در هر یک متر طول برداشت می‌کند و به عنوان خروجی به کاربر می‌دهد. در این تحقیق ما از اطلاعات برداشت شده توسط این ماشین در راه آهن لرستان بهره‌جستیم.

۳. مدل مارکوف

مدل مارکوف از ماتریسهای احتمال انتقال استفاده می‌کند. یک ماتریس احتمال انتقال، یک مجموعه از احتمالات انتقال وضعیت ریل از یک سطح به سطح دیگر است. در این روش فرض می‌شود که وضعیت آتی تنها تابعی از وضعیت حال است و وابسته به عملکرد سیستم در گذشته نیست. احتمالات انتقال می‌توانند به وسیله مشاهده عملکرد تعداد زیادی از محورها در طول یک دوره طولانی از زمان به دست آیند. پیرو روش زنجیره‌ای مارکوف، بردار وضعیت آتی، $PCS(t)$ ، از وضعیت ریل در هر گام زمانی (t) می‌تواند از بردار وضعیت اولیه، $PCS(0)$ ، به دست آید.

۳-۱ مدل شبه مارکوف

که در آن تسهیلات مورد نظر می‌تواند دارای یکی از دو وضعیت ممکن ۰ و ۱ باشد. وضعیت ۰ نشان‌دهنده شرایط ضعیف‌تر است. وقتی وضعیتی تسهیلاتی از ۱ به ۰ تغییر کند، دیگر وقوع تغییرات بیشتر ممکن نیست، زیرا بدون نوسازی^۲ نمی‌توان شرایط سازه را بهبود بخشید. در این تحقیق نیز ما فرض را بر این می‌گذاریم که خط بدون نگهداری است. در نتیجه فقط بخش اول سری مذکور که با ثبت شدن اولین ۰ خاتمه می‌یابد، دارای اطلاعاتی بامعنی است. علاوه بر این، مشاهدات مربوط به وضعیت، اجباراً به هم وابسته بوده و نمی‌توان آنها را مستقل از هم فرض کرد. متغیرهای مختص تسهیلات، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$D_t = \text{سطح زوال پیوسته و تجمعی مشاهده نشده در زمان } t$$

$$X_t = \text{بردار متغیرهای توصیفی مشاهده شده در زمان } t$$

$$Y_t = \text{رتبه مربوط به شرایط حالت گسسته در زمان } t \text{ (که مقدار } 0 \text{ یا } 1 \text{ می‌گیرد)}$$

به متغیر زمانی t در زمانی که آخرین نوسازی انجام شده و یا در زمان ساخت سازه، مقدار صفر اختصاص می‌یابد. متغیرهای D_t و Y_t از طریق مقدار آستانه‌ای K ، که منعکس‌کننده مرز حالت‌های وضعیت است، به همدیگر وابسته هستند. تا وقتی که مقدار D_t بالاتر از آستانه K است، حتی در صورتی که مقدار آن با افزایش زمان کاهش یابد، Y_t دارای مقدار ۱ خواهد بود. به عبارت دیگر در زمان t حالت ۱ ثبت خواهد شد، اگر و فقط اگر $D_t > K$ باشد و برعکس چنان که $D_t \leq K$ باشد، حالت ۰ ثبت می‌شود. زمانی که در آن $D_t = K$ است، نشان‌دهنده دوره زمانی تداوم حالت ۱ بوده و با $t = T$ مشخص می‌شود. از آنجا که فرآیند زوال، فرآیندی احتمالاتی است D_t و Y_t متغیرهای تصادفی بوده و بنابراین T نیز متغیر تصادفی است.

در این قسمت مدل برای دوره زمانی T معرفی خواهد شد. این مدل با استفاده از یک سری مشاهدات Y_t ، تخمین زده می‌شود. مدل مذکور اثرات متغیرهای علی (سببی) را به حساب آورده و امکان تعیین احتمال اینکه تسهیلات مورد نظر در زمان t دچار تغییر خواهد شد را نیز فراهم می‌سازد.

عموماً مدل‌های زوال با پایه وضعیت و زمان-گسسته، با استفاده از

مدل شبه مارکوف با بکارگیری اطلاعات در دسترس و رأی و تجربه کارشناسان خبره روسازی ساخته شده‌اند. مزیت اصلی این نوع مدل، بکارگیری منابع ذهنی است که نیاز فراوان به اطلاعات میدانی را کاهش می‌دهد. بر خلاف مدل مارکوف، این مدل‌ها ممکن است وضعیت آتی را از وضعیت گذشته از طریق ماتریس احتمال انتقال پیش‌بینی کنند. هرچند هیچ رابطه علت و معلولی یافت نمی‌شود، اما به سادگی نرخ زوال روسازی برآورد می‌شود [Smith, 1996].

۴. توسعه مدل زوال

مدلهای زوال زیرساخت‌ها عبارتند از: روابط ریاضی بین یک متغیر وابسته، یعنی زوال یا تغییر در وضعیت، و یک سری از متغیرهای سببی^۱ نظیر ویژگی‌های طراحی بارهای ترافیکی، عوامل محیطی، سن و تاریخچه تعمیر و نگهداری. مشکل اصلی در ایجاد مدل‌های دقیق زوال اینست که غالباً شرایط زیرسازه‌ها در مقیاس گسسته سنجیده می‌شود. این رتبه‌ها یا حالت‌ها، شاخصهای وضعیت تسهیلات مورد نظر بوده و در نتیجه تغییر وضعیت در یک دوره زمانی مشخص، شاخص زوال در آن دوره است. در حالی که زوال تسهیلات فرآیندی پیوسته است. مثلاً روند خوردگی میلگردها در عرشه پلهای بتن مسلح، روندی کند و تدریجی است و یا سایش ریل نیز در طول زمان و تدریجاً اتفاق می‌افتد. علاوه بر این در مراحل اولیه، فرایند زوال در مقیاس میکروسکوپی و یا در زیر لایه‌ها رخ می‌دهد و بنابراین مستقیماً قابل رویت نیست، اما شاخصهای عملکردی مشاهده شدنی هستند. بنابراین ضروریست که در توسعه مدل‌های زوال احتمالاتی وضعیت-گسسته، هم فرآیندهای زوال پیوسته زیرسطحی و غیر قابل رویت و هم شاخصهای قابل رویت زوال وضعیت-گسسته به دقت به حساب آورده شوند [Mishalani and Madanat, 2002].

فرض اصلی در توسعه مدلی که در ادامه تشریح می‌شود، وجود روابطی با پایه احتمالاتی بین شاخصهای زوال و فرآیند زوال زیر لایه‌ای است. جهت سهولت ارائه و بدون از دست دادن کلیت موضوع، مدل بر مبنای حالت ساده دو متغیره توسعه داده شده،

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta} \frac{R(t, \Delta)}{\Delta} = \lim_{\Delta} \frac{F(t + \Delta) - F(t)}{\Delta \cdot S(t)} = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (6)$$

که در آن $F(t)$ = تابع چگالی احتمالی T (PDF) hsj .^۵ به عبارت دیگر بر مبنای معادلات (۵) و (۶)، احتمال انتقال از حالت ۱ در زمان t در طول دوره بسیار کوچک $\Delta = dt$ برابر است با $\lambda(t) \cdot dt$.

تابع $\lambda(t)$ به عنوان تابع نرخ رویداد در مدلسازی دوره تداوم اتفاقی شناخته می‌شود و بیانگر نرخ آنی (یا ریسک) زمانی است که در آن تسهیلات مورد نظر بعد از گذشت زمان t از حالت فعلی به حالت پایین‌تری انتقال می‌یابد.

۴-۲ خصوصیات مدل زمانی دوره تداوم

فرم عملکردی تابع نرخ رویداد $\lambda(t)$ ، تعبیر ساده ماهیت پدیده مدل شده را امکان‌پذیر می‌سازد [Mishalani and Madanat, 2002]. ثابت بودن مقدار تابع نرخ رویداد بر تغییر نکردن احتمال مشروط انتقال از حالت ارائه شده در معادله (۵)، در طول زمان دلالت دارد. به این معنی که احتمال انتقال از آن حالت ثابت بوده و مستقل از زمان صرف شده در آن است. این موضوع یک فرآیند فقدان حافظه را بیان می‌کند. می‌توان نشان داد که توزیع دوره زمانی T از PDF نمایی تبعیت می‌کند. به این خصوصیت عدم وابستگی دوره تداوم (استقلال دوره تداوم)^۶ اطلاق می‌شود. کاهش تابع نرخ رویداد در طول زمان دلالت بر این دارد که با گذشت زمان احتمال انتقال به خارج از حالت، کم می‌شود. برعکس افزایش یکنواخت تابع نرخ رویداد در طول زمان، بر زیاد شدن احتمال انتقال به خارج از حالت در گذر زمان، دلالت دارد. به این خصوصیات وابستگی منفی و مثبت دوره تداوم^۷ اطلاق می‌شود. همان‌طور که قبلاً عنوان شد با تعیین شدن تابع چگالی احتمال (PDF) دوره T ، می‌توان احتمالات انتقال مدل‌های برپایه وضعیت، زمان-گسسته را مشخص کرد. بنابراین فقط تعیین و تخمین $F(t)$ جهت تکمیل روش باقی می‌ماند. با تغییر مفهومی تابع نرخ رویداد $\lambda(t)$ و ارائه روابط مستقیم آن با توابع بقاء و چگالی احتمال، معادله (۶)، مشخص کردن تابع نرخ رویداد، ساده خواهد شد.

احتمالات انتقال برای نقاطی خاص در زمان که با دوره ثابت Δ از هم جدا می‌شوند، توصیف می‌گردند، عموماً Δ حدود یک یا دو سال تعیین می‌شود که دوره‌های بازرسی انجام می‌شود.

بنابراین احتمال انتقال به خارج از حالت ۱ در زمان t ، عبارتست از احتمال مشاهده افت در وضعیت تسهیلات (یعنی تغییر حالت ۱ به ۰) در زمان $t + \Delta$ یعنی $Y_{(t+\Delta)} = 0$ و مشروط به اینکه تسهیلات مذکور در زمان t برابر یک باشد یعنی $(Y_t = 1)$.

این احتمال شرطی با $R(t, \Delta)$ و به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} R(t, \Delta) &= \text{prob}(t \langle T \langle t + \Delta | T \rangle t) \quad (5) \\ &= \frac{\text{prob}(t \langle T \langle t + \Delta \rangle)}{\text{prob}(T \langle t)} = \frac{F(t + \Delta) - F(t)}{1 - F(t)} \\ &= \frac{F(t + \Delta) - F(t)}{S(t)} \end{aligned}$$

که در آن $F(t)$ عبارتست از تابع توزیع جمعی متغیر تصادفی دوره زمانی T و $1 - F(t) - S(t)$ ، در بحث مدلسازی دوره تداوم به عنوان تابع بقاء^۳ شناخته می‌شود.

بنابراین مدل زمانی اگر $F(t)$ شناخته شود، می‌توان $R(t, \Delta)$ را برای هر مقدار t و Δ محاسبه کرد. به عبارت دیگر با داشتن یک مدل زمانی که تابع چگالی احتمال دوره زمانی T را توصیف می‌کند، احتمالات انتقالی مدل بر پایه وضعیت، زمان-گسسته به‌سادگی با استفاده از $R(t, \Delta)$ تعیین می‌شود.

۴-۱ تابع نرخ رویداد^۴

احتمال انتقال از حالت ۱ ($R(t, \Delta)$) به دوره زمانی Δ وابسته است. مقدار Δ بزرگ‌تر، احتمال بیشتری به دست می‌دهد و برعکس. بنابراین بهتر است که معیاری برای منعکس کردن نرخ متوسط رخداد خروج از یک حالت، تعیین شود. این معیار که با $\lambda(t)$ نشان داده می‌شود، از تقسیم $R(t, \Delta)$ بر Δ به دست می‌آید

[Mishalani and Madanat, 2002]

اگر کنترل و بازرسی تسهیلات روندی پیوسته داشته باشد (یعنی مشاهدات مربوطه در دوره‌های متفاوت با فاصله خیلی کم صورت گیرد)، احتمال شرطی معادله (۵) پس از تقسیم بر Δ به صورت رابطه ۶ خلاصه می‌شود:

ماکوفین^۹ را ندارد، مگر اینکه PDF و بیال فرم PDF نمایشی به خود بگیرد. در این مورد خاص وقتی عدم وابستگی دوره تداوم حفظ شود، فرآیند شبه مارکوف به زنجیره مارکوف زمان-پیوسته تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه پدیده سایش فرآیندی است که با گذشت زمان، نرخ آن تغییر محسوسی نمی‌کند، در نتیجه در این مطالعه $P_i = 1$ قرار داده که حالت عدم وابستگی دوره تداوم یا فقدان حافظه را نشان می‌دهد و PDF و بیال فرم PDF نمایشی به خود بگیرد.

همان طور که عنوان شد، زوال زیرساخت‌ها به مجموعه‌ای از متغیرهای سببی و توصیفی وابستگی دارد. تابع نرخ رویداد و بیال در معادله (۷)، اثر این متغیرها را نشان نمی‌دهد. این مسئله، محدودیتی جدی برای این مدل است، ولی با جایگزین کردن پارامتر ثابت λ با یک تابع وابسته به متغیرهای مربوطه، می‌توان مدلی توسعه یافته که این متغیرها را نیز شامل می‌شود، به دست آورد. برای اینکه از مثبت بودن این تابع اطمینان حاصل شود رابطه نمایشی زیر ارائه شده است:

$$\lambda = e^{-\beta X} \quad (۸)$$

که در آن:

X = بردار ستونی متغیرهای سببی (که جهت حصول مقدار ثابت، شامل مقدار یک نیز می‌شود): در مدل مربوط به سایش ریل، چون مهم ترین متغیر سببی که بر سایش ریل موثر است، ترافیک عبوری است، X تنها شامل یک متغیر و آن هم ترافیک عبوری است و در نتیجه بردار X تبدیل به یک عدد می‌شود.

β = بردار سطری پارامترهایی که باید تخمین زده شوند: در مدل مربوط به سایش چون بردار X یک عدد است، در نتیجه بردار β نیز یک عدد است که از ترسیم نمودار نمایشی شاخص خرابی سایش ریل به ترافیک عبوری به دست می‌آید.

ترکیب روابط (۷) و (۸) تابع نرخ رویداد وابسته به متغیرهای سببی را به شکل زیر نتیجه می‌دهد:

$$\lambda(t) = e^{\beta x} p(e^{-\beta x} t)^{p-1} = pe^{-\beta x} t^{p-1} \quad (۹)$$

بنابراین تحت این شرایط کلی‌تر، دوره تداوم تابعی از مقادیر P و X است. توجه شود که هنوز ماهیت وابستگی دوره تداوم به مقدار P به تنهایی، وابستگی کامل دارد.

با تخمین این تابع، مقدار PDF دوره تداوم تعیین خواهد شد که در نتیجه می‌توان احتمالات انتقالی را محاسبه کرد. اگر چه انتظار می‌رود که افزایش عمر و خستگی مصالح که دلالت بر زوال زیرساخت‌ها دارد، از تابع رویداد افزایش (که نشان‌دهنده وابستگی مثبت دوره تداوم است) تبعیت کند ولی در تخمین چنین مدلی، کاربرد فرم عملکردی منفردی که بتواند طیف وابستگی منفی دوره تداوم و وابستگی مثبت دوره تداوم را پوشش دهد، مطلوب‌تر است. این چنین فرم عملکردی مربوط به دوره T از PDF و بیال^۹ پیروی می‌کند. تابع نرخ رویداد وابسته به PDF و بیال با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\lambda(t) = \lambda P(\lambda t)^{P-1} = P \lambda^P t^{P-1} \quad (۷)$$

که در آن P و λ پارامترهایی هستند که باید مقدار آن تخمین زده شود.

مقدار ثابت قابل انتظار (امید ریاضی) دوره زمانی تداوم T که از PDF و بیال به دست می‌آید با رابطه $E[T] = \lambda^{-P}$ ارائه می‌شود. بسته به مقدار P ، فرآیند در قالب یکی از سه طبقه وابستگی دوره تداوم قرار می‌گیرد. اگر $0 < P < 1$ باشد، $\lambda(t)$ به طور یکنواخت کاهش یافته و وابستگی منفی دوره تداوم را نشان می‌دهد. اگر $P = 1$ باشد، $\lambda(t)$ مقدار ثابت λ را گرفته و عدم وابستگی دوره تداوم یا فقدان حافظه را نشان می‌دهد که در آن PDF و بیال به PDF نمایشی تبدیل می‌شود. اگر $P > 1$ باشد، $\lambda(t)$ به طور یکنواخت افزایش یافته و وابستگی مثبت دوره تداوم را بروز می‌دهد. لازم به ذکر است که این رفتار صریح دوره تداوم حالت در مدلسازی زوال نشان‌دهنده حالت خاصی از فرآیند شبه مارکوف است، وقتی که شرایط زیر حفظ شود:

۱- وقتی انتقالی در طول یک دوره زمان پیوست رخ می‌دهد، احتمال ورود به حالت بعدی یک است، اگر آن حالت از وضعیت بعدی بهتر باشد، و در غیر این صورت آن حالت بدترین حالت است و خروج از آن حالت امکان پذیر نبوده و احتمال مذکور صفر خواهد بود.

۲- تا زمان وقوع انتقال، زمان از PDF و بیال تبعیت می‌کند.

این فرآیند، به دلیل حضور وابستگی دوره تداوم، خصوصیت

۴-۳ تعیین احتمال انتقال

همان گونه که قبلاً بحث شد، با تخمین مدل دوره تداوم، می توان احتمالات انتقال مدل حالتی زمان- گسسته بر پایه وضعیت را محاسبه کرد. در واقع این به معنی تعیین احتمالات انتقالی فرآیند حالتی زمان- گسسته بر پایه وضعیت است که با استفاده از فرآیند تخمین زده شده شبه مارکوف، وقتی که زمان تداوم دارد، به دست می آید. در نمونه دومتغیره، احتمال انتقال به خارج از حالت ۱، که با استفاده از $R(t, \Delta)$ در معادله (۵) مشخص می شود، همان احتمال انتقال از حالت ۱ به حالت ۰ است. در نتیجه احتمال انتقال از حالت ۱ به حالت ۱ برابر است با $1 - R(t, \Delta)$.
تحت شرایط معادله (۹) و یا فرض PDF ویبال و حضور متغیرهای سببی، احتمال باقی ماندن در همان وضعیت که با $P_{1,1}$ نشان داده می شود عبارتند از:

$$p_{1,1} = 1 - R(t, \Delta) = \frac{\exp[-\lambda^p(t + \Delta)^p]}{\exp[-(\lambda t)^p]} \quad (10)$$

و احتمال انتقال از حالت ۱ به حالت ۰ که با $P_{1,0}$ نشان داده می شود عبارتست از:

$$p_{1,0} = R(t, \Delta) = 1 - \frac{\exp[-\lambda^p(t + \Delta)^p]}{\exp[-(\lambda t)^p]} \quad (11)$$

در معادلات (۱۰) تا (۱۲)، λ با معادله (۸) تعیین می شود. بنابراین با داشتن تابع نرخ رویداد ویبال از معادله (۹)، احتمالات انتقال برای نمونه دو متغیره را می توان بر مبنای معادلات (۱۰) و (۱۱) و برای هر نقطه ای در هر زمان t و هر دوره زمانی Δ محاسبه کرد. برای نمونه چند متغیره، سناریوی سه حالت در نظر گرفته می شود. برای هر حالت (دقیق) مشابه نمونه دو متغیره یک مدل دوره زمانی تعیین می شود. اما، با توجه به حضور مدل های دوره زمانی چندگانه در نمونه چند متغیره توضیحی برای مشخص کردن حالت مربوط به هر مدل دوره زمانی ارائه می شود. در این مبحث، حالت های سه گانه عبارتند از ۲، ۱ و صفر، حالت اضافی ۲ نشان دهنده بهترین حالت و ۰ نشان دهنده ضعیف ترین حالت است. طبیعتاً، احتمال انتقال از حالت ۲ به حالت ۲ در دوره زمانی Δ ، که با $P_{2,2}$ نشان داده می شود با استفاده از رابطه (۱۰) حساب می شود، اما به علت

اینکه حالت ۲ را در نظر می گیرد رابطه زیر به دست محاسبه آن ارائه شده است:

$$p_{2,2} = 1 - R_2(t, \Delta) = \frac{\exp[-\lambda_2^{p2}(t + \Delta)^{p2}]}{\exp[-(\lambda_2 t)^{p2}]} \quad (12)$$

که در آن:

$$R_i(t, \Delta) = \text{احتمال انتقال از حالت } i$$

$\lambda_i =$ با استفاده از معادله (۸) برای حالت i به دست می آید.

$$P_i = \text{پارامتر } p \text{ از معادله (۹) برای حالت } i$$

انتقال از حالت ۲ به حالت ۱ در دوره Δ که با $P_{2,1}$ نشان داده می شود، عبارتست از احتمال مشاهده حالت ۱ در زمان $t + \Delta$ در صورتی که حالت ۲ در زمان t مشاهده شده باشد. برای تحقق این مورد، دوره زمانی در حالت ۱ باید بزرگ تر از فاصله زمانی وقوع انتقال و پایان دوره Δ باشد. اگر انتقال در زمانی نظیر T ، بین t و $t + \Delta$ رخ دهد، احتمال انتقالی $P_{2,1}$ از حاصل ضرب دو احتمال دیگر به دست خواهد آمد. احتمال انتقال از حالت ۲ که در زمانی بین t و $t + \Delta$ محقق می شود و احتمال اینکه دوره زمانی حالت ۱ بزرگ تر از $t + \Delta - T$ باشد. نتیجتاً، برای هر مقدار T بین t و $t + \Delta$ ، احتمال انتقال عبارتست از انتگرال این حاصل ضرب برای تمام مقادیر ممکن T . در نهایت پس از محاسبات ریاضی، احتمال انتقال از حالت ۲ به حالت ۱ با رابطه زیر بیان می شود:

$$P_{2,1} = P_2 \lambda_2^{p2} \exp[-(\lambda_2 t)^{p2}] \times \quad (13)$$

$$\int_t^{t+\Delta} T^{p2-1} \exp[-(\lambda_2 t)^{p2} - \lambda_1^{p1}(t + \Delta - T)^{p1}] dT$$

مطابق معادله (۱۲)، λ_i ، تابع نرخ رویداد برای حالت i با رابطه (۸) ارائه می شود و P_i عبارتست از پارامتر P در معادله (۹) برای حالت i .

نهایتاً احتمال انتقال از حالت ۲ به حالت ۰، که با $P_{2,0}$ نشان داده می شود، با رابطه زیر ارائه می شود:

$$P_{2,0} = 1 - P_{2,2} - P_{2,1} = R_2(t, \Delta) - P_2 \quad (14)$$

همانند دو متغیره، احتمالات انتقالی نمونه چند متغیره و سه حالتی برای هر نقطه در زمان t و در دوره Δ بر مبنای معادلات (۱۲) و (۱۳)، رابطه (۱۴) قابل محاسبه است. بسط روابط بر مبنای نمونه ای با بیش از سه حالت از رفتار مشابهی تبعیت می کند.

۴-۴ بکارگیری مدل برای پیش‌بینی زوال ریل

همان‌طور که گفته شد، با توجه به زیاد بودن هزینه‌های تعمیر و نگهداری مربوط به ریل در این تحقیق به پیش‌بینی وضعیت این جزء مهم پرداخته می‌شود. همچنین نظر به اینکه تنها این عیب در سطح شبکه در کشور دارای بانک اطلاعاتی است و تنها قادر به اندازه‌گیری این عیب از عیوب بی‌شمار ریل در راه آهن کشور با بکارگیری ماشین اندازه‌گیری خط نیستیم، در نتیجه در این تحقیق به پیش‌بینی وضعیت ریل بر مبنای سایش آن پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که از معدود کارهایی که در زمینه پیش‌بینی زوال ریل انجام شده است، مربوط به یک پروژه کارشناسی در استرالیاست که به توسعه مدلی برای زوال ریل با پیش‌بینی شکست ریل پرداخته است [Kumar, 2006] و بررسی در زمینه زوال ریل بر اساس سایش انجام نشده است.

به منظور بررسی کارایی مدل، مدل پیشنهادی، بر روی یکی از خطوط کشور آزموده می‌شود. به این منظور محور لرستان به دلیل بحرانی بودن وضعیت ریل آن و وجود تعداد قوسهای فراوان برگزیده شده است. ترافیک عبوری از این محور بیشتر باری بوده و دارای ریل U33 است. از مشخصات بارز این محور، داشتن تعداد زیادی قوس با شعاع کم است که سایش بیشتر ریل را سبب می‌شود. در ادامه مقاله به حل مدل پیشنهادی زوال ریل برای سایش در بخشی از محور لرستان پرداخته می‌شود تا مدل پیشنهادی ملموس تر گردد.

۵. مطالعه موردی در راه آهن ناحیه لرستان

در این بخش مدل شرح داده شده، برای سایش ریل در بخشی از مسیر ناحیه لرستان به طول ۲ کیلومتر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است که به منظور ساده‌سازی و با توجه به این که مهم‌ترین متغیر سببی که بر سایش ریل موثر است، ترافیک عبوری است، در این مقاله تنها این متغیر در حل مدل وارد شده است. در ضمن به منظور اندازه‌گیری سایش ریل در این محور از اطلاعات ماشین اندازه‌گیر خط EM120 استفاده شده است که اطلاعات مربوط به سه دوره آن با فواصل حدود ۶ ماه ($\Delta = 0.5$)

یکی از سوالات بحث برانگیز در حوزه مدل‌سازی زوال زیرسازه‌ها، اعتبار فرضیات مارکوفین بوده است. در مبحث احتمالات، این امر معادل فرض عدم وابستگی یا استقلال از تاریخچه است که قبلاً به عنوان استقلال دوره تداوم یا فقدان حافظه به آن اشاره می‌شد. در نمونه دو متغیره، تاریخچه با زمانی واقعی که در وضعیت فعلی ۱ صرف می‌شود توصیف می‌گردد. برای نمونه چند متغیره، تاریخچه با بعد دومی همان سن در زمانی که وارد وضعیت فعلی می‌شود نیز توصیف می‌گردد. برخی از محققین سعی کرده‌اند تا به طور مستقیم وابستگی تاریخچه‌ای را در مدل‌های زوال زمان گسسته بر پایه وضعیت وارد کنند. در واقع، وابستگی به دو بعد تاریخچه را می‌توان به طور رسمی در زمینه روش توسعه یافته آزمود [Mishalani and Madanat, 2002].

در ابتدا، وابستگی به زمانی که در وضعیت فعلی صرف شده است آزموده می‌شود. اگر احتمال انتقال به خارج از حالت، مستقل از زمانی است که در حالت صرف شده است، سپس خصوصیات استقلال دوره زمانی اعمال می‌شود و همان‌طور که در بخش‌های قبلی مطرح شد، تابع نرخ تداوم ثابت بوده و نشان‌دهنده دوره زمانی T که از PDF نمایی تبعیت می‌کند، است. وابستگی تابع نرخ رویکرد به زمانی که در آن حالت صرف شده را می‌توان با بررسی شکل تابع رویداد تخمین زده شده، شناسایی کرد.

در نمونه تابع رویداد و بیال، این امر به سادگی در مقدار پارامتر P منعکس شده است. استقلال دوره زمانی وقتی رخ می‌دهد که $P=1$ باشد و وابستگی مثبت دوره تداوم وقتی است که $P>1$ باشد. بنابراین با آزمودن $P=1$ می‌توان وابستگی مثبت دوره زمانی را آزمود. اگر مقدار تخمین زده شده برای P بزرگ تر از یک باشد، فرضیه بی‌اعتبار بوده و وابستگی مثبت دوره تداوم تأیید خواهد شد. در غیر این صورت، فرضیه رد نشده و به این معنی است که P از نظر آمار غیر از یک نیست، و بر مبنای آن می‌توان با قرار دادن P برابر یک که نشان‌دهنده PDF نمایی است مجدداً تابع نرخ را تخمین زد.

توسعه مدل احتمالاتی زوال بر مبنای توزیع و بیال برای سایش ریل با ...

به عنوان مبنای ترافیکی قرار داده و ترافیک عبوری در هر دوره، نسبت به آن به دست می‌آید. با بررسی در بارنامه‌های عملکرد بار و مسافر در راه آهن مشخص شد که اغلب ترافیک عبوری در ناحیه لرستان باری است و همچنین با توجه به حجم ترافیک عبوری که نزدیک به ظرفیت محور است، نرخ تغییرات ترافیک ماهیانه تقریباً ثابت است که در این تحقیق برابر ۱ در نظر گرفته شده است. حال با توجه به جدول ۲ و نرخ تغییرات ترافیک ماهیانه، ترافیک عبوری در هر دوره محاسبه می‌شود:

ترافیک دوره اول (از ابتدای سال ۸۵):

$$\frac{3389}{12} \times 10 + \frac{3389}{12} \times \frac{1}{2} = 2965 \text{ هزار تن}$$

ترافیک دوره دوم (از ابتدای سال ۸۵): ۴۳۳۷ هزار تن

ترافیک دوره سوم (از ابتدای سال ۸۵): ۵۷۸۴ هزار تن

۵-۱ بخش مورد مطالعه و قطعه بندی آن

محدوده مورد نظر در حدفاصل ایستگاههای چم سنگر - کشور (از کیلومتر ۹۷۶+۵۲۵ الی ۰۲۹+۵۴۱) انتخاب شده است. لازم به ذکر است که این دو کیلومتر از ۱۰ قطعه ۲۰۰ متری تشکیل شده است که همه آنها مربوط به قوسهایی با شعاع ۲۵۰ مترند (برخی از قطعات مجاور هم و در یک قوس و برخی دیگر در قوسهای مختلف)، سپس هر قطعه خود به چهار بخش ۵۰ متری تقسیم شده است. ابتدا مطالعات سایش را بر روی این قطعات ۵۰ متری انجام داده و سپس با میانگین گیری، اطلاعات هر قطعه ۲۰۰ متری به دست می‌آید.

۵-۲ شاخص مورد استفاده در حل مدل و طبقه بندی خطوط

شاخص وضعیت، یک عدد است که از رابطه‌ای محاسبه شده و برای بیان وضعیت خط بکار می‌رود و قادر است میزان سطح

جدول ۲. ترافیک عبوری سالانه محور لرستان

سال	۸۰	۸۱	۸۲	۸۳	۸۴	۸۵	۸۶
تناژ بار عبوری سالانه (هزار تن)	۲۵۴۲	۲۶۸۰	۲۸۶۰	۳۰۱۸	۳۱۹۸	۳۳۸۹	۳۵۹۳

موجود است. اولین دوره، مربوط به نیمه بهمن سال ۱۳۸۵ است و دوره دوم مربوط به حدود ۶ ماه بعد و به همین ترتیب دوره سوم مربوط به تقریباً ۱ سال بعد است.

راه آهن منطقه لرستان به طول تقریبی ۲۰۸ کیلومتر از ایستگاه دورود، آغاز و در ایستگاه اندیمشک پایان می‌یابد که به سه حوزه خط و ابنیه فنی دورود، شهبازان و اندیمشک تقسیم می‌شود. باتوجه به اینکه بیشترین سایش در قوسها و به ویژه قوسهای با شعاع کم رخ می‌دهد، در این تحقیق، ۲ کیلومتر از این محور که در قوس با شعاع ۲۵۰ متر قرار دارد، به منظور مطالعه موردی برگزیده شده است. محدوده مورد نظر در حدفاصل ایستگاههای چم سنگر - کشور انتخاب شده است. ریل بکار رفته در این محدوده U33 با تراورس فلزی است.

آشکار است که بیشتر سایش ایجاد شده در قوسها، سایش جانبی است. به همین علت در این مطالعه، تمرکز خود را بر روی این نوع سایش قرار داده و منظور از سایش در این بخش سایش جانبی است. در ضمن با توجه به اینکه در قوسهایی که سرعت عبوری کم است، (با توجه به باری بودن ترافیک) سایش در ریل داخلی اتفاق می‌افتد، در نتیجه در این تحقیق سایش ریل داخلی هر قوس مدنظر است.

همان گونه که پیش تر توضیح داده شد، مطابق مشخصات فنی و عمومی روسازی خطوط بالاستی راه آهن بیشینه سایش مجاز جانبی برای خطی با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت (طبقه D) و با ریل U33 برابر ۱۵ میلیمتر است (به جدول (۱) مراجعه شود).

ترافیک عبوری در این محور به منظور بکارگیری در توسعه مدل، از سال ۸۰ به بعد با نرخ رشد ۶ درصد به شرح جدول ۲ است [Mishalani and Madanat, 2002].

در حل مدل، ترافیک عبوری از محور مورد مطالعه در هر دوره با شروع از یک مبنا مورد نیاز است. به این منظور ابتدای سال ۸۵ را

ترتیب برای هر قطعه ۲۰۰ متری، سه شاخص که مربوط به سه دوره اندازه‌گیری است، در اختیار است. به منظور تعیین کیفیت خطوط، طبقه‌بندی خطوط با استفاده از شاخص γ صورت می‌گیرد. در جدول (۳) این طبقه‌بندی انجام شده است.

در ضمن اگر متوسط میزان سایشها (در اینجا ۵۰ نقطه) از مرز سایش مجاز (۱۵ میلیمتر) بیشتر شود، آن قطعه در وضعیت ضعیف قرار می‌گیرد که در این رتبه بندی، رتبه ۲ بهترین حالت و رتبه ۰ بدترین حالت است.

۳-۵ تعیین تابع نرخ رویداد $\lambda(t)$

به منظور یافتن λ می‌بایست نمودار نمایی بین شاخص γ و ترافیک عبوری ترسیم شود. معادله منحنی به دست آمده، همان رابطه λ با ترافیک (X) است. با توجه به وجود ۱۰ قطعه ۲۰۰ متری، پس ۱۰ رابطه λ بر حسب ترافیک به دست می‌آید.

از طرفی همان طور که پیش تر اشاره شد، برای سناریوی سه حالتی همانند مطالعه موردی این تحقیق (سه حالت خوب، متوسط، ضعیف با سه رتبه ۲، ۱، ۰) نیاز به λ_1 (برای حالت i که $i=0, 1, 2$) است. از آنجا که خروج از حالت ۰ یا ضعیف امکان پذیر نیست و حالتی بدتر از آن وجود ندارد، پس احتمال ماندن در این حالت پس از یک دوره ۱ است ($P_{0,0} = 1$). در نتیجه تنها می‌بایست λ_1 و λ_2 را یافت. از بین ده λ به دست آمده، مشاهده شد که پنج مورد آن مربوط به خروج از حالت ۲ و پنج مورد آن مربوط به خروج از حالت ۱ است. به عبارت دیگر ۵ رابطه برای λ_1 و ۵ رابطه برای λ_2 به دست آمد. از بین هر ۵ رابطه می‌بایست رابطه‌ای که با دقت بیشتری برازش شده و R_2 آن به عدد ۱

سرویس‌دهی خط را بیان کند. در صورتی که شاخص وضعیت در دوره‌های مشخص بهره‌برداری اندازه‌گیری شود، با رسم نمودار شاخص وضعیت در مقابل تناژ عبوری می‌توان تابع زوال تجربی هر شاخص را تعیین کرد، که این تابع اهمیت ویژه‌ای در مدیریت نگهداری و تعمیر خطوط دارد.

شاخصی که در این تحقیق از آن بهره گرفته شده است و برای بیان وضعیت ریل بکار برده شده، قادر است میزان سطح سرویس‌دهی ریل را بیان کند. این شاخص که آن را با γ نمایش می‌دهیم، بر اساس نسبت دو مساحت تعریف می‌شود. اگر نمودار میزان سایش (محور عمودی بر حسب میلیمتر) به کیلومتر (محور افقی بر حسب متر) را رسم کنیم و مساحت زیر این نمودار را S_W بنامیم، آنگاه رابطه زیر به طور واضح تعریف این شاخص را بیان می‌کند:

$$\gamma = \frac{S_W}{S_M} = \frac{\sum Y}{S_M} \quad (15)$$

که در آن:

S_W : مساحت زیر نمودار میزان سایش به مسافت که با توجه به اینکه ماشین اندازه‌گیر اطلاعات سایش را در هر یک متر اندازه‌گیری می‌کند و در نتیجه ما میزان سایش (Y) را در هر ۱ متر داریم، پس مساحت زیر نمودار برابر مجموع سایش در ۵۰ نقطه در قطعات ۵۰ متری است.

S_M : مساحت سایش مجاز که برابر سایش مجاز جانبی (۱۵ میلیمتر) ضربدر طول قطعه (۵۰ متر) است.

با استفاده از این تعریف، شاخص هر قطعه ۵۰ متری را برای هر دوره برداشت ماشین اندازه‌گیر خط یافته و سپس با میانگین‌گیری بین ۴ قطعه، شاخص خرابی سایش ریل برای هر قطعه ۲۰۰ متری در هر دوره اندازه‌گیری (دوره کاری)، به دست می‌آید. به این

جدول ۳. طبقه بندی خطوط بر اساس شاخص γ

حدود شاخص γ	$0 < \gamma < 0.25$	$0.25 < \gamma < 0.75$	$0.75 < \gamma$
عنوان کیفی	خوب	متوسط	ضعیف
رتبه	۲	۱	۰

توسعه مدل احتمالاتی زوال بر مبنای توزیع ویبال برای سایش ریل با ...

درصد به وضعیت متوسط می‌رود و به احتمال ۱ درصد به وضعیت ضعیف می‌رود. در صورتی که بیشترین احتمال مینا قرار گیرد، می‌توان پیش‌بینی کرد که پس از گذشت ۶ ماه، سایش ریل در وضعیت خوب باقی می‌ماند.

$$p(t=0) = [1 \quad 0 \quad 0]$$

$$p(t=0.5) = p(t=0) \times P(t=0)_{3 \times 3} \quad (18)$$

$$p(t=0.5) = [1 \quad 0 \quad 0] \times \begin{bmatrix} 0.89 & 0.10 & 0.01 \\ 0 & 0.74 & 0.26 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$= [0.89 \quad 0.10 \quad 0.01]$$

منظور از $P(t=0)_{3 \times 3}$ ماتریس احتمال انتقال مربوط به ۶ ماهه اول است.

در مرحله بعد، برای شش ماهه دوم با دادن مقادیر جدول (۵) به عنوان ورودی‌ها، احتمالات به دست آمد.

جدول ۵. اطلاعات ورودی لازم برای تعیین ماتریس انتقال ۶ ماهه دوم

Δ (سال)	t (سال)	X (میلیون تن)
۰/۵	۰/۵	۴/۳۳۷

با داشتن این ورودیها ماتریس احتمال انتقال P برای ۶ ماهه اول به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.14 & 0.01 \\ 0 & 0.69 & 0.31 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (19)$$

توجه شود که بردار وضعیت در زمان t، بردار شروع برای زنجیره بعدی خواهد بود که با یک ماتریس انتقال متفاوت عمل خواهد شد. به این ترتیب اگر در زمان $t = 0.5$ وضعیت به دست آمده برای ۶ ماهه اول به عنوان وضعیت اولیه برای ۶ ماهه دوم در نظر گرفته شود، در این صورت اگر در ابتدای ۶ ماهه دوم ریل در وضعیت خوب با رتبه ۲ قرار داشته باشد، با استفاده از این ماتریس و در صورتی که بیشترین احتمال مینا قرار گیرد، می‌توان پیش‌بینی کرد که پس از گذشت ۶ ماه دوم یا یک سال از شروع تحلیل، سایش ریل همچنان در وضعیت خوب باقی می‌ماند.

نزدیک‌تراست را انتخاب کرد. به این ترتیب λ_1 و λ_2 منتخب که به ترتیب مربوط به نهمین و پنجمین قطعه است، به دست می‌آید.

$$\lambda_2 = 0.099e^{0.282X} \quad (16)$$

$$\lambda_1 = 0.379e^{0.155X}$$

در تابع نرخ رویداد پارامتر دیگری نیز به نام p وجود دارد. همان طور که پیش تر عنوان شد با توجه به عدم تغییر محسوس نرخ سایش با گذشت زمان، در نتیجه در این مطالعه $P_1 = 1$ قرار داده که حالت استقلال دوره تداوم یا فقدان حافظه را نشان می‌دهد و PDF ویبال فرم PDF نمایی به خود بگیرد.

با داشتن λ_1 و P_1 می‌توان به راحتی $\lambda(t)$ را یافت و در تعیین ماتریس انتقال برای هر دوره بکار برد. در ادامه تک تک درایه‌های ماتریس انتقال برای هر دوره محاسبه می‌شود. سپس وضعیت سایش ریل در دوره‌های ۶ ماهه پیش‌بینی می‌گردد.

۴-۵ تعیین ماتریس احتمال انتقال

در نرم‌افزار Excel، با آماده کردن یک Sprit sheet و دادن ورودیهای چون X (ترافیک عبوری) و t (زمان) و Δ (طول یک دوره زمانی) می‌توان تک تک درایه‌ها را یافت. ابتدا برای اولین دوره کاری با دادن مقادیر جدول (۴) به ورودی‌ها، احتمالات به دست آمد.

جدول ۴. اطلاعات ورودی لازم برای تعیین ماتریس انتقال ۶ ماهه اول

Δ (سال)	t (سال)	X (میلیون تن)
۰/۵	۰	۲/۹۶۵

با داشتن این ورودیها ماتریس احتمال انتقال P برای ۶ ماهه اول به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P = \begin{bmatrix} 0.89 & 0.10 & 0.01 \\ 0 & 0.74 & 0.26 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (16)$$

اگر در زمان شروع تحلیل $t = 0$ ریل در وضعیت خوب با رتبه ۲ قرار داشته باشد، با استفاده از این ماتریس می‌توان پیش‌بینی نمود که مطابق رابطه (۱۸) ۶ ماهه بعد، ریل به احتمال ۸۹ درصد در همان وضعیت خوب باقی می‌ماند، به احتمال ۱۰

جدول ۶. اطلاعات ورودی لازم برای تعیین ماتریس انتقال ۶ ماهه ششم

Δ (سال)	t (سال)	x (میلیون تن)
۰/۵	۲/۵	۱۰/۴۷۴

با داشتن این ورودی‌ها ماتریس احتمال انتقال P برای ۶ ماهه اول بصورت زیر به دست می‌آید:

$$P = \begin{bmatrix} 0.38 & 0.61 & 0 \\ 0 & 0.38 & 0.62 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (21)$$

بردار وضعیت در انتهای دوره ششم به صورت زیر خواهد بود:

$$p(t=3) = [0.08 \quad 0.26 \quad 0.66] \quad (22)$$

مطابق رابطه (۲۲) در ۶ ماهه ششم، در صورتی که بیشترین احتمال مبنای قرار گیرد، می‌توان پیش‌بینی کرد که پس از گذشت سه سال از شروع تحلیل، سایش ریل قرار گرفته در قوس، در وضعیت ضعیف قرار دارد و می‌بایست آنرا تعویض کرد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله متدولوژی ویژه ای برای بررسی پدیده زوال ریل و وضعیت سایش ریل و تخمین عمر آن ارائه شد. با استفاده از ماتریس احتمالات گذر (انتقال) گسسته مارکوف، تابع زوال برای سایش ریل ارائه شد. با مطالعه موردی بر روی قوسهای با شعاع ۲۵۰ متر و با برداشت اطلاعات در ۶ دوره زمانی با در نظر گرفتن ترافیک عبوری واقعی (بار ناخالص عبوری سالیانه) با مدل ناهمگن، وضعیت سایش ریل پیش‌بینی شده و نتایج زیر به دست آمد:

الف - در این مطالعه با توجه به روند سایش و بار ناخالص عبور سالیانه، زمان تعویض ریل‌های قوس های ۲۵۰ متر مورد نظر ۶ ماه پس از آخرین برداشت اطلاعات تعیین شد. (۶ ماهه ششم)
 ب - با تخمین عمر ریل، میزان ریل مورد نیاز نگهداری شبکه ریلی (برای هر شرکتی یا منطقه ای) تخمین زده می‌شود، به این ترتیب می‌توان برنامه ریزی مناسبی برای مدیریت ریل انجام داده و زمان تعویض ریلها را مشخص کرد.

$$p(t=0.5) = [0.89 \quad 0.10 \quad 0.01]$$

$$p(t=1) = p(t=0.5) \times P(t=0.5)_{3 \times 3} \quad (20)$$

$$p(t=1) = [0.89 \quad 0.10 \quad 0.01] \times \begin{bmatrix} 0.85 & 0.14 & 0.01 \\ 0 & 0.69 & 0.31 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3} = [0.76 \quad 0.19 \quad 0.05]$$

منظور از $P(t=0.5)_{3 \times 3}$ ماتریس احتمال انتقال مربوط به ۶ ماهه دوم است.

به همین ترتیب با داشتن ترافیک عبوری و زمان مورد نظر می‌توان با دقت ۶ ماهه به پیش‌بینی وضعیت سایش ریل پرداخت.

۵-۵ تخمین عمر ریل بر اساس سایش

اگر روند ذکر شده در بند ۵-۴ برای دوره‌های بعدی ادامه یابد، می‌توان با تقریب خوبی عمر ریل قرار گرفته در قوس با شعاع ۲۵۰ متر را در این مطالعه یافت. باید توجه کرد که دو پارامتر زمان و ترافیک عبوری می‌بایست معلوم شوند. مقدار ترافیک عبوری در هر دوره با در نظر گرفتن نرخ رشد ۶ درصد به دست می‌آید. پارامتر زمان (t) نیز در هر دوره با افزودن ۶ ماه یا نیم سال به دوره قبل به دست می‌آید. به منظور یافتن عمر ریل آنقدر این سیکل را ادامه داده تا ریل با در نظر گرفتن بیشترین احتمال در وضعیت ضعیف قرار گیرد.

با حل مسئله مورد نظر به طریق فوق، در محدوده مورد بررسی در محور لرستان و در ریل‌های قرار گرفته در قوسهای با شعاع ۲۵۰ متر با در نظر گیری زمان ابتدای تحلیل پس از گذشت حدود ۶ دوره یا سه سال، ریل در وضعیت ضعیف قرار می‌گیرد. یعنی در حدود بهمن ماه سال ۸۸ می‌بایست ریل‌های قرار گرفته در محدوده مورد مطالعه با شعاع ۲۵۰ متر تعویض شده باشند.

در مرحله آخر، برای شش ماهه ششم با دادن مقادیر جدول ۶ به عنوان ورودی‌ها، احتمالات به دست آمد.

توسعه مدل احتمالاتی زوال بر مبنای توزیع ویبال برای سایش ریل با ...

- محمدیان، معصومه (۱۳۸۶) "بررسی موضوع توزیع تنش بر روی ریل‌های سائیده شده"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- مشخصات فنی و عمومی روسازی خطوط بالاستی راه‌آهن (۱۳۸۳)

- نشریه ۳۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور

- هخامنشی، رامبد (۱۳۸۴) "یک مدل برای مدیریت تعمیر و نگهداری خطوط راه‌آهن با استفاده از زنجیره مارکوف و برنامه ریزی پویا، مطالعه موردی: راه‌آهن ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

- Kumar, S. (2006) "A study of the rail degradation process to predict rail breaks", BS thesis, Luleå University of Technology, Division of Operation and Maintenance Engineering, Sweden.

- Madanat, S., Ibrahim, W. H. W. and Mishalani, R. (1995) "Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data" Journal of Infrastructure Systems, 1, 120, 6p.

- Mishalani, R. G. and Madanat, S. (2002) "Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models", Journal of Infrastructure Systems, 8, 139, 10p.

- Smith, R. E. (1996) "Infrastructure management system: Course Notes", Texas A & M University.

- Tjan, A. and Pitaloka, D. (2005) "Future prediction of pavement condition using Markov Probability Transition Matrix", Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 5, pp. 772-782.

ج - در مطالعه موردی حاضر به دلیل وجود تنها سه دوره اطلاعات سایش ریل در خط انتخابی تابع نرخ رویداد تنها به وسیله سه نقطه برازش شد. در صورت استفاده از اطلاعات تعداد دوره های بیشتر می توان به نتایج دقیق تری رسید .

د - متدولوژی ارائه شده را می توان برای پیش بینی عمر اجزای دیگر خط و حتی سازه های دیگری بکار برد.

۷. پی نوشتها:

- (۱) متغیرهای علی(سببی) Causal variables
(۲) نوسازی Rehabilitation
(۳) تابع بقا Survival function
(۴) تابع نرخ رویداد Hazard rate function
(۵) تابع چگالی احتمال Probability density function
(۶) عدم وابستگی(استقلال)دوره تداوم Duration independence
(۷) وابستگی منفی و مثبت دوره تداوم
Negative and positive duration dependence
(۸) ویبال Weibull
(۹) خصوصیات مارکوفین Markovian property

۸. مراجع

- جبه‌دار مارالانی، پرویز(۱۳۷۱) "نظریه احتمال و کاربردهای آن"، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.

- ذاکری، جبارعلی، هماوندی، شهریار و محمدوند، حسن(۱۳۸۴) "مقدمه‌ای بر مدیریت نگهداری و تعمیر خطوط راه‌آهن (TMM)", انتشارات مرکز آموزش عالی علمی - کاربردی راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران.

- شرکت مهندسین مشاور مترا (۱۳۸۶) "مطالعات مقدماتی رفع تنگناهای محور جنوب (شناسایی منطقه و ترافیک محور موجود)", وزارت راه و ترابری، شرکت ساخت و توسعه زیربنای حمل‌ونقل کشور.