

ارائه روش توسعه مدل زوال هندسی خطوط ریلی: رگرسیون یا زنجیره مارکوف

امیرحسین اسلامی خوزانی (مسئول مکاتبات)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

تهران، ایران

امیر گل رو، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

مرتضی باقری، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: amir.eslami.kh@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۲۵ پذیرش: ۹۵/۰۳/۱۲

چکیده

امروزه مزایای استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی مانند ایمنی، ظرفیت جابجایی بالا و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی موجب گسترش روزافزون آن گردیده است. به منظور ایجاد اطمینان از عملکرد مناسب این سیستم، برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیرات خطوط ریلی امری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از ملزومات اصلی این نوع برنامه‌ریزی توسعه مدل زوال خطوط ریلی است که به کمک آن می‌توان فهمید چه زمانی وضعیت خطوط ریلی از حداقل قابل قبول مورد نظر تنزل می‌یابد و نیاز به عملیات نگهداری و تعمیر دارد. یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی که بیان‌کننده زوال هندسی خطوط ریلی است شاخص کیفیت خط است. تا بحال تلاش اندکی در خصوص ساخت مدلی برای این شاخص توسط محققین صورت گرفته است. هدف اصلی این مقاله ارائه روش توسعه مدل زوال هندسی خطوط ریلی است. در این تحقیق، مدل زوال خطی به روش تحلیل رگرسیون با استفاده از شاخص کیفیت خط و بر اساس دو سال اطلاعات برداشت شده توسط ماشین اندازه‌گیر خط توسعه یافته و همچنین مدل زوال احتمالاتی با استفاده از روش زنجیره مارکوف تدوین گردیده است. ماتریس‌های انتقال در زنجیره مارکوف بر اساس نظر کارشناسان خبره و بررسی اطلاعات برداشت شده توسط ماشین‌های اندازه‌گیر خط به دست آمده است. نهایتاً مدل‌های زوال به دست آمده از روش رگرسیون و زنجیره مارکوف با یکدیگر مقایسه شده و نتیجه‌گیری شد که نرخ زوال هندسی خط به روش زنجیره مارکوف از روش خطی اندکی کمتر است که این تفاوت از لحاظ آماری معنی‌دار نیست.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون، زنجیره مارکوف، ماتریس‌های انتقال، ماشین اندازه‌گیر خط، نرخ زوال

از آن توضیحات کاملی جهت درک مفاهیم شاخص کیفیت خط و روش زنجیره مارکوف ارائه می‌شود.

۱. مقدمه

سیستم حمل و نقل ریلی بخش گسترده‌ای از زیرساخت‌های حمل و نقل یک کشور را تشکیل می‌دهد و نقش پررنگی نیز در پایداری و بهبود وضعیت اقتصادی دارد چراکه دارای مزایای قابل تاملی چون ایمنی، نظم، راحتی و سرعت بالا است. بدیهی است که در جهت حفظ چنین سیستم کارآمدی نیاز به برنامه‌ریزی‌های منظم و تدوین یافته جهت مدیریت یکپارچه نگهداری و تعمیرات خطوط راه آهن می‌باشد.

مهمترین مسئله برای تدوین عملیات نگهداری و تعمیر خط، آگاهی کامل از وضعیت خط و نرخ زوال آن می‌باشد. نرخ زوال ناشی از عواملی چون نشست خط، خستگی اجزای تشکیل دهنده خط و حتی خوردگی ریل می‌باشد [Vale and Simoes, 2013]. نشست خط می‌تواند منجر به بروز ناهمواری‌های افقی و عمودی گردد. مقدار این نشست‌ها بستگی به عواملی چون سرعت حرکت قطار، بار دینامیکی، کیفیت ساخت و رفتار سازه‌ای خط دارد. کیفیت هندسی خط با پارامترهایی چون تراز قائم، دیلم خط، عرض خط، پیچش و دور تعریف می‌گردد و نرخ زوال هندسی خط نیز با تغییر همین پارامترها طی مرور زمان به دست می‌آید [Macchi et al. 2012].

برای توسعه مدل زوال خط احتمالاتی باید از روش‌های تصادفی^۱ استفاده گردد. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها، روش زنجیره مارکوف است چراکه برای پیش‌بینی آینده به طور کامل مستقل از گذشته عمل کرده و فقط به زمان حال وابسته است. مزیت دیگر این روش توانایی آن در حل مسائل با اطلاعات ناقص، کم کیفیت و مبهم با استفاده از علم خبره می‌باشد.

۲. مفاهیم کلی

برای آشنایی کامل با روند تحقیق حاضر، ابتدا لازم است راجع به مفاهیم استفاده شده در متن توضیحات کاملی داده شود. بدین منظور ابتدا به معرفی ماشینهای اندازه گیر خط آهن پرداخته و پس

۲-۱ ماشین‌های اندازه‌گیر خط

این ماشین‌ها عموماً قادر به اندازه‌گیری پارامترهای هندسی خط آهن بوده و به این منظور از سیستم‌های مختلف اندازه‌گیری به‌ویژه سیستم‌های اتوماتیک استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها دارای کارایی بالایی بوده و از سرعت و دقت مناسبی برخوردار هستند. از جمله پارامترهای قابل اندازه‌گیری به‌وسیله ماشین‌های اندازه‌گیری خط می‌توان به خیز ریل، افتادگی، عرض خط، دور، اعوجاج خط، شتاب عمودی و افقی، سرعت عملیات اندازه‌گیری، کیلومتر و مسافت طی شده اشاره نمود. در نسل‌های جدیدتر این ماشین‌ها قابلیت‌هایی همچون ثبت اطلاعات به صورت عددی، تعیین دقیق موقعیت ماشین با بکارگیری سیستم GPS، تعیین دقیق محل خرابی و امکان استفاده از لیزر جهت ترسیم پروفیل ریل و سیم‌های بالاسری نیز وجود دارد.

۲-۲ شاخص کیفیت خط^۲

یکی از جدیدترین شاخص‌های کیفیت که توسط اداره فدرال آمریکا^۳ در حال بررسی است، شاخص کیفیت خط نام دارد. این روش در خطوط متعددی اجرا و تحلیل شده است و نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که بوسیله این روش می‌توان وضعیت هندسی خط را به‌طور کمی بیان نمود. همچنین این روش همبستگی خوبی با استانداردهای ایمنی برای کلاس‌های مختلف خط دارد [Xu, Sun and Wang, 2011]، علاوه بر این می‌توان شاخص کیفیت خط را به صورت سریع و دقیق توسط ماشین اندازه‌گیر خط محاسبه نمود. به دلیل وجود همین مزایا در مطالعه‌ی پیش‌رو نیز از این شاخص استفاده شده‌است.

به‌منظور محاسبه این شاخص ابتدا باید مقدار میانگین و انحراف معیار را برای هر پارامتر و در بازه مورد نظر به‌دست آورد. با استفاده از فرمول‌های زیر میانگین و انحراف معیار محاسبه می‌شود:

با استفاده از مقادیر انحراف معیار و میانگین و با توجه به حد بالا و پایین، مقدار این شاخص برای هر پارامتر محاسبه می‌شود. این شاخص معرف کیفیت خط است، به طوری که هر چه مقدار آن بیشتر باشد نمایانگر کیفیت بدتر، و هر چه مقدار آن کمتر باشد، نمایانگر کیفیت بهتر خط است.

شکل ۱ مفهوم محاسبه شاخص کیفیت خط را نشان می‌دهد. فرض می‌شود که مقادیر نمونه‌های هندسی خط به صورت یک تابع نرمال توزیع گردند، مقدار میانگین وسط نمودار قرار می‌گیرد. $T+$ و $T-$ به ترتیب مرزهای بالا و پایین را مشخص می‌کنند. $P+$ مساحت قسمتی از منحنی است که مقدار پارامتر بیشتر از حد بالاست و به همین ترتیب $P-$ مساحت قسمتی از زیر نمودار است که مقدار پارامتر کمتر از حد پایین است. شاخص

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \frac{1}{n}(\sum |x|)^2}{(n-1)}} \quad (1)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum |x|}{n} \quad (2)$$

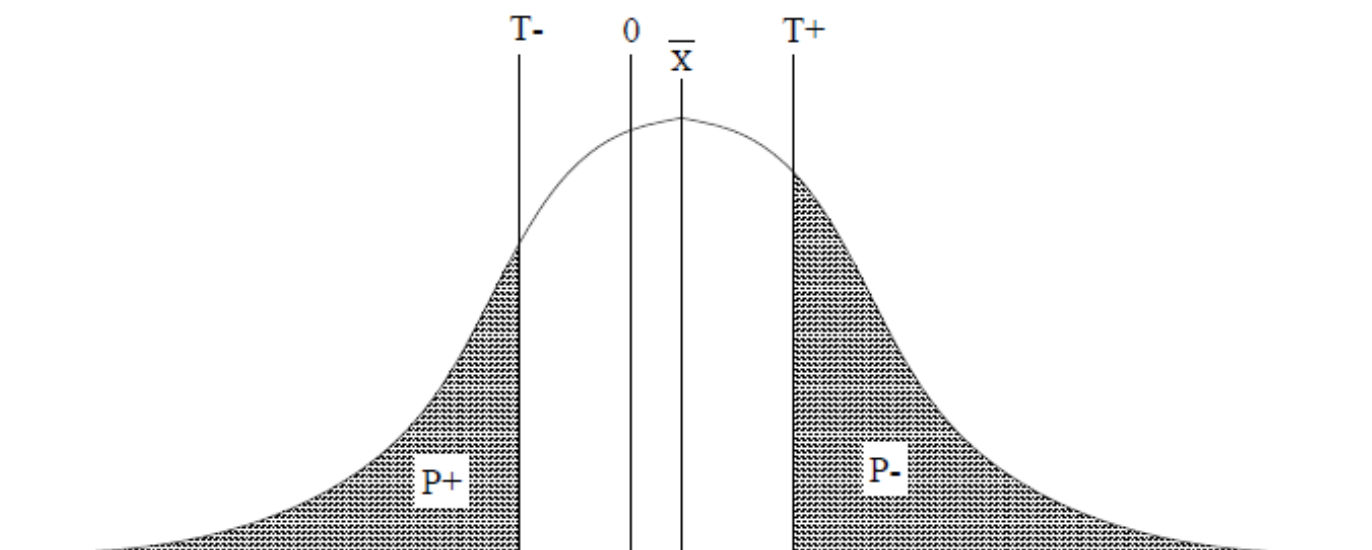
که در روابط بالا:

σ : انحراف معیار بر حسب میلیمتر برای هر پارامتر

\bar{x} : مقدار میانگین بر حسب میلیمتر برای هر پارامتر

x : مقدار هر نمونه بر حسب میلیمتر برای هر پارامتر

N : تعداد هر نمونه در طول بازه تعیین شده (۴۰۰۰ برای یک بازه ۱۰۰۰ متری برای اندازه‌گیری‌های ۲۵ سانتیمتری)



کیفیت خط برابر است با نسبت جمع $P+$ و $P-$ به کل مساحت زیر منحنی (که برابر یک است).

شکل ۱. محاسبه TQI

$$TQI_{Overall} = \frac{0.5TQI_{SFL} + 0.5TQI_{SFR} + TQI_{TWS} + TQI_{XLV} + TQI_{ALL} + TQI_{ALR}}{5} \quad (3)$$

- روند نسبتاً خطی زوال کیفیت بین دوره‌های زیرکوبی
- عدم تاثیرگذاری عملیات زیرکوبی بر نرخ زوال خط [Esveld, 2001]

۲-۴ مدل احتمالاتی و مدل قطعی

مدل های اجرایی می‌توانند به دو دسته اصلی شامل مدل قطعی و مدل احتمالاتی یا تصادفی طبقه‌بندی شوند. مدل‌های قطعی یک مقدار واحد برای متغیر پاسخ (مانند شاخص هندسی) را بر اساس یک سری متغیرهای مستقل ایجاد می‌کنند. در حالی که وظیفه مدل‌های احتمالاتی ایجاد یک تابع توزیع احتمال از متغیر پاسخ است. معمولاً در توسعه مدل‌های اجرایی سه نوع مدل احتمالاتی استفاده می‌گردد [Lytton, 1987]: مدل‌های مارکوف^۱، منحنی‌های باقیمانده^۲ و مدل‌های نیمه مارکوف^۳. مزیت اصلی استفاده از مدل‌های احتمالاتی در نظر گرفتن عدم قطعیت است که نسبت به مدل‌های قطعی نزدیکی بیشتری به واقعیت دارد. مزیت دیگر مدل‌های آماری مخصوصاً زنجیره مارکوف، توانایی آن در حل مسائل با اطلاعات ناقص، کم کیفیت و مبهم با استفاده از علم خبره است. [Amador and Mrawire, 2008]

۲-۵ زنجیره مارکوف

زنجیره مارکوف یک روش مدل‌سازی احتمالاتی گسسته بارفتار سیستمی ایست که بر اساس ماتریس های احتمال انتقال بنا شده است. این ماتریس ها احتمال تغییر وضعیت کیفی سیستم را در بازه زمانی مشخص تبیین می‌کنند. به عبارت دیگر ماتریس‌های احتمال انتقال مجموعه ای از مقادیر احتمالاتی است که بیان کننده احتمال تغییر حالت یک سیستم از حالت موجود به حالت دیگر با گذشت بازه زمانی مشخص را ارائه می‌کند. به منظور توسعه مدل پیش‌بینی مارکوف باید سه شرط در نظر گرفته شود: گسسته بودن بازه های زمانی و حالات سیستم و دارا بودن مشخصه مارکوف [Garcia et al. 2006].

وضعیت حال بستگی دارد [Hillier and Lieberman, 1990]. احتمال شرطی برای فرایند انتقال از یک حالت (i) در زمان (t) به

۲-۲-۱ شاخص کیفیت خط کل

مقدار شاخص کیفیت خط کل برای هر فاصله طولی از پیش تعیین شده و بر اساس مقدار شاخص کیفیت شش پارامتر، بوسیله فرمول شماره (۳) قابل محاسبه است:

به طوری که:

$TQI_{Overall}$: مقدار شاخص کیفیت کل برای فاصله‌ی طولی از پیش تعیین شده

TQI_{SFL} : مقدار شاخص کیفیت پارامتر افتادگی سمت چپ

TQI_{SFR} : مقدار شاخص کیفیت پارامتر افتادگی سمت راست

TQI_{TWS} : مقدار شاخص کیفیت پارامتر پیچش

TQI_{XLV} : مقدار شاخص کیفیت پارامتر دور

TQI_{ALL} : مقدار شاخص کیفیت پارامتر دیلم سمت راست

TQI_{ALR} : مقدار شاخص کیفیت پارامتر دیلم سمت چپ

۲-۲-۳ نرخ زوال هندسه خط

هندسه خط تحت اثر بارهای دینامیکی دچار زوال می‌شود. اگر بلافاصله پس از زیرکوبی قطار از روی خط آهن عبور نماید، باعث به وجود آمدن نشست‌های بزرگی در آن می‌شود. این نشست‌ها معمولاً یکنواخت نیستند و همین امر باعث به وجود آمدن ناهمواری‌هایی با طول موج‌های مختلف می‌شود که توسط وسایل نقلیه ریلی احساس می‌گردد.

همواره نرخ زوال شاخص کیفیت خط نسبت به زمان و یا تناژ بار عبوری سنجیده می‌شود. بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی یک قطعه ۲۰۰ متری از خطوط ریلی انگلستان نتایج زیر به دست آمده است:

- بهبود قابل ملاحظه و نسبتاً ثابت، پس از عملیات زیرکوبی

مشخصه مارکوف به این ترتیب تعریف می‌شود که احتمال شرطی وقوع هر رخدادی در آینده، مستقل از گذشته خود است و تنها به

فرایند زنجیره مارکوف با یک بردار احتمال شرطی $P(0)$ شروع می‌شود که این بردار شرایط اولیه و یا حال قطعه مورد نظر را به صورت احتمالاتی نشان می‌دهد. به عنوان مثال یک بازه ۰ تا ۱۰ را به ۱۰ قسمت به صورت ۱۰ تا ۹ و ۹ تا ۸ و ... و ۲ تا ۱ تقسیم می‌کنیم. حال فرض کنید که شاخص کیفیت در زمان حال با احتمال ۶۰ و ۴۰ درصد به ترتیب در بازه های ۸ تا ۷ و ۷ تا ۶ قرار بگیرد. بنابراین بردار اولیه $P(0)$ به صورت $(0 \ 0 \ 0.6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$ خط با استفاده از شرایط حال و ماتریس احتمال انتقال به صورت زیر به دست می‌آید.

$$P(1) = P(0) \times TPM_1 \quad (9)$$

$$P(2) = P(1) \times TPM_2 \quad (10)$$

که در آن $P(1)$ و $P(2)$ بردار احتمال حالت یک قطعه از خط در زمان های $t=1$ و $t=2$ هستند و TPM_1 و TPM_2 نیز ماتریسهای احتمالی انتقال از زمان $t=0$ به $t=1$ و $t=1$ به $t=2$ می‌باشند. به همین ترتیب بردار حالت یک قطعه از خط در زمان t به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$P(t) = P(t-1) \times TPM_t \quad (11)$$

که در آن $P(t)$ بردار احتمال حالت یک قطعه از خط در زمان t ، $P(t-1)$ بردار احتمال حالت یک قطعه در زمان $t-1$ و TPM ماتریس احتمال انتقال متناسب با انتقال از زمان $t-1$ به t است.

بنابراین می‌توان طبق رابطه زیر با استفاده از بردار اولیه هر قسمت از خط و ماتریس احتمال انتقال متناسب با آن، بردار حالت هر قسمت از خط را در هر زمان دلخواه t به راحتی مشخص نمود.

$$P(t) = P(0) \times TPM_1 \times TPM_2 \times \dots \times TPM_t \quad (12)$$

$$= P(0) \times \prod_{i=1}^t TPM_i$$

حالت دیگر (j) در زمان بعدی $(t+1)$ ، احتمال انتقال نامیده می‌شود (p_{ij}) .

$$p_{ij} = \text{prob} \left[X(t+1) = \frac{j}{X(t)} = i \right] \quad (4)$$

این انتقال اصطلاحاً یک گام نامیده می‌شود، بنابراین احتمال انتقال یک مرحله‌ای به این صورت تعریف می‌شود: احتمال تغییر حالت متغیر تصادفی X از حالت i به حالت j دقیقاً بعد از یک گام (بازه زمانی). (P_{ij}) باید قیده‌های زیر را برآورده سازد [Wang et al. 2006]

$$0 \leq p_{ij} \leq 1, \text{ for all } i \text{ and } j, \text{ and } i, j = 0, 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$$\sum_{j=0}^M p_{ij} = 1, \text{ for all } i \text{ and } i = 0, 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

که در آن i و j در فاصله M حالت قرار می‌گیرند و M نیز تعداد کل حالات است. این احتمالات انتقال می‌توانند به صورت یک ماتریس احتمال انتقال یک مرحله‌ای نمایش داده شوند (TPM^1) :

$$TPM_I = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1M} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{M1} & p_{M2} & \dots & p_{MM} \end{bmatrix} \quad (7)$$

TPM_I حالتی است که در آن زوال و بهبود در اثر عملیات تعمیر و نگهداری هر دو در نظر گرفته شده اند. به عنوان مثال p_{21} حالتی است که در آن یک قطعه در یک گام از حالت ۲ به حالت ۱ برود یا بهبود یابد (حالت ۱ فرض می‌شود که سیستم دارای بهترین کیفیت است). این انتقال تنها زمانی رخ می‌دهد یک عملیات تعمیر و نگهداری انجام پذیرد، در حالی که TPM_D فقط زوال را مدنظر قرار می‌دهد. در این نوع از ماتریس های انتقال مقدار p_{ij} برای هر i که بزرگتر از j باشد برابر صفر است و p_{MM} نیز با توجه به رابطه (۵) برابر یک است. در این مقاله تنها تاثیرات زوال خط در نظر گرفته شده است.

$$0 \leq p_{ij} \leq 1, \text{ for all } i \text{ and } j, \text{ and } i, j = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

که در آن $P(0)$ بردار احتمال حالت هر قسمت از خط در زمان صفر و TPM_i نیز ماتریس احتمال انتقال متناسب با زمان $i-1$ به i ($i=1,2,\dots,t$) است.

۳. مروری بر مطالعات انجام شده

همزمان با شروع روند بررسی نگهداری و تعمیرات خط، بررسی نرخ زوال خط نیز اهمیت ویژه‌ای پیدا کرد، چراکه کارشناسان را قادر به پیش‌بینی وضعیت خط در آینده می‌کرد و این امر کمک شایانی به برنامه‌ریزی‌های نگهداری خط کرده است. در سالهای اخیر با پیدایش قطارهای تندرو، حفظ ایمنی خطوط مرتبط با آن و برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیرات موثر و کارآمد در اولویت کاری کارشناسان قرار گرفته است که به این منظور حتماً باید بتوان پیش‌بینی دقیقی از روند کاهش کیفیت خط داشت. بنابراین اخیراً بررسی‌های علمی و دقیقی در این زمینه صورت پذیرفته است. بررسی‌های نرخ زوال برای کل اجزای خط و یا برای هندسه خط صورت پذیرفته است که در مورد زوال هندسی خط با در نظر گرفتن عملیات نگهداری و تعمیر (نت) و یا بدون در نظر گرفتن آن انجام می‌گردد و در ادامه به توضیح موارد ذکر شده پرداخته می‌شود.

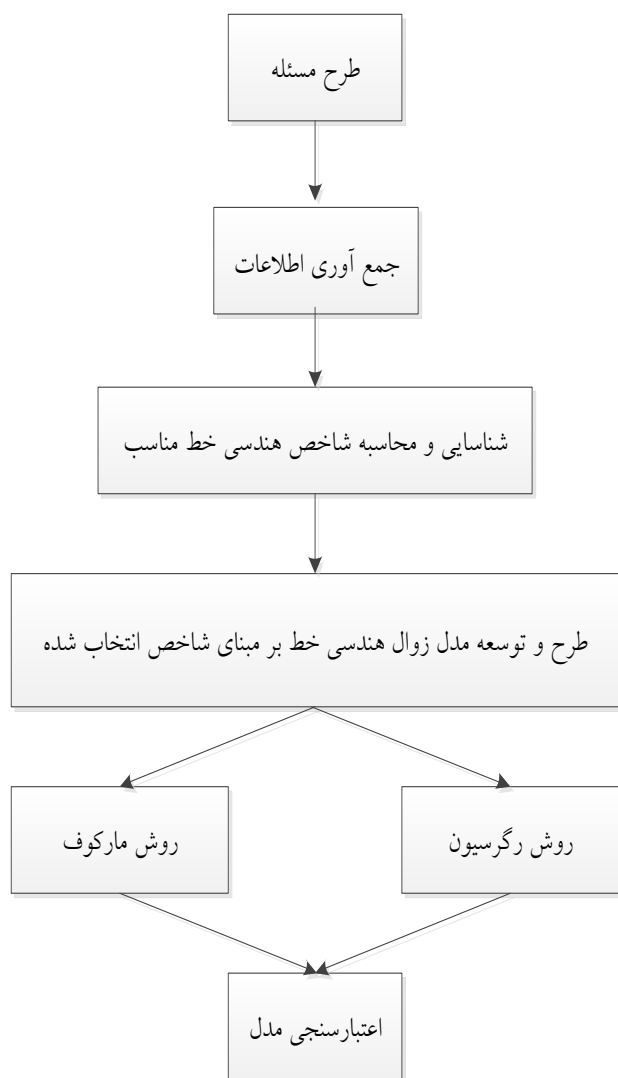
هوانگ به همراه سه نفر از همکارانش [Huang et al. 2010] شاخصی به نام شاخص یکپارچه کیفیت خط^۷ را ایجاد کردند و با استفاده از سه ضریب وزنی متفاوت اقدام به یکپارچه‌سازی نرخ زوال تجهیزات خط نمودند. آن‌ها علت ایجاد این شاخص را لحاظ نکردن خرابی تجهیزات خط در دیگر شاخص‌ها عنوان نمودند. رابطه ریاضی شاخص جدید به صورت جمع وزنی سه شاخص دیگر (شاخص کیفیت خط، شاخص استاتیکی خط^۸ و شاخص شتاب خط^۹) ارائه گردید که موارد اول و دوم بر اساس روابط ریاضی و مورد سوم نیز بر اساس نظر کارشناسان به دست می‌آید.

از طرف دیگر هوان چانگ به همراه دو نفر از همکارانش [Chang and Rengkui and Wei, 2010] در مقاله‌ای تحت عنوان "مدل پیش‌بینی خطی چند مرحله‌ای برای شاخص کیفیت خط" به ساخت مدلی خطی جهت پیش‌بینی روند شاخص

کیفیت خط پرداختند. برای انجام این تحقیق از اطلاعات ماشین اندازه‌گیری خط در بازه ۲۰۰۴-۲۰۰۶ و برای ۴۸۷ کیلومتر از طول خط راه‌آهن کشور چین استفاده شده است. روابط قبلی خطی برای پیش‌بینی مقدار شاخص کیفیت خط شامل یک عدد ثابت (شاخص کیفیت خط اولیه) و یک ضریب (شیب رشد مقدار شاخص کیفیت خط) بود، اما در این مطالعه سه شیب مختلف برای سه مرحله مختلف از نظر عمر سازه (ابتدایی، میانی، پایانی) در نظر گرفته شد و با ترکیب این موارد یک مدل چندمرحله‌ای خطی ایجاد کردند. نتیجه حاصل از این مطالعه ایجاد یک مدل چند مرحله‌ای خطی بود که براساس روش میانگین‌گیری به دست آمده و نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل خطی یک مرحله‌ای حاصل نمود.

در سال ۲۰۱۱ دو نفر از محققان کشور پرتغال [Andrade and Fonseca, 2011] در مقاله‌ای تحت عنوان "عدم قطعیت در زوال هندسی خط" و با استفاده از ۱۵ بار برداشت اطلاعات برای ۳۳۷ کیلومتر مسیر بین لیسبون و پورتو به بررسی عدم قطعیت نرخ زوال خط آهن پرداختند. آن‌ها رابطه خطی بین مقدار انحراف معیار و ترافیک تجمعی را مورد توجه قرار داده و مشاهده کردند که تابع توزیع لوگ‌نرمال^{۱۰} مناسب‌ترین تابع برای توزیع تجربی نرخ زوال راه‌آهن کشور پرتغال است. سپس دو ضریب ثابت این رابطه خطی را به عنوان ضرایب متغیر فرض کرده و با تغییر مقادیر آن‌ها به بررسی عدم قطعیت رابطه پرداختند. این مطالعات بر روی چهار گروه پل‌ها، ایستگاه‌ها، سوزن‌ها و خطوط اصلی صورت پذیرفت که نتایج به دست آمده نشان‌دهنده وجود ارتباط مستقیم بین نرخ زوال و میزان انحراف معیار اولیه بود.

در سال ۲۰۱۲ همین افراد با بررسی همان مسیر ولی برای چهار بار برداشت در سال و از سال ۲۰۰۱ به بعد در مقاله‌ای تحت عنوان "مدل بیض برای ارزیابی زوال هندسی خط در چرخه عمر" به ساخت مدلی جهت پیش‌بینی میزان عدم قطعیت نرخ زوال هندسی پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن توزیع احتمال اولیه و ساخت ماتریس‌های انتقال مناسب موفق به توسعه مدلی جهت ارزیابی روند تغییر میزان عدم قطعیت مرتبط با پارامترهای زوال شدند.



شکل ۲. فلوچارت گام‌های حل مسئله

۴-۱ شناسایی و محاسبه شاخص‌های هندسی خط

تا کنون شاخص‌های هندسی زیادی برای خط‌آهن ساخته شده که همه‌ی آنها بر اساس ترکیب پارامترهای هندسی به‌دست آمده‌اند. شاخص کیفیت خط یکی از جدیدترین آن‌ها است که توسط اداره فدرال آمریکا در حال بررسی است، بر اساس استانداردهای ایمنی تدوین شده این شاخص همبستگی خوبی برای کلاس‌های مختلف خط دارد که بر اساس نتایج حاصل از اجرا و تحلیل این روش در خطوط متعدد، کارآیی موثر این روش در بیان کمی

در سال ۲۰۱۳ هاکان گولر [Guler, 2014] در مقاله‌ای تحت عنوان "پیش‌بینی زوال هندسی خط با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی" و بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده به مدت دو سال و برای طول ۱۸۰ کیلومتر از خطوط راه‌آهن ترکیه، به بررسی روند تغییر نرخ زوال خط با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداخت. در این مطالعه یک شبکه عصبی با ۱۰ ورودی و یک خروجی در نظر گرفته شد که ورودی‌های آن شامل بار ترافیکی، سرعت، دور، شعاع انحنای، نوع تراورس، نوع ریل، طول ریل، ریزش سنگ، برف و سیل بوده و خروجی آن نیز نرخ زوال به‌دست آمده است.

۴. طرح مسئله و روش تحقیق

هدف این تحقیق توسعه مدل زوال خط با استفاده از اطلاعات ماشین اندازه‌گیر خط است. به این منظور از ۱۵ بار برداشت مقادیر پارامترهای هندسی خط توسط ماشین EM-50 شرکت بهره‌برداری مترو تهران و حومه استفاده شده است. طول مسیر مورد بررسی ۳۹ کیلومتر و بازه زمانی برداشت اطلاعات نیز حدود ۲۰ ماه است. از جمله مشخصات سازه‌ای خط می‌توان به استفاده از تراورس‌های مونوبلوک B70 به فاصله ۶۰ سانتی‌متر، ریل UIC60، پابند وسلو SKL1 و پاندرول اشاره نمود. سرعت سیر قطارها ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت بوده که با بار محوری ۲۲/۵ تن به‌طور متوسط با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه در حال حرکت هستند.

برای بالا بردن دقت کار باید بتوان با ارائه راهکاری طول مسیر را به قسمت‌های کوچکتری تقسیم کرد و داده‌های مربوط به هر قسمت را بررسی نمود. به این منظور ابتدا طول مسیر ۳۹ کیلومتری را به ۳۹ قسمت یک کیلومتری تقسیم کرده و در هر قسمت پارامترها و شاخص‌های هندسی محاسبه شده توسط ماشین اندازه‌گیری خط ثبت می‌گردد. با بررسی روند تغییر شاخص کیفیت خط می‌توان مقدار آن را در آینده پیش‌بینی نموده و یک مدل زوال خط تدوین کرد.

در ادامه به‌منظور آشنایی با روند انجام پروژه، فلوچارت گام‌های حل مسئله ارائه شده و پس از آن به توضیح هر مرحله از آن پرداخته می‌شود.

می‌کند. اطلاعات مورد بررسی برای فواصل ۱ کیلومتری در یک بازه زمانی ۲۴ ماهه (مهر ۹۱، آذر ۹۱، بهمن ۹۱، اسفند ۹۱، خرداد ۹۲، تیر ۹۲، مرداد ۹۲، شهریور ۹۲، مهر ۹۲، آبان ۹۲، دی ۹۲، بهمن ۹۲، فروردین ۹۳، اردیبهشت ۹۳، تیر ۹۳، مرداد ۹۳ و شهریور ۹۳) هستند.

حال به منظور به دست آوردن نرخ زوال محور مورد بررسی، برای هر قسمت (۳۹ بازه یک کیلومتری) مقدار شاخص کیفیت خط کل در بازه زمانی مورد نظر (از مهر ۹۱ تا شهریور ۹۳) ثبت می‌شود. سپس با رسم نمودار زوال هندسی خط که محور افقی آن زمان و محور عمودی آن مقدار شاخص کیفیت خط می‌باشد می‌توان وضعیت هندسی هر قسمت از خط را در طول زمان به دست آورد. برای به دست آوردن وضعیت کلی خط نیز می‌توان میانگین شاخص کیفیت خط هر ماه را (برای هر ۳۹ قسمت) محاسبه نمود، چراکه شرایط خط در کل مسیر ۳۹ کیلومتری یکسان بوده و هیچ مقدار عددی منفی در مقادیر شاخص کیفیت خط وجود ندارد، بنابراین میانگین گیری به عنوان بهترین روش جهت بررسی وضعیت کلی خط است. علاوه بر این، در سال ۲۰۰۵ پروفیسور ژو [Xu, 2005] نیز به منظور محاسبه شیب نرخ زوال خطوط راه آهن چین از روش میانگین گیری استفاده کرده است.

۵. ارائه و تحلیل نتایج

ماشین اندازه گیر خط EM-50 مقدار میانگین و انحراف معیار تمامی پارامترهای هندسی خط را برداشت کرده است و سپس با محاسبه سطح زیر منحنی شکل ۱ و همچنین رابطه ۳ به ترتیب مقدار شاخص کیفیت خط برای تمامی پارامترهای هندسی و مقدار شاخص کیفیت کل محاسبه شده است که در جدول ۱ آورده شده است.

در نظریه آمار و احتمال ضریب تغییرات^{۱۱} یک معیار بهنجار است که برای اندازه گیری توزیع و پراکندگی داده های آماری به کار می‌رود. به عبارت دیگر ضریب تغییرات، میزان پراکندگی به ازای یک واحد از میانگین را بیان می‌کند. این مقدار زمانی تعریف شده است که میانگین صفر نباشد. این مقدار بی بعد است و به همین دلیل مناسب برای داده های آماری است که واحدهای

وضعیت هندسی خط به اثبات رسیده است [Xu and Sun and Wang, 2011].

علاوه بر مزایای ذکر شده برای این روش، می‌توان مقدار شاخص کیفیت خط را به صورت آنی و با دقت بالا توسط ماشین های اندازه گیری خط محاسبه نمود. به منظور محاسبه این شاخص باید مراحل زیر انجام پذیرد:

- محاسبه مقدار میانگین و انحراف معیار برای هر پارامتر (افتادگی چپ، افتادگی راست، دیلم چپ، دیلم راست، پیچش، دور، عرض خط) و در بازه مورد نظر (در اینجا یک کیلومتر)
 - برازش تابع توزیع نرمال بر مقادیر اندازه گیری شده پارامترها
 - مشخص کردن حدود مجاز پارامترها به صورت خطوط عمودی بر روی نمودار تابع نرمال
 - محاسبه سطح قرار گرفته در زیر تابع توزیع نرمال که خارج از محدوده مجاز است
- مساحت محاسبه شده در مرحله آخر برابر مقدار شاخص کیفیت خط است که هر چه مقدار آن بیشتر باشد نشان دهنده کیفیت بدتر و هر چه مقدار آن کمتر باشد نشان دهنده کیفیت بهتر خط است.

۴-۲ مدل زوال هندسه خط بر مبنای شاخص انتخاب شده

روش های بازرسی خط به دو دسته بازرسی دینامیکی و بازرسی استاتیکی مصنوعی تقسیم می‌شوند که هر دو روش قابلیت نمایش کیفیت خط را دارند. اما روش اول دارای مزیت استفاده از قطارهای پرسرعت به منظور انجام بازرسی خط است. در حال حاضر ماشین اندازه گیری خط شرکت بهره برداری مترو تهران و حومه پارامترهای هندسی خط را برداشت کرده و با محاسبه شاخص کیفیت خط وضعیت هندسی خط را به صورت کمی بیان می‌کند. این دستگاه شاخص کیفیت خط را برای هر هفت پارامتر هندسی (افتادگی چپ و راست، دیلم چپ و راست، دور، پیچش و عرض خط) محاسبه کرده و با استفاده رابطه ۳ یک مقدار شاخص کیفیت خط نیز به عنوان شاخص کل محاسبه

اطلاعات برداشت شده توسط ماشین اندازه گیر خط برای هر ماه آورده شده است که مشاهده می شود همه مقادیر بین ۰/۲ و ۰/۳ بوده و این به معنی دقت کافی و پراکندگی کم داده ها و در نتیجه استفاده منطقی از روش میانگین گیری است.

مختلفی دارند. ضریب تغییرات تنها قابل کاربرد برای داده های نسبی است و نمی توان از آن برای سنجش مقادیری که می توانند مقدار منفی بگیرند استفاده کرد یا به بیان بهتر نمی توان از آن برای سنجش مقادیر فاصله ای بهره برد. در ادامه ضریب تغییرات

جدول ۱. مقدار شاخص کیفیت خط کل

کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	کیلو متر	QI کل
۱۳۶۱۲	۱۲۶۱۱	۱۱۶۱۰	۱۰۶۰۹	۹۶۰۸	۸۶۰۷	۷۶۰۶	۶۶۰۵	۵۶۰۴	۴۶۰۳	۳۶۰۲	۲۶۰۱	۱۶۰	۱۰	
۸	۷	۵	۵	۹	۹	۶	۶	۸	۶	۷	۶	۱۰	۹۱	
۸	۷	۵	۵	۹	۹	۶	۶	۸	۶	۷	۶	۱۰	آذر	
۸	۷	۵	۵	۹	۹	۶	۶	۸	۶	۷	۶	۱۱	بهمن	
۹	۸	۶	۶	۱۰	۱۰	۷	۷	۹	۶	۸	۷	۱۱	اسفند	
۹	۸	۶	۶	۱۰	۱۰	۷	۷	۹	۷	۸	۸	۱۱	خرداد	
۹	۸	۶	۶	۱۰	۱۰	۷	۷	۹	۷	۸	۹	۱۱	تیر	
۹	۸	۶	۷	۱۰	۱۰	۷	۷	۹	۷	۸	۹	۱۱	مرداد	
۱۰	۹	۷	۷	۱۱	۱۱	۸	۸	۱۰	۷	۸	۹	۱۲	شهریور	
۱۰	۹	۷	۷	۱۱	۱۱	۸	۸	۱۱	۸	۹	۱۰	۱۲	مهر	
۱۰	۹	۷	۸	۱۱	۱۱	۸	۸	۱۱	۸	۹	۱۰	۱۲	آبان	
۱۱	۹	۷	۸	۱۱	۱۲	۸	۸	۱۱	۸	۹	۱۰	۱۲	دی	
۱۱	۱۰	۸	۸	۱۲	۱۲	۹	۹	۱۲	۹	۱۱	۱۱	۱۳	بهمن	
۱۲	۱۱	۹	۹	۱۲	۱۲	۱۰	۱۰	۱۲	۹	۱۱	۱۱	۱۳	فروردین	
۱۲	۱۱	۹	۹	۱۲	۱۲	۱۰	۱۰	۱۲	۹	۱۱	۱۱	۱۳	اردیبهشت	

جدول ۲. ضریب تغییرات داده ها

زمان (ماه)	مهر ۹۱	آذر ۹۱	بهمن ۹۱	اسفند ۹۱	خرداد ۹۲	تیر ۹۲	مرداد ۹۲	شهریور ۹۲	مهر ۹۲	آبان ۹۲	دی ۹۲
میانگین	۷.۰۳	۷.۰۵	۷.۱۳	۷.۵۹	۸	۸.۱۳	۸.۲۳	۸.۶۲	۸.۹۷	۹.۲۳	۹.۴۱
انحراف معیار	۱.۹۷	۱.۹۶	۲.۰۹	۱.۹۶	۱.۹۱	۲.۰۳	۱.۹۹	۲.۰۶	۲.۱۳	۲.۰۶	۲.۰۵
ضریب تغییرات	۰.۲۸	۰.۲۸	۰.۲۹	۰.۲۶	۰.۲۴	۰.۲۵	۰.۲۴	۰.۲۴	۰.۲۴	۰.۲۲	۰.۲۲

ارائه روش توسعه مدل زوال هندسی خطوط ریلی: رگرسیون یا زنجیره مارکوف

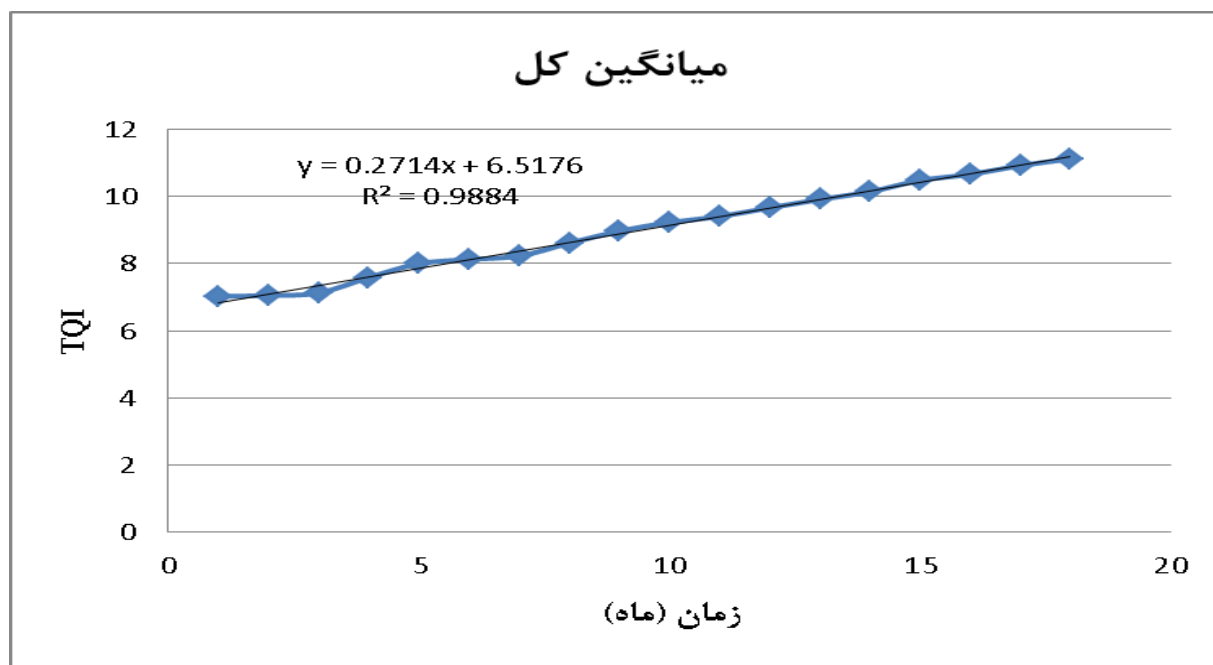
۱-۵ مدل زوال هندسی رگرسیون خطی

در رابطه ریاضی به دست آمده T نشان‌دهنده زمان بر حسب ماه و TQI نیز نشان‌دهنده مقدار شاخص کیفیت خط است. ضریب تعیین R^2 بیانگر میزان تغییراتی از متغیر وابسته (TQI) است که توسط متغیر مستقل (T) قابل توضیح است. این ضریب (در این مقاله برابر ۰,۹۸ به دست آمده) در واقع یکی از شاخص‌های نشان‌دهنده اعتبار مدل رگرسیونی است که در رابطه ۱۳ ارائه شده است.

مقادیر کمی که بر اساس آن مدل زوال هندسی رگرسیون خطی به دست آمده است مطابق جدول ۳ می‌باشد.

رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل رگرسیون نامیده می‌شود و به فن و تکنیک آماری برای بررسی و مدلسازی ارتباط بین متغیرها تحلیل رگرسیونی گفته می‌شود. بر اساس تعریف ارائه شده برای به دست آوردن رابطه بین مقادیر شاخص کیفیت خط و زمان، مقدار عددی شاخص در زمان اندازه‌گیری شده ثبت گشته و پس از آن یک رابطه خطی بر آن برازش شده است که حاصل آن به صورت زیر و با خطای استاندارد $0,11$ است:

$$TQI = 0.27T + 6.51 \quad (13)$$



شکل ۳. نرخ زوال هندسی خطی

جدول ۳. میانگین شاخص کیفیت خط کل برای هر ماه

میانگین TQI کل در هر ماه																	
مهریور ۹۳	مرداد ۹۳	تیر ۹۳	خرداد ۹۳	اردیبهشت ۹۳	فروردین ۹۳	بهمن ۹۲	دی ۹۲	آبان ۹۲	مهر ۹۲	شهریور ۹۲	مرداد ۹۲	تیر ۹۲	خرداد ۹۲	اسفند ۹۱	بهمن ۹۱	آذر ۹۱	مهر ۹۱
۱۱.۳۲	۱۱.۱۷	۱۰.۸۹	۱۰.۶۳	۱۰.۲۸۲	۱۰.۱۷۹	۹.۸۹۷	۹.۶۱۰	۹.۳۳۱	۸.۹۷۴	۸.۶۱۵	۸.۲۳۱	۸.۱۲۸	۸	۷.۵۹۰	۷.۱۲۸	۷.۰۵۱	۷.۰۲۶

۲-۵ مدل زوال هندسی احتمالاتی

همانطور که پیش از این اشاره شد مدل زنجیره مارکوف نیازمند ماتریس‌های انتقال احتمالاتی و بردار احتمال اولیه است که با استفاده از دانش افراد خبره (۲۱ نفر از کارشناسان شرکت بهره برداری مترو تهران و حومه) در این مقاله ارائه شده است. بر اساس میانگین نظرات این افراد بردار احتمال اولیه برابر (0 0.33 0.67 0 0) به دست آمده است. لازم به ذکر است که با استفاده از داده‌های تاریخیچه‌ای نیز می‌توان ماتریس‌های انتقال را تشکیل داد. برای تشکیل ماتریس‌های انتقال نیز از میانگین ماتریس‌های به دست آمده بر اساس نظرات افراد متخصص و همچنین بررسی اطلاعات مربوط به کیفیت خط طی ۲ سال استفاده شده است چرا که با استفاده از روش میانگیری می‌توان مقدار خطا را کاهش داد. به این جهت ابتدا مقدار شاخص کیفیت خط را به پنج بازه ۰-۳ و ۳-۶ و ۶-۹ و ۹-۱۲ و ۱۲-۱۵ تقسیم

کرده و احتمال ماندن و یا تنزل به بازه بعدی در مدت زمان مورد نظر بررسی می‌شود. به عنوان مثال همان‌طور که در ماتریس ارائه شده در رابطه ۱۴ مشاهده می‌شود احتمال اینکه کیفیت خط پس از گذشت ۳ ماه در رده کیفی ۰-۳ بماند حدود ۷۰٪ و احتمال اینکه به رده کیفی ۳-۶ تنزل پیدا کند ۳۰٪ است.

TPM_I ، TPM_H و TPM_D به ترتیب ماتریس‌های حاصل از نظرات کارشناسان، داده‌های تاریخیچه‌ای و میانگین هر دو روش است. همانطور که مشاهده می‌شود ماتریسهای TPM_H و TPM_I با یکدیگر تفاوت چندانی ندارند. این مهم با استفاده از روش آزمایش تی مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه شد که از لحاظ آماری تفاوت معناداری میان ماتریسهای مذکور وجود ندارد و از این پس در محاسبات TPM_D مورد استفاده قرار می‌گیرد که خطای کمتری از دو ماتریس دیگر دارد.

(۱۴)

$$TPM_I = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0-3 & 3-6 & 6-9 & 9-12 & 12-15 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0-3 \\ 3-6 \\ 6-9 \\ 9-12 \\ 12-15 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.71 & 0.29 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.73 & 0.27 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.82 & 0.28 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$TPM_H = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0-3 & 3-6 & 6-9 & 9-12 & 12-15 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0-3 \\ 3-6 \\ 6-9 \\ 9-12 \\ 12-15 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.73 & 0.27 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.77 & 0.23 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.86 & 0.14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$TPM_D = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0-3 & 3-6 & 6-9 & 9-12 & 12-15 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0-3 \\ 3-6 \\ 6-9 \\ 9-12 \\ 12-15 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.72 & 0.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$TQI(t) = TQI(0) \times \prod_{i=1}^t TPM_i \quad (15)$$

$i = 1, 2, \dots, 6$

جهت پیش‌بینی وضعیت آینده خط راه آهن، می‌توان رابطه (۱۱) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

ارائه روش توسعه مدل زوال هندسی خطوط ریلی: رگرسیون یا زنجیره مارکوف

که در آن $EV_{TQI}(t)$ مقدار قابل انتظار بردار احتمال شرطی خط آهن در انتهای بازه زمانی t و AVE_{TQI} بردار میانگین وضعیت خط بوده و به صورت (1.5 4.5 7.5 10.5 13.5) تعریف می‌گردد. با استفاده از این رابطه می‌توان مقادیر وضعیت هندسی خط را در هر مقطع زمانی به فواصل سه ماهه تا دو سال محاسبه کرد و با نمایش آن در مقابل زمان، مدل زوال هندسی خط را به روش مارکوف ارائه کرد همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

که در آن $TQI(0)$ بردار احتمال اولیه و $TQI(t)$ نیز بردار شرایط خط در انتهای بازه زمانی t می‌باشد که از ضرب ماتریس‌های انتقال در بردار شرایط احتمال اولیه به دست می‌آید. بدین ترتیب وضعیت هندسی خط برای هر زمانی در آینده به صورت برداری قابل محاسبه است اما در بسیاری از محاسبات ارائه یک مقدار اسکالر مورد نیاز است. بدین منظور $TQI(t)$ را در بردار میانگین وضعیت هندسی خط ضرب کرده تا امید ریاضی یا ارزش مورد انتظار وضعیت هندسی خط به دست آید.

$$EV_{TQI}(t) = AVE_{TQI} \times TQI(t) \quad (16)$$



شکل ۴. مدل‌های خطی و احتمالاتی زوال خط

(۱۷)

$$EV(1)_{TQI}(t) = [0 \quad 0.33 \quad 0.66 \quad 0 \quad 0] \times \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.72 & 0.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1.5 \\ 4.5 \\ 7.5 \\ 10.5 \\ 13.5 \end{bmatrix} = 7.289$$

$$EV(2)_{TQI(t)} = [0 \quad 0.33 \quad 0.66 \quad 0 \quad 0] \times \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.72 & 0.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^2 \times \begin{bmatrix} 1.5 \\ 4.5 \\ 7.5 \\ 10.5 \\ 13.5 \end{bmatrix} = 8.016$$

$$EV(3)_{TQI(t)} = [0 \quad 0.33 \quad 0.66 \quad 0 \quad 0] \times \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.72 & 0.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^3 \times \begin{bmatrix} 1.5 \\ 4.5 \\ 7.5 \\ 10.5 \\ 13.5 \end{bmatrix} = 8.683$$

$$EV(4)_{TQI(t)} = [0 \quad 0.33 \quad 0.66 \quad 0 \quad 0] \times \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.72 & 0.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^4 \times \begin{bmatrix} 1.5 \\ 4.5 \\ 7.5 \\ 10.5 \\ 13.5 \end{bmatrix} = 9.289$$

$$EV(5)_{TQI(t)} = [0 \quad 0.33 \quad 0.66 \quad 0 \quad 0] \times \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.72 & 0.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^5 \times \begin{bmatrix} 1.5 \\ 4.5 \\ 7.5 \\ 10.5 \\ 13.5 \end{bmatrix} = 9.834$$

$$EV(6)_{TQI(t)} = [0 \quad 0.33 \quad 0.66 \quad 0 \quad 0] \times \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.72 & 0.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^6 \times \begin{bmatrix} 1.5 \\ 4.5 \\ 7.5 \\ 10.5 \\ 13.5 \end{bmatrix} = 10.32$$

پس از انجام آزمایش، مقدار تی محاسبه شده مقدار ۰,۹۸ به دست آمد که از مقدار بحرانی ۲,۲۲ کمتر بوده (در ناحیه قابل قبول قرار می‌گیرد) که نشان دهنده عدم تفاوت معنادار بین دو سری داده‌ها از لحاظ آماری است.

۶. نتیجه‌گیری

حمل و نقل ریلی نقش اساسی در رونق و شکوفایی اقتصاد هر کشوری ایفا می‌کند. مسئولین ذیربط اهتمام ویژه‌ای در حفظ کیفیت و ارتقای سطح عملکردی آن دارند. این مهم با توسعه برنامه‌نگهداری و تعمیر خطوط ریلی محقق می‌شود. مدل‌های زوال خطوط ریلی نقش اصلی را در این برنامه‌ریزی به خود اختصاص می‌دهند. به منظور توسعه این مدل‌ها از دو روش رگرسیون خطی و زنجیره مارکوف استفاده شد. در روش رگرسیون خطی از اطلاعات مربوط به پارامترهای هندسی برداشت

مطابق رابطه ۱۶ مقدار مورد انتظار وضعیت هندسی خط در فواصل ۳ ماهه که در شکل ۴ نمایش داده شده است به صورت روابط بالا به دست می‌آید.

همانطور که در شکل ۴ که تقابل بین مدل رگرسیون و مارکوف را نشان می‌دهد قابل مشاهده است هر دو نرخ زوال به‌دست آمده انطباق زیادی با یکدیگر دارند با این تفاوت که نمودار به‌دست آمده از رابطه مارکوف خطی نبوده و با گذشت زمان از رابطه خطی فاصله بیشتری می‌گیرد. به عبارت دیگر نرخ زوال مدل مارکوف از خطی کمتر است. در مقایسه مقدار خطای میانگین مربعات نیز اختلاف بسیار کمی مشاهده شد که تمامی موارد ذکر شده نشان‌دهنده تفاوت غیر قابل ملاحظه در هر دو مدل ارائه شده است. این مهم توسط آزمایش آماری تی مورد مذاقه قرار گرفت. در این آزمایش بررسی گردید که آیا مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون با مقادیر متناظر به‌دست آمده از روش مارکوف از لحاظ آماری تفاوت معناداری دارند یا خیر.

۸. مراجع

- Andrade, A. R. and Teixeira, P. F. (2011) "Uncertainty in rail-track geometry degradation: Lisbon-Oporto line case study", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 137, No. 3, pp. 193-200.
- Andrade, A. R. and Teixeira, P. F. (2012) "A Bayesian model to assess rail track geometry degradation through its life-cycle", *Research in Transportation Economics*, Vol. 36, No.1, pp.1-8.
- Chang, H., Liu, R. and Wang, W. (2010) "Multistage linear prediction model of track quality index", In *Proceedings, The Conference on Traffic and Transportation Studies*. ICTTS, Kunming, pp. 1183-1192.
- En, P. and Amador, L. E. (2008) "Performance modeling for asset management: what to do when you only have two data points?", *Transportation Research Board 87th Annual Meeting*, No. 08, pp. 1616-1625.
- Esveld, C. (2001) "Modern railway track", Delft: Delft University of Technology.
- Guler, H. (2014) "Prediction of railway track geometry deterioration using artificial neural networks: a case study for Turkish state railways", *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 614-626.
- Hillier, F. S. (1995) "Introduction to operations research", Tata McGraw-Hill Education.
- Huang, S., Kang, Y., Wang, Z. and Zhao, D. (2010) "Track integration quality index", In *Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals*.
- Lytton, R. L. (1987) "Concepts of pavement performance prediction and modeling", In *Proc., 2nd North American Conference on Managing Pavements*, Vol. 2.
- Macchi, M., Garetti, M., Centrone, D., Fumagalli, L. and Pavirani, G. P. (2012) "Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 104, pp. 71-83.

شده توسط ماشین اندازه‌گیری خط برای مسیر تهران-کرج به طول ۳۹ کیلومتر استفاده شد و مقدار شاخص کیفیت خط حاصل از این پارامترها برای مدت زمان حدود ۲۴ ماه مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این اطلاعات مدل رگرسیون خطی برای شاخص کیفیت خط توسعه داده شد. همچنین، با استفاده از روش زنجیره مارکوف که ماهیت احتمالاتی دارد مدل زوال دیگری برای شاخص کیفیت خط توسعه داده شد. نهایتاً دستاوردهای حاصل از این مطالعه را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- توسعه مدل خطی زوال شاخص کیفیت خط با روش‌های رگرسیون و مارکوف
- عدم اختلاف روش‌های داده‌های تاریخیچه‌ای و نظرات افراد خبره در تولید ماتریس‌های انتقال احتمالاتی در روش مارکوف
- نرخ زوال هندسی خط کمتر مدل زنجیره مارکوف از رگرسیون خطی
- عدم تفاوت معنی دار مدل‌های ساخته شده با روش‌های رگرسیون و مارکوف

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Stochastic Methods
2. Track Quality Index (TQI)
3. Federal Railroad Administration (FRA)
4. Markov Models
5. Survivor Models
6. Semi- Markov Models
7. Track Integration Quality Index (TIQI)
8. Track Static Index
9. Track Acceleration Index (TAI)
10. Lognormal
11. Coefficient of Variation (CV)
12. Standard Error
13. Coefficient of Determination

Transportation Engineering, Vol. 120, No. 3, pp. 358-375.

- Xu, P., Sun, Q., Liu, R. and Wang, F. (2011) "A short-range prediction model for track quality index", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 225, No. 3, pp. 277-285.

- Ortiz-García, J. J., Costello, S. B. and Snaith, M. S. (2006) "Derivation of transition probability matrices for pavement deterioration modeling", Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 2, pp. 141-161.

- Vale, C. and Lurdes, S. M. (2013) "Stochastic model for the geometrical rail track degradation process in the Portuguese railway Northern Line", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 116, pp. 91-98.

- Wang, K. C. Zaniewski, J. and Way, G. (1994) "Probabilistic behavior of pavements", Journal of

امیرگل رو، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته حمل و نقل را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود. در سال ۱۳۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته حمل و نقل از دانشگاه واترلو، کانادا گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه وی مدیریت زیرساختهای حمل و نقل بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه امیرکبیر است.



مرتضی باقری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی حمل و نقل ریلی را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه علم و صنعت و درجه کارشناسی ارشد در رشته مدیریت لجستیک و حمل و نقل را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه چالمرز سوئد اخذ نمود. در سال ۱۳۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته حمل و نقل از دانشگاه واترلوکانادا گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی حمل و نقل و مدیریت ایمنی و ریسک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه علم و صنعت است.



امیر حسین اسلامی خوزانی، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه آهن را در سال ۱۳۹۳ از همان دانشگاه اخذ نمود. در سال ۱۳۹۵ موفق به اخذ پذیرش در دوره دکتری در رشته مهندسی سازه از دانشگاه موناش استرالیا گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی دینامیکی و مدیریت زیرساختهای راه آهن بوده و در حال حاضر دانشجوی مقطع دکتری دانشگاه موناش استرالیا است.

