

مدل پویای زوال خطوط راه‌آهن به کمک تئوری پویایی سیستم: مطالعه موردی

آرش فرخی، کارشناس ارشد، مهندسی راه‌آهن، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه

اصفهان

احمد رضا جعفریان مقدم*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان

Email: ar.jafarian@trn.ui.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۱ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۰۱

چکیده

در صنعت راه‌آهن، تعیین الگوی خرابی خطوط ریلی نقش به‌سزایی در پیشگیری از خرابی‌ها و در نتیجه کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری ایفا می‌نماید. از کاربردی‌ترین و مفیدترین این الگوها، مدل زوال خطوط ریلی است. مدل‌های کنونی زوال خطوط ریلی مدل‌های زوال ایستایی هستند که بر تأثیر مستقل برخی از پارامترهای مؤثر بر زوال تمرکز دارند. در این مقاله، مدل پویای زوال خطوط ریلی مبتنی بر تئوری پویایی سیستم (SD) پیشنهاد شده است. تئوری پویایی سیستم یک نگرشی علمی است که بر اساس ساختار بازخوردی خود رفتار سیستم را در طول زمان تجزیه و تحلیل می‌کند. مدل پیشنهادی، علاوه بر بررسی تأثیر همزمان پارامترهای مختلف، زوال خطوط ریلی را نیز به صورت پویا ارزیابی می‌کند. پیاده‌سازی و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی زوال با استفاده از یک مثال واقعی از راه‌آهن ایران، حکایت از صحت و دقت مدل دارد. از دیگر نتایج بسیار با اهمیت مدل پیشنهادی زوال، تعیین تابع زوال خطوط ریلی بر حسب زمان در شبکه ریلی ایران است. از این تابع می‌توان برای پیش‌بینی زوال خط در دوره‌های آتی استفاده نمود. این تابع، قابلیت تعمیم به سایر شبکه‌های ریلی جهان را دارد.

واژه‌های کلیدی: راه‌آهن، تعمیر و نگهداری خطوط ریلی، مدل پویای زوال، پویایی سیستم (SD)، تابع زوال

۱. مقدمه

و نگهداری، می‌تواند سیستم را از موقعیت بحرانی خارج کند. شناخت کامل خط، عیوب خط و ایجاد یک بانک داده اطلاعاتی از مسیر ریلی در ارائه الگویی جهت اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه مؤثر است. از کاربردی‌ترین و مفیدترین این الگوها می‌توان به مدل زوال خطوط راه‌آهن اشاره کرد.

تعمیر و نگهداری در سیستم حمل‌ونقل ریلی، به عنوان پرکاربردترین سیستم‌های حمل‌ونقلی، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. از طرفی، تعمیر، نوسازی و نگهداری از جمله فعالیت‌های پُرهزینه ریلی محسوب می‌شود. به نحوی که گاه تصمیم‌گیری‌های به‌موقع تعمیر

¹- System Dynamics

تئوری SD مورد مطالعه قرار می دهد. مدل پیشنهادی مقاله، مدلی نوین و دارای نوآوری است. بخش دوم مقاله به بررسی مطالعات و تحقیقات گذشته پیرامون مدل های زوال خطوط ریلی اختصاص دارد. در این بخش، با مقایسه مطالعات مختلف، نوآوری های مدل پیشنهادی مقاله برجسته می شود. تئوری SD و عناصر مختلف آن در بخش سوم به اختصار تشریح می شود. بخش چهارم به تشریح و تدوین مدل پویای زوال خطوط ریلی با استفاده از تئوری SD و ارائه مدل پیشنهادی زوال خطوط می پردازد. در بخش پنجم، مدل پیشنهادی در بلوکی از مسیر راه آهن ناحیه یزد و با استفاده از نرم افزار Vensim6 پیاده سازی و اجرا می گردد. نتایج اجرای مدل، زمینه ارائه تابع زوال خطوط برای شبکه ریلی ایران را فراهم می آورد. تابع زوال و سایر نتایج و پیشنهادها در بخش پایانی ارائه می شود.

۲. پیشینه پژوهش

پژوهش های مرتبط با زوال خطوط راه آهن شامل مدل های تجربی و آماری می باشد که اغلب براساس ثبت داده ها و اندازه گیری های انجام شده روی خطوط ریلی توسعه می یابند. این پژوهش ها بر مفاهیمی چون نشست بالاست، سایش ریل، خستگی و سایش مؤلفه های خط متمرکز هستند. جهت مطالعه بیشتر در این زمینه به تحقیقات اُبرگ (۲۰۰۶) و مریدپور و همکاران (۲۰۱۸) مراجعه شود. مدل های زوال خطوط ریلی را می توان در پنج گروه زیر تقسیم بندی نمود (اُبرگ، ۲۰۰۶): ۱- مدل های زوال بر پایه نشست خط، ۲- مدل های زوال بر پایه سایش و خستگی ناشی از تماس، ۳- مدل های زوال عمومی، ۴- مدل های زوال بر پایه تغییرات در وضعیت ترافیک عبوری و ۵- مدل های زوال بر پایه برنامه ریزی کامپیوتری و تکنیک های پیشگویی. در مطالعه وضعیت خطوط ریلی، دیدگاه های هندسی، سازه ای و ترافیکی مهمترین رویکردهای تحلیل محسوب می شوند.

مدل زوال خطوط ریلی، ارائه روند تغییرات وضعیت خط در طول زمان و شناخت الگوی این تغییرات است. زوال خطوط راه آهن در حالت کلی تحت تأثیر هفت گروه از عوامل تأثیرگذار به وجود می آید. این عوامل عبارتند از: بار چرخ روی ریل، مؤلفه های خط ریلی، مواد و تولید، طراحی و ساخت، نگهداری، محیط و بستر مسیر ریلی (شو و همکاران، ۲۰۱۳). به منظور تحلیل ساده و کاربردی زوال خطوط ریلی، مسیر ریلی از سه رویکرد هندسی، روسازی و زیرسازی مورد بررسی قرار می گیرد. تا کنون پژوهش ها و تحقیقات گسترده ای در زمینه زوال خطوط ریلی صورت پذیرفته است. اما اغلب این تحقیقات اولاً به تحلیل مدل زوال به صورت تک بعدی و در قالب چند پارامتر تأثیرگذار در زوال پرداخته اند. لذا، تحلیل زوال به صورت ترکیبی از پارامترهای تأثیرگذار یک ضرورت است (مریدپور و همکاران، ۲۰۱۸). ثانیاً، عمده مدل های زوال ارائه شده، مدل های ایستا هستند و زمان در آن نقشی ندارد. این در حالی است که نرخ زوال می بایست به صورت تابعی از زمان بیان شود، زیرا پارامترهای تأثیرگذار در طول زمان تغییر نموده و در نتیجه نرخ زوال نیز در طول زمان تغییر خواهد کرد.

علم پویایی سیستم (SD) به یاری تحلیل رفتاری بسیاری از مسائل واقعی دنیای پیرامون آمده است. در این نظریه، فرض بر آن است که می توان یک پدیده واقعی را به صورت سیستمی در نظر گرفت. این سیستم، به منظور بهبود عملکرد خود از خروجی، بازخورد می گیرد و از این بازخوردها به عنوان ورودی خود استفاده کرده و تحلیل پویایی را فراهم می کند. بنابراین با ترکیب علوم پویایی سیستم و زوال می توان انتظار یک الگوی جامع و کاربردی در مدیریت تعمیر و نگهداری خطوط راه آهن داشت.

مقاله حاضر نیز ابتدا تأثیر هر یک از پارامترهای مرتبط با زوال مسیر ریلی را بررسی می نماید، و سپس اثر توأم این پارامترها بر زوال خطوط ریلی را با استفاده از

پلاستیک به وجود آمده در سه لایه‌ی بالاست، زیربلاست و بستر منجر به نشست مسیر می‌شود.

شاخص کیفیت اولیه خط (TQI) به عنوان اصلی‌ترین معیار در مدل‌سازی پژوهش بینگ و گراس (۱۹۸۳) در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی شامل پارامترهای وضعیت فعلی خط، سرعت، سن ریل، شاخص بالاست و مدت زمان سپری شده از آخرین عملیات نگهداری می‌باشد. گولر (۲۰۱۴) به ارائه مدل زوال از دیدگاه پارامترهای هندسی و با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداخت و نشان داد که الگوریتم‌های فراابتکاری، از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی، می‌توانند الگوریتم‌های حل مناسبی برای تعیین مدل زوال باشند.

۲-۲. پیشینه مدل‌های زوال خطوط ریلی از دیدگاه

سازه‌ای

تحلیل داده‌های به دست آمده از ماشین‌های اندازه‌گیری خط منجر به ارزیابی وضعیت هندسی خط می‌شوند. اما این داده‌ها بیانگر علت بی‌نظمی‌های هندسی نخواهند بود (میرمحمد صادقی و عسکرنژاد، ۲۰۱۱). گان و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تصاویر ژئوفیزیک از ساختار خطوط ریلی، به ارزیابی و بررسی تأثیر رطوبت و رشد گیاهان در بستر مسیر، بر خرابی خطوط ریلی پرداخته‌اند و با استفاده از بررسی‌های ژئوفیزیک نرخ خرابی سازه خط را تعیین نموده‌اند. میرمحمد صادقی و عسکرنژاد (۲۰۱۱) مؤلفه‌های سازه‌ای یک خط بالاستی را در چهار گروه ریل، تراورس، سیستم پابند و بالاست (بلاست و زیربلاست) طبقه‌بندی نموده و مدل‌سازی زوال را بر اساس یک مدل چگالی وزن‌دار کاهش یافته ارائه کرده‌اند.

گروه اول مدل‌سازی، یعنی مدل‌های زوال بر مبنای نشست خط، مدل‌های تحلیلی از دیدگاه هندسی به شمار می‌روند. گروه دوم از این دسته مدل‌های تحلیلی از دیدگاه سازه‌ای و گروه چهارم، تحلیل زوال از دیدگاه ترافیکی می‌باشند. دو گروه باقیمانده در قالب ترکیبی از این سه رویکرد به حساب می‌آیند.

۲-۱. پیشینه پژوهش‌های مدل زوال خطوط ریلی

از دیدگاه هندسی

فاکتورهای زوال از دیدگاه هندسی، نشست‌های قائم خط و مؤلفه‌های آن (عموماً بالاست و بستر) می‌باشد. مدل زوال برای خطوط بالاستی در اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی، در دانشگاه صنعتی مونیخ، توسعه یافت. در این مدل، نرخ زوال خط بر مبنای نسبت فشار به وجود آمده در بالاست به فشار مبنای ایجاد شده توسط وسائط نقلیه مرجع به دست آمد (گولر، ۲۰۱۴). در همان مقطع از زمان در ژاپن، مطالعات زوال بر مبنای نشست بالاست نیز شکل گرفت. تجارب ژاپنی‌ها منجر به توسعه‌ی یک مدل تجربی از نشست بر مبنای فشار استایاتیک بالاست، شتاب بالاست و با در نظر گرفتن اثر سرعت و تناژ عبوری ناوگان شد (ساتو، ۱۹۹۷). ساتو (۱۹۹۵) تغییرات ۱۰۰ روزه نشست قائم خط را بر حسب میلی‌متر در قالب معادله‌ای تعیین نمود. دالبرگ (۲۰۰۱) یک الگوی نشست خط شامل دو مرحله‌ی نشست سریع و نشست بلندمدت ایجاد کرد. آلو هورتادو و سلیگ (۱۹۸۱) مدلی بر مبنای کرنش‌های ایجاد شده در اثر سیکل‌های بارگذاری متعدد جهت نشست خط توسعه داده‌اند. شنتون (۱۹۸۵) پارامترهای متعددی، از جمله بار محوری، تعداد محورها و شرایط عملیات دستگاه زیرکوب را در زوال خطوط مرتبط دانست. کریسمر و سلیگ (۱۹۹۳) نشان دادند که کرنش

¹- Track Quality Index

۳-۲. پیشینه مدل‌های زوال عمومی و برپایه

پارامترهای ترافیکی

شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر زوال و تحلیل مدل‌های زوال با رویکرد تک‌بعدی از جمله موضوعاتی است که در زوال به مراتب بیشتر از رویکردهای دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. سازمان ORE^۱ در سال ۱۹۸۷ مدلی از زوال خط ارائه داد که در آن هیچیک از پارامترهای خط در نظر گرفته نشده‌اند. پارامترهای تأثیرگذار در این رابطه تنها پارامترهای ترافیکی همچون سرعت، تناژ و بار محوری می‌باشد (میسرا، ۲۰۰۸). میرمحمد صادقی و عسکرنژاد (۲۰۱۰) تأثیر سه دسته از پارامترهای بارگذاری، وضعیت نگهداری و کیفیت خط را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در بین سه متغیر فوق، شاخص کیفیت اولیه خط بیشترین تأثیر را در نرخ زوال خواهد داشت، و در مقایسه دو پارامتر ترافیکی سرعت و تناژ عبوری، تحت شرایط یکسان، تناژ عبوری در نرخ زوال تأثیرگذارتر است.

۴-۲. پیشینه پژوهش‌های زوال خطوط ریلی از

دیدگاه ترکیبی

میرمحمد صادقی و عسکرنژاد (۲۰۰۷) زوال خطوط راه‌آهن را با توجه به جنبه‌های روسازی، زیرسازی و هندسی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش، تأثیر چهار پارامتر شاخص کیفیت اولیه خط، شاخص بالاست، سرعت قطار و عمر ریل بر تغییرات کیفیت خط مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پیشینه تغییرات در نرخ زوال در محدوده مقاطعی است که شاخص کیفیت اولیه خط پایین می‌باشد و با افزایش این شاخص، از میزان تغییرات این نسبت کاسته می‌شود. آنها نشان دادند که عمر ریل کمترین تأثیر را بر نرخ زوال از دیدگاه

هندسی دارد و رشد بی‌نظمی‌های هندسی با جذر سوم تناژ عبوری از خط متناسب است.

۵-۲. بررسی مدل‌های زوال در خطوط راه‌آهن

ایران

دزفولیان و همکاران (۱۳۸۵) با شناخت عوامل مؤثر در خرابی خط، به ارائه یک مدل جامع زوال خط که تابعی از پارامترهای مؤثر در خرابی می‌باشد، پرداخته‌اند. بر مبنای این مطالعات، در سامانه مدیریت نگهداری خطوط، برای تعیین مدل زوال و پیش‌بینی وضعیت خط، به سه دسته از اطلاعات بازرسی چشمی، بازرسی مکانیزه و اطلاعات ترافیکی نیاز است. شاخص رکورد ترکیبی خط (CTR^۲) و شاخص هندسی خط (TGI^۳) در این پژوهش به عنوان شاخص‌های مبنای دیدگاه هندسی تعیین شده‌اند.

۶-۲. مقایسه مطالعات و تحقیقات پیرامون زوال

خطوط ریلی

به منظور مقایسه هرچه راحت‌تر مطالب ارائه شده در مورد مدل‌های زوال خطوط ریلی و همچنین تعیین نوآوری‌های مدل پیشنهادی تحقیق حاضر، مقایسه پژوهش‌های گذشته در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که در این جدول ملاحظه می‌شود، مبنای تحلیل تمام پژوهش‌ها پیرامون مدل‌های زوال، تحلیل استاتیک و ایستا است. همچنین، اکثریت مدل‌سازی‌های انجام شده بر مبنای تحلیل چند پارامتر محدود صورت پذیرفته و تأثیر توأم این پارامترها بر یکدیگر مد نظر قرار نگرفته است. این مقاله سعی دارد مدل پویای زوال خطوط ریلی را پیشنهاد دهد که ضمن بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر خرابی خطوط ریلی در طول زمان‌های مختلف، نقایص پژوهش‌های گذشته را نیز برطرف نماید.

^۲- Combined Track Recording

^۳- Track Geometry Index

^۱- Office for Research and Experiments of the International Union of Railways

جدول ۱. بررسی خلاصه پژوهش‌های انجام شده در زمینه زوال خطوط ریلی

| ردیف | نام محقق / محققان | سال | رویکرد بررسی | پارامترهای تأثیرگذار | نوع تحلیل |
|------|----------------------------|----------|------------------|---|-----------|
| ۱ | محققین دانشگاه صنعتی مونیخ | دهه ۱۹۵۰ | هندسی | فشار بالاست، محورهای عبوری | استاتیک |
| ۲ | ساتو | ۱۹۹۵ | هندسی | تناژ عبوری، سرعت سیر، نوع اتصال ریل، وضعیت بستر | استاتیک |
| ۳ | دالبرگ | ۲۰۰۱ | هندسی | فشار به وجود آمده در زیر بالاست | استاتیک |
| ۴ | سلیگ و آلوهورتادو | ۱۹۸۱ | هندسی | کرنش پایا در اثر بارگذاری، تعداد سیکل بارگذاری | استاتیک |
| ۵ | شتون | ۱۹۸۵ | هندسی | بارمحور، بلندشدگی بعد از زیرکوبی تعداد کل محورهای عبوری | استاتیک |
| ۶ | کریسمر و سلیگ | ۱۹۹۳ | هندسی | بلاست و زیربلاست | استاتیک |
| ۷ | بینگ و گراس | ۱۹۸۳ | هندسی | کیفیت اولیه خط، سرعت عبوری، عمر ریل، وضعیت بالاست، وضعیت بستر | استاتیک |
| ۸ | گولر | ۲۰۱۴ | هندسی | ریل، تراورس، زیرسازی | استاتیک |
| ۹ | میرمحمد صادقی و عسگر پور | ۲۰۱۱ | سازه‌ای | ریل (ریل، پد زیر ریل، جوش)، تراورس، سیستم پابند و بالاست (بلاست و زیر بالاست) | استاتیک |
| ۱۰ | گان و همکاران | ۲۰۱۸ | سازه‌ای | تصاویر ژئوفیزیک از بستر | استاتیک |
| ۱۱ | سازمان ORE | ۱۹۸۷ | ترافیکی | سرعت، تناژ و بار محوری | استاتیک |
| ۱۲ | میرمحمد صادقی و عسگر پور | ۲۰۰۷ | ترافیکی و ترکیبی | سرعت عبوری، تناژ عبوری، کیفیت اولیه خط | استاتیک |
| ۱۴ | دزفولیان و همکاران | ۱۳۸۵ | هندسی | مقدار چگالی هر نوع خرابی با شدت‌های مشخص | استاتیک |

۳. تئوری پویایی سیستم (SD)

پویایی سیستم (SD) متدولوژی تحلیل وضعیت‌هایی است که در طول زمان تغییر می‌کند. SD به طور گسترده‌ای به منظور تحلیل مجموعه متنوعی از سیستم‌های اقتصادی، اجتماعی و مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. در تئوری SD، رفتار سیستم توسط حلقه‌های بازخوردی کنترل می‌شود. SD دارای سه

پویایی سیستم (SD) در دهه ۱۹۵۰ توسط فارستر^۱ توسعه داده شد (احدی و همکاران، ۱۳۹۲). از این متدولوژی برای تجزیه و تحلیل روابط متقابل دنیای اقتصاد و محیط-زیست توسط فارستر و همکاران استفاده گردید.

^۱- J.W. Forrester

دو حلقه اصلی تقویت‌کننده و متعادل‌کننده وجود دارد. همه سیستم‌های پیچیده ترکیبی از این دو نوع حلقه می‌باشند. حلقه تقویت‌کننده، فرایند اساسی رشد می‌باشد. اگر افزایش در شرایط منجر به افزایش اقدامات گردد و افزایش در اقدامات منجر به افزایش در شرایط شود، آنگاه اثر ردگیری شده در طول حلقه منتج به افزایش بیشتری در شرایط می‌شود. به علت همین افزایش انباشتی غالباً این حلقه را بازخورد مثبت می‌نامند (هیوارد، ۲۰۰۵). در حلقه متعادل‌کننده، تأثیر خالص همه تغییرات در طول حلقه در بازگشت به متغیر اولیه منفی است. بنابراین، بازخورد منفی نام دارد. افزایش شرایط منجر به کاهش اقدامات می‌شود. کاهش اقدامات باعث کاهش شرایط می‌شود.

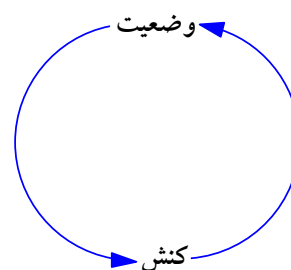
بنابراین، با استفاده از تئوری SD می‌توان رفتار سیستم پیچیده را به کمک اجزای اصلی و ترکیب حلقه‌های مختلف بازخوردی تقویت‌کننده و متعادل‌کننده مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. بر همین اساس، در مقاله حاضر نیز از مزایای SD به منظور ارائه یک مدل زوال پویا و منطبق با دنیای واقعی برای شبکه‌های ریلی استفاده شده است.

۴. ارائه مدل پویای پیشنهادی زوال خطوط

ریلی

متغیرهای مورد استفاده در مدل پویای زوال در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که متغیرهای مورد استفاده در مدل متناسب با مطالعات دزفولیان و همکاران (۱۳۸۵) و براساس ویژگی‌ها و شرایط مدل پیشنهادی تعیین و انتخاب شده‌اند.

مزیت عمده است: (۱) بیان روابط عناصر مختلف با استفاده روابط علت و معلولی، (۲) تعیین پارامتر یا ساختاری که نیاز به تغییر در جهت بهبود رفتار را دارد و (۳) استفاده از این روش بدون نیاز به دانش ریاضیاتی زیاد. چهار جزء اصلی برای ساخت یک مدل SD وجود دارد: حالت^۱، جریان^۲، اتصال‌دهنده^۳ و تبدیل‌کننده^۴. حالت‌ها بیانگر متغیرهای پایه یا مقادیری است که در یک سیستم تغییر می‌کنند (استرمان، ۲۰۰۱). برای مثال، در یک مدل جمعیت، متغیر حالت مدل، بیانگر تعداد جمعیت می‌باشد (ابرلین و پترسون، ۱۹۹۲). ترکیب تمامی این اجزا در مدل، یک سیستم پویا و دینامیک تشکیل می‌دهد. زیرا متغیرهای حالت، نرخ‌ها و تبدیل‌کننده‌ها ممکن است در طول زمان تغییر کنند. مقادیر در هر یک از زمان‌ها با عنوان وضعیت سیستم یاد می‌شود (استرمان، ۲۰۰۱). در SD، رفتار سیستم توسط حلقه‌های بازخوردی کنترل می‌شود. حلقه‌های بازخوردی در SD با استفاده از حلقه‌های علت و معلولی بیان می‌شوند. سیستم پویا با استفاده از حلقه‌های بازخوردی است که می‌تواند وضعیت خود را بررسی و سپس نسبت به اصلاح آن اقدام نماید (شکل ۱).



شکل ۱. حلقه‌های علت و معلولی

³- Connector

⁴- Convertor

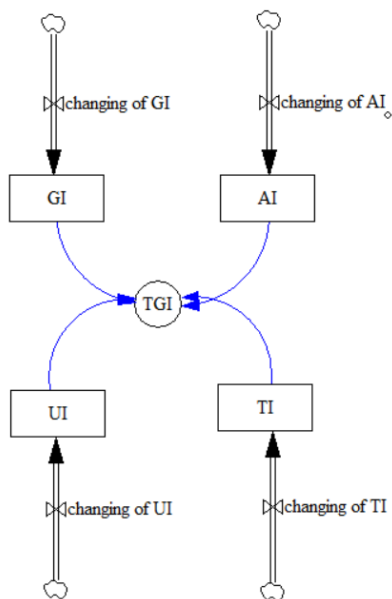
¹- Stocks

²- Flows

جدول ۲. متغیرهای مدل پویای زوال خطوط ریلی

| تعریف | معادل فارسی | نام متغیر |
|---|---------------------------|---------------------------|
| نسبت شاخص کیفیت خط ثانویه به شاخص کیفیت اولیه خط | نرخ زوال | Deterioration rate |
| همان شاخص TQI2 می باشد که معرف وضعیت آتی خط است. | شاخص کیفیت ثانویه خط | Railway condition |
| از ترکیب شاخص هندسی و سازه ای خط محاسبه می شود. | شاخص کیفیت اولیه خط | TQI1 |
| بر حسب ماه می باشد. | زمان | Time |
| سرعت طرح مد نظر است. | سرعت | Speed |
| بر حسب میلیون تن می باشد. | تناژ ناخالص سالیانه عبوری | EMGT |
| نرخ ماهانه تغییرات تناژ عبوری از خط | نرخ تغییرات تناژ | The rate of EMGT Changing |
| تناژ ترکیبی حاصل از تأثیر سرعت و تناژ عبوری (ذاکری و رضازاده، ۱۳۸۵) | تناژ مورد بهره برداری | Equivalent Tonnage |
| از ترکیب گروه ریل، گروه تراورس و بالاست محاسبه می شود. | شاخص سازه خط | TSCI |
| (ذاکری و همکاران، ۱۳۸۴) | | |
| تابع شدت و چگالی هر نوع از خرابی است (ذاکری و همکاران، ۱۳۸۴). | شاخص گروه ریل | RCI |
| تابع شدت و چگالی هر نوع از خرابی است. (ذاکری و همکاران، ۱۳۸۴). | شاخص گروه تراورس | SCI |
| تابع شدت و چگالی هر نوع از خرابی است (ذاکری و همکاران، ۱۳۸۴). | شاخص گروه بالاست | BCI |
| از ترکیب وزن دار امتداد، دیلم، تابیدگی و عرض محاسبه می شود (ذاکری و همکاران، ۱۳۸۴). | شاخص کیفیت هندسی خط | TGI |
| مقدار افتادگی در راستای عرضی خط | دیلم | AI |
| مقدار پیچش خط از امتداد محور مسیر | تابیدگی | TI |
| مقدار انحراف از فاصله ی استاندارد عرض خط | عرض | GI |
| مقدار افتادگی در راستای طولی خط | امتداد | UI |
| نرخ تغییرات میزان تابیدگی خط | نرخ تابیدگی | Changing of TI |
| نرخ تغییرات انحراف از عرض استاندارد خط | نرخ عرض خط | Changing of GI |
| نرخ تغییرات پروفیل (امتداد) خط | نرخ امتداد خط | Changing of UI |
| نرخ تغییرات افتادگی عرضی خط (دیلم) | نرخ دیلم خط | Changing of AI |
| نرخ تغییرات شاخص خرابی گروه ریل | نرخ شاخص گروه ریل | Changing of RCI |
| نرخ تغییرات شاخص خرابی گروه تراورس | نرخ شاخص گروه تراورس | Changing of SCI |
| نرخ بهره وری نگه داری در زوال را نشان می دهد. | نگه داری | Maintenance |

در مدل پویای زوال شاخص کیفیت هندسی خط^۱ از چهار پایه امتداد، دیلم، تابیدگی و عرض با استفاده از مدل دزفولیان و همکاران (۱۳۸۵) به دست می‌آید. شکل ۲ نمای شماتیک از دیاگرام حلقه علی آن را نشان می‌دهد. شاخص کیفیت هندسی خط (TGI) یک متغیر کمکی در محاسبه نرخ زوال محسوب می‌شود.



شکل ۲. نمودار علی و حالت جریان زیرمدل شاخص هندسی خط

شرح معادلات بین متغیرهای نرخ و حالت در این زیرمدل در جدول ۳ بیان شده است.

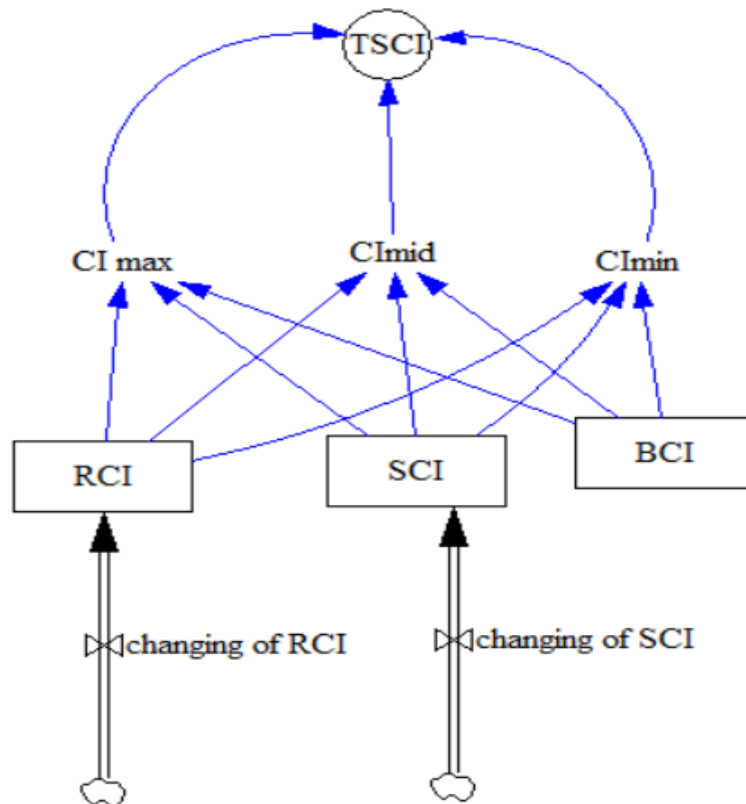
جدول ۳. معادلات پارامترهای زیرمدل شاخص TGI

| نام متغیر | نوع متغیر | واحد | مقدار اولیه | رابطه محاسباتی | توضیحات مرتبط با رابطه محاسباتی |
|----------------|-----------|------|-------------|---|---|
| TGI | کمکی | mm | - | $(2UI+6AI+GI+TI)/10$ | (ذاکری و رضازاده، ۱۳۸۵) |
| UI | حالت | mm | ۸۸ | $-(\text{Changing of UI}/12)$ | محاسبه تغییرات ماهانه پروفیل ریل براساس تناژ تجمعی |
| Changing of UI | نرخ | - | - | $(\text{Equivalent Tonnage}/12) + ((\text{Speed}/100)/100)$ | محاسبه نرخ پروفیل ریل براساس ترکیب معادل تناژ و سرعت (ذاکری و رضازاده، ۱۳۸۵) |
| AI | حالت | mm | ۳۵ | IF THEN ELSE(AI>0:AND:AI<100, -Changing of AI , 0) | محاسبه نرخ تغییرات دیلم خط با در نظر گرفتن محدوده مثبت تغییرات |
| Changing of AI | نرخ | - | - | Speed/100 | محاسبه نرخ تأثیر سرعت بر دیلم خط براساس سرعت مبنای ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت متناسب با تحلیل داده‌های واقعی |

^۱- TGI

| | | | | | |
|--|---|----|----|------|----------------|
| محاسبه شاخص عرض خط با در نظر گرفتن بازه عددی مثبت | -(IF THEN ELSE(GI<100,Changing of GI , 0)) | ۶ | mm | حالت | GI |
| محاسبه نرخ تأثیر سرعت بر عرض خط براساس سرعت مبنای ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت متناسب با تحلیل داده‌های واقعی | (Speed/100)/100 | - | - | نرخ | Changing of GI |
| محاسبه نرخ ماهانه شاخص تابیدگی خط | -(Changing of TI/12) | ۴۶ | mm | حالت | TI |
| محاسبه نرخ تابیدگی براساس تناژ معادل عبوری ۱۲ میلیون تن (سالانه) | Equivalent Tonnage/12 | - | - | نرخ | Changing of TI |

در مدل پیشنهادی زوال، شاخص کیفیت سازهی خط^۱ (TSCI) از ترکیب وزن دار سه گروه شاخص: گروه ریل، گروه تراورس و گروه بالاست به دست می‌آید. دیاگرام حلقه‌ی علی آن مطابق شکل ۳ می‌باشد. شاخص کیفیت سازهی خط یا شاخص بازرسی چشمی، دسته دوم از متغیرهای کمکی در محاسبه نرخ زوال خط است. شرح معادلات بین پارامترهای تأثیرگذار در زیرمدل TSCI به شرح جدول ۴ می‌باشد.



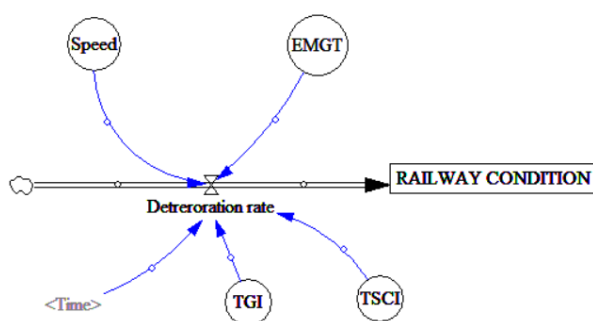
شکل ۳. نمودار حالت جریان زیرمدل TSCI

^۱- TSCI

جدول ۴. معادلات پارامترهای زیر مدل شاخص TSCI

| نام متغیر | نوع متغیر | واحد | مقدار اولیه | رابطه محاسباتی | توضیحات مرتبط با رابطه محاسباتی |
|-----------------|-----------|------|-------------|--|--|
| TSCI | کمکی | - | - | $0.5C_{Imin} + 0.35C_{I mid} + 0.15C_{I max}$ | (ذاکری و همکاران، ۱۳۸۴) |
| $C_{I max}$ | عادی | - | - | $MAX(MAX(BCI, RCI), SCI)$ | تعیین شاخص بیشینه از بین سه گروه شاخص‌های گروه ریل، بالاست و تراورس (ذاکری و همکاران، ۱۳۸۴) |
| $C_{I mid}$ | عادی | - | - | IF THEN ELSE(MIN(BCI, MIN(RCI, SCI)) < BCI : AND: MAX(BCI, MAX(RCI, SCI)) > BCI, BCI, IF THEN ELSE(MIN(BCI, MIN(RCI, SCI)) < RCI : AND: MAX(BCI, MAX(RCI, SCI)) > RCI, RCI, IF THEN ELSE(MIN(BCI, MIN(RCI, SCI)) < SCI : AND: MAX(BCI, MAX(RCI, SCI)) > SCI, SCI, MIN(BCI, MIN(RCI, SCI))) | تعیین شاخص میانه از بین سه گروه شاخص‌های گروه ریل، بالاست و تراورس (ذاکری و همکاران، ۱۳۸۴) |
| $C_{I min}$ | عادی | - | - | $MIN(MIN(BCI, RCI), SCI)$ | تعیین شاخص کمینه از بین سه گروه شاخص‌های گروه ریل، بالاست و تراورس (ذاکری و همکاران، ۱۳۸۴) |
| RCI | حالت | - | ۵۷ | IF THEN ELSE(RCI > 0, - (Changing of RCI), 0) | محاسبه شاخص گروه ریل |
| Changing of RCI | نرخ | - | - | $EMGT^{(-0.4)} + maintenance$ | محاسبه نرخ تغییرات شاخص گروه ریل براساس فرمول عمر ریل (نشریه ۳۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور) |
| SCI | حالت | - | ۵۰ | Changing of SCI | محاسبه شاخص گروه تراورس |
| Changing of SCI | نرخ | - | - | $Equivalent\ Tonnage^{(-1/3)}$ | نرخ تغییرات شاخص گروه تراورس متناسب با جذر سوم تناژ عبوری معادل (میرمحمد صادقی و عسکرنژاد، ۲۰۰۷) |
| BCI | ثابت | - | ۴۷ | - | محاسبه شاخص بالاست (ذاکری و همکاران، ۱۳۸۴) |

رابطه نرخ زوال در این پژوهش برگرفته از رابطه دزفولیان و همکاران (۱۳۸۵) است که متشکل از ۵ شاخه تناژ، سرعت، زمان، شاخص هندسی خط و شاخص سازه‌ای خط می‌باشد. فرم دیاگرام حلقه علی و حالت جریان آن به صورت شکل ۴ خواهد بود.



شکل ۴. نمودار حالت جریان زیر مدل محاسبه نرخ زوال

رابطه محاسباتی زوال در جدول ۵ تشریح شده است.

جدول ۵. معادلات پارامترهای زیرمدل نرخ زوال خط

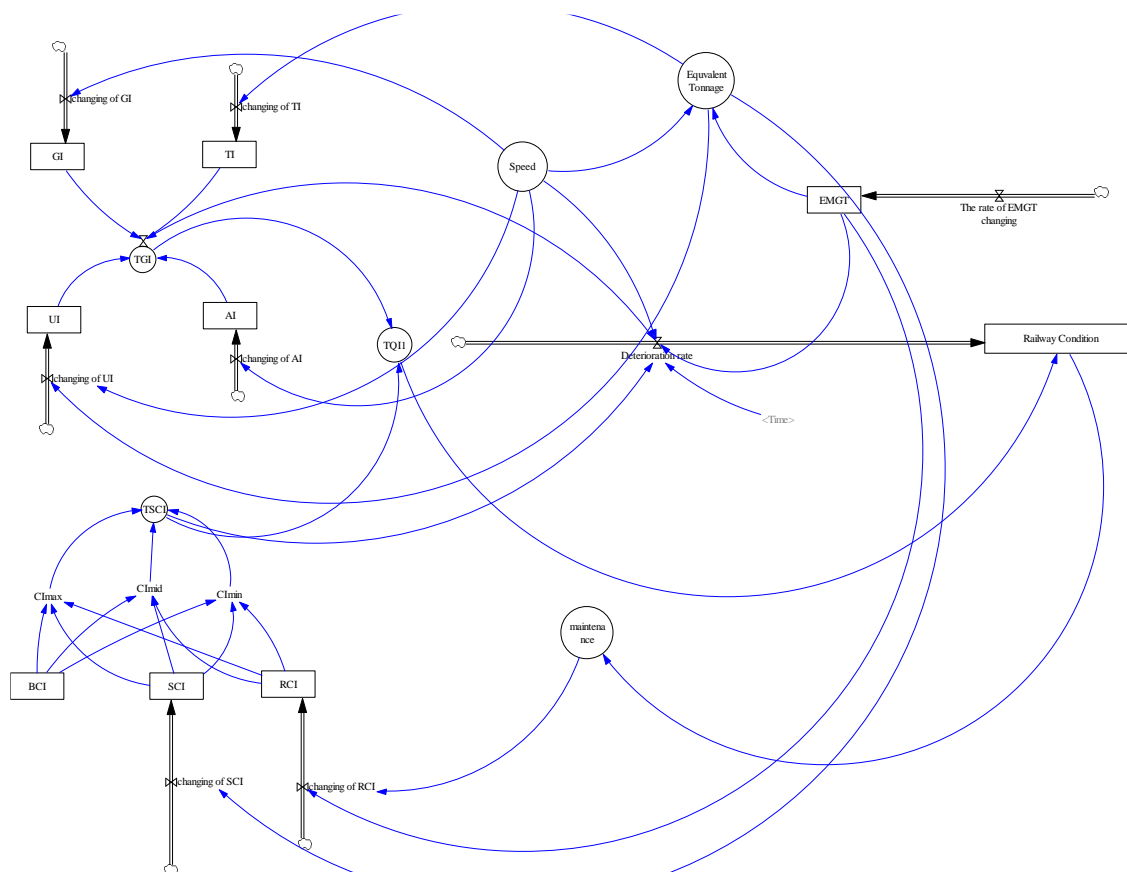
| نام متغیر | نوع متغیر | واحد | مقدار اولیه | رابطه محاسباتی | توضیحات مرتبط با رابطه محاسباتی |
|--------------------|-----------|------|-------------|--|---------------------------------|
| DETERIORATION RATE | حالت | mm | ۱۰۰ | $3.15 * \text{EXP}(-0.0231 * \text{Time}) * (0.01 * \text{Speed})^{1.12} * (0.01 * \text{TSCI})^{1.19} * (0.01 * \text{TGI})^{1.06} * (0.01 * \text{EMGT})^{1.13}$ | (دزفولیان و همکاران، ۱۳۸۵) |

به‌طور همزمان دیده شود. بر این اساس، در استاندارد UIC ابتدا سرعت و تناژ با استفاده از رابطه‌ای به تناژ معادل تبدیل شده و سپس تأثیر تناژ معادل بر وضعیت خط ارزیابی می‌شود (ذاکری و رضازاده، ۱۳۸۵). جدول ۶ این رابطه را نشان داده است. در مدل پویای زوال، تأثیر منفی تناژ معادل بر شاخص‌های TI و RCI مد نظر قرار گرفته است. نحوه محاسبه این شاخص‌ها در بخش‌های قبل ارائه شده است.

فرم کلی مدل پیشنهادی زوال در نرم‌افزار Vensim6 مطابق با شکل ۵ می‌باشد. با توجه به شکل ۵، مدل پویای زوال خطوط ریلی دارای دو حلقه بازخورد اصلی است که نقش پویایی و تعادل سیستم را ایفا می‌کنند. این حلقه‌های بازخورد مربوط به تأثیر تعمیر و نگهداری و میزان بار عبوری بر وضعیت خط است. بار عبوری می‌تواند تأثیر منفی بر وضعیت خط ریلی داشته باشد. به منظور بررسی میزان تأثیر بار عبوری بر اجزای مسیر ریلی، مطابق استاندارد UIC لازم است تأثیر سرعت و بار

جدول ۶. معادلات پارامترهای زیرمدل Equivalent Tonnage

| نام متغیر | نوع متغیر | واحد | مقدار اولیه | رابطه محاسباتی | توضیحات مرتبط با رابطه محاسباتی |
|--------------------|-----------|------|-------------|--|---------------------------------|
| Equivalent Tonnage | حالت | - | - | $\text{IF THEN ELSE}(\text{Speed} < 120, 1.1 * \text{EMGT}, \text{IF THEN ELSE}(\text{Speed} > 120 : \text{AND} : \text{Speed} < 140, 1.2 * \text{EMGT}, \text{IF THEN ELSE}(\text{Speed} > 140, 1.25 * \text{EMGT}, 0)))$ | (ذاکری و رضازاده، ۱۳۸۵) |



شکل ۵. مدل سازی پویای زوال خط

صورتی که شاخص وضعیت خط زیر ۸۰ باشد (ذاکری و رضازاده، ۱۳۸۵)، اجرای تعمیر و نگهداری الزامی است. جدول ۷ رابطه مورد نظر را نشان می دهد. در مدل پویای زوال خطوط ریلی، تأثیر مثبت تعمیر و نگهداری بر شاخص RCI مد نظر قرار گرفته است.

اما تعمیر و نگهداری خطوط ریلی باعث بهبود وضعیت خط می شود و بنابراین این حلقه بازخوردی یک حلقه مثبت خواهد بود که باعث افزایش و یا بهبود وضعیت می شود. اجرا و یا عدم اجرای تعمیر و نگهداری بستگی به شرایط و وضعیت خطوط ریلی دارد. در

جدول ۷. معادلات پارامترهای زیرمدل Maintenance

| نام متغیر | نوع متغیر | واحد | مقدار اولیه | رابطه محاسباتی | توضیحات مرتبط با رابطه محاسباتی |
|-------------|-----------|------|-------------|---|--|
| Maintenance | حالت | - | - | IF THEN ELSE(Railway Condition<80, 0.5 , 0) | در نظر گرفتن اثر فعالیت های نگهداری و تعمیر بر نرخ زوال ریل (نصرآزادانی، ۱۳۸۴)، (مجیدی فرد و حسنی، ۱۳۸۲) |

در این بخش، مدل پیشنهادی پویای زوال خطوط ریلی با استفاده از نرم افزار Vensim6 در طول بلوکی از مسیر ریلی راه آهن ناحیه یزد شبیه سازی و پیاده سازی می گردد.

۵. پیاده سازی، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت
مدل پیشنهادی

آن ۸۳۰ می‌باشد. تعداد ۸ قوس در این مسیر وجود دارد. در دو مقطع زمانی اردیبهشت ماه و بهمن ماه سال ۱۳۹۶، ماشین اندازه‌گیری خط (EM120) از آن عبور کرده است.

قطعه مورد نظر در این پژوهش، طول ۱۰ کیلومتر از بلوک طبرکوه-مهرداد واقع در حوزه راه‌آهن استان یزد می‌باشد. شکل ۶، نقشه هوایی این قطعه را نشان می‌دهد. کیلومتراژ شروع آن عبارتست از کیلومتراژ ۸۲۰ و کیلومتراژ انتهای



شکل ۶. عکس هوایی از بلوک انتخابی (طبرکوه-مهرداد)

است. مقادیر شاخص TGI برای ماه‌های اردیبهشت و بهمن سال ۱۳۹۶ از کیلومتراژ ۸۲۰ الی ۸۳۰ بلاک طبرکوه-مهرداد به ترتیب در جدول ۸ ارائه شده است. لازم به ذکر است که محاسبه این ارقام پس از اصلاح داده‌ها در گراف داده‌های خام و میانگین‌گیری هندسی در هر کیلومتر به دست آمده است.

در محاسبه TGI، ابتدایی‌ترین گام، استفاده از روش‌های آماری به منظور تحلیل داده‌های برداشت شده از دستگاه EM120 است. این دستگاه، داده‌های هندسی خط همچون امتداد و دیلم را به ازای هر ۲۵ سانتی‌متر از خط برداشت می‌کند. با توجه به حجم زیاد داده‌های ثبت شده، در پیوست ۱، نمونه‌ای از این داده‌ها ارائه شده

جدول ۸. جدول محاسبات TGI اردیبهشت و بهمن ۱۳۹۶ بلاک مهرداد- طبرکوه

| محاسبه TGI برای سرعت کمتر از ۱۰۵ km/h | | محاسبه TGI برای سرعت بیش از ۱۰۵ km/h | | کیلومتراژ |
|---------------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------|-----------|
| TGI در اردیبهشت | TGI در بهمن | TGI در اردیبهشت | TGI در بهمن | |
| ۴۴ | ۴۸ | ۴۰ | ۴۸ | ۸۲۰ |
| ۳۹ | ۴۳ | ۴۱ | ۴۱ | ۸۲۱ |
| ۶۴ | ۶۸ | ۷۴ | ۷۳ | ۸۲۲ |
| ۶۴ | ۶۳ | ۶۷ | ۶۶ | ۸۲۳ |
| ۴۹ | ۵۱ | ۵۵ | ۵۴ | ۸۲۴ |
| ۶۱ | ۶۳ | ۵۷ | ۵۶ | ۸۲۵ |
| ۳۸ | ۴۰ | ۴۴ | ۴۳ | ۸۲۶ |
| ۵۲ | ۵۷ | ۵۸ | ۵۷ | ۸۲۷ |
| ۵۸ | ۶۲ | ۵۲ | ۵۲ | ۸۲۸ |
| ۵۹ | ۶۳ | ۶۴ | ۶۳ | ۸۲۹ |
| ۵۶ | ۵۷ | ۴۹ | ۴۸ | ۸۳۰ |

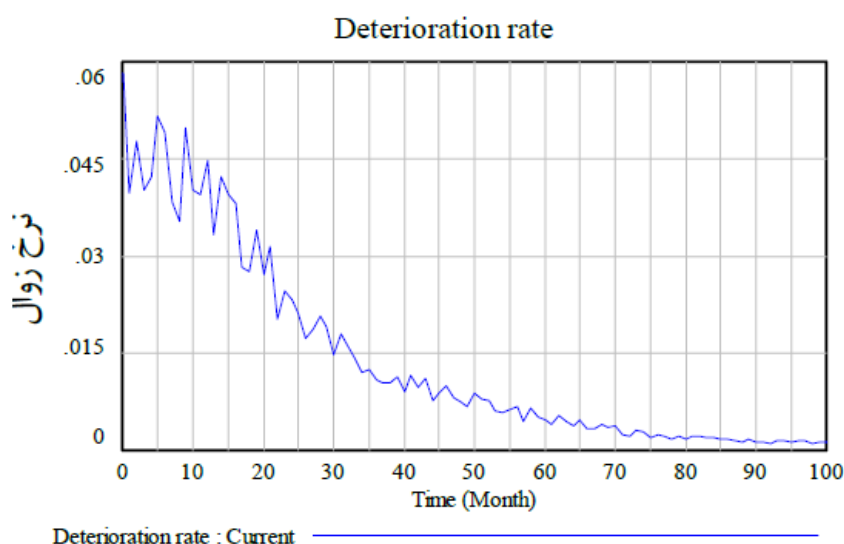
شاخص TSCI به کمک دیاگرام‌های مقادیر کاهش یافته محاسبه می‌شود. در بلوک مورد نظر و در کیلومتراژ ۸۲۰ لیست خرابی برداشت شده جهت محاسبه شاخص گروه ریل به شرح جدول ۹ است.

جدول ۹. لیست خرابی‌های چشمی از بلاک طبرکوه-مهرداد

| نام خرابی | تعداد ادوات خرابی |
|-----------|-------------------|
| R1L | ۱ |
| R2L | ۲ |
| R2M | ۱ |
| R3L | ۱۲ |
| R6 | ۹ |

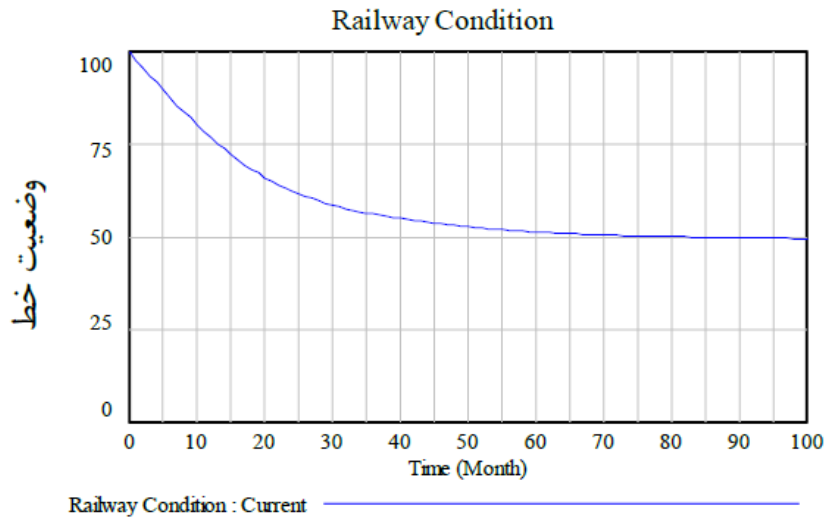
استخراجی از نمودارهای نرخ زوال و وضعیت خط به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ قابل مشاهده است. نتایج نمودارها نشان می‌دهد که مسیر مورد نظر در طول زمان دچار خرابی و افت خواهد شد. با این وجود، به دلیل اجرای عملیات تعمیر و نگهداری، میزان نرخ زوال و خرابی در دوره‌های آتی کاهش خواهد یافت. به عبارتی، میزان خرابی در دوره‌های آتی کاهش خواهد یافت.

با وجود ۶۰ عدد تراورس، ۶ شاخه ریل و ۶ عدد اتصالی، با توجه به لیست ادوات خرابی، مقادیر RCI، SCI و BCI به ترتیب به میزان ۵۷، ۵۰ و ۴۷ محاسبه گردید. با تعیین روابط و مقادیر متغیرها و پارامترهای مدل، مدل پیشنهادی زوال توسط نرم‌افزار Vensim6 اجرا گردید. در مدل پایه، زمان شبیه‌سازی برای ۱۰۰ ماه و گام‌های شبیه‌سازی نیز هر یک ماه رشد دارد. نتایج



زمان

شکل ۷. نمودار محاسبه نرخ زوال



زمان

شکل ۸. نمودار وضعیت خط

اردیبهشت ماه سال ذکر شده ۴۴ بوده که به عنوان مقدار اولیه در نرم افزار قرار داده شده است. در همین کیلومتر، مقدار TGI در بهمن ماه بر طبق اسناد معادل ۴۰ گردید. رقمی که مدل پیشنهادی برای ماه نهم، یعنی بهمن ماه، پیش بینی کرده است عبارتست از ۳۸/۳۶. بر طبق رابطه بارلاس، مقدار خطا ۰/۰۴۱ می باشد که نشان از دقت خوب مدل پیشنهادی دارد.

$$Error\ rate = \frac{40 - 38.36}{40} = 0.041$$

تحلیل حساسیت خروجی های مدل پیشنهادی با ایجاد تغییرات در دو متغیر ثابت نرخ تغییرات تناژ ماهانه و میزان تغییرات در شاخص بالاست (BCI) به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها بر نرخ زوال و با فاصله اطمینان ۵۰ تا ۱۰۰ درصد انجام شد. خروجی های مورد بررسی، متغیرهای وضعیت خط^۱ و نرخ زوال^۲ می باشند. نتایج تحلیل حساسیت در شکل های ۹ تا ۱۲ قابل مشاهده است.

در این پژوهش، به منظور اعتبارسنجی مدل SD از نتایج تحقیقات بارلاس (۱۹۹۴) در قالب روابط (۱) تا (۳) استفاده شده است. طبق تحقیقات بارلاس (۱۹۹۴) مدلی دارای اعتبار است که نرخ خطای کمتر از ۵٪ داشته باشد.

$$Error\ rate = \frac{|\bar{S} - \bar{A}|}{\bar{A}} \quad (1)$$

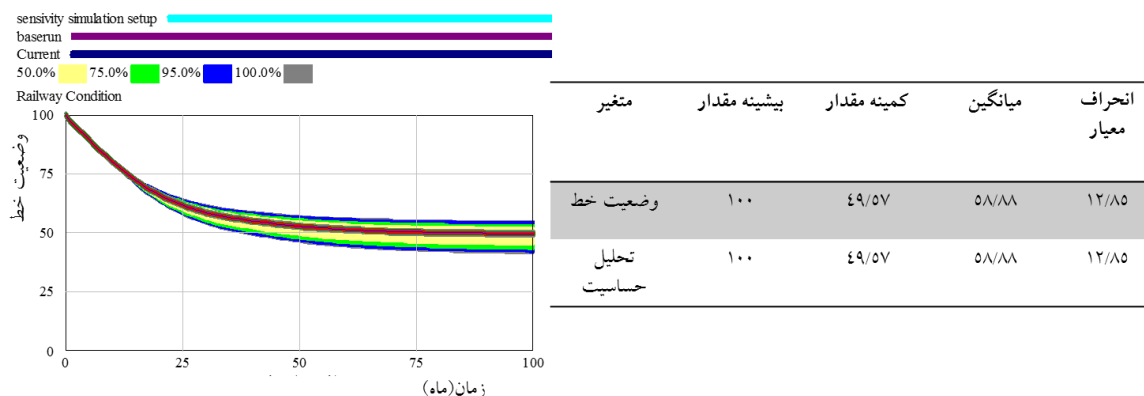
$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (2)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (3)$$

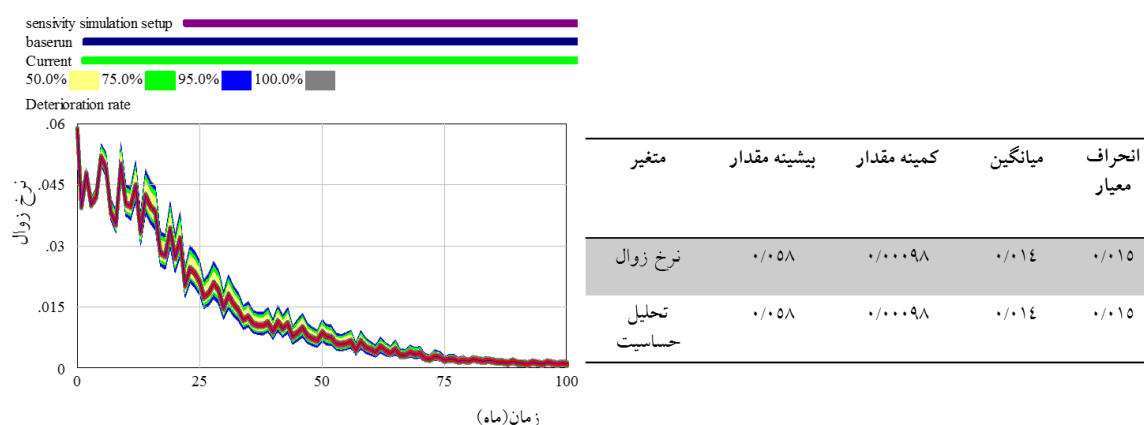
که \bar{S} میانگین داده های واقعی و \bar{A} میانگین داده های محاسبه شده از مدل با استفاده از نرم افزار است. از آنجا که محاسبه نرخ زوال از جمله مواردی است که در عمل و در عملیات بازرسی از خط در شبکه ریلی ایران محاسبه نمی شود، بنابراین مبنای اعتبارسنجی، TGI های محاسبه شده در فواصل ۹ ماهه اردیبهشت تا بهمن سال ۱۳۹۶ در نظر گرفته شده است. مقدار TGI برای کیلومتر ۸۲۰ در

²- Deterioration rate

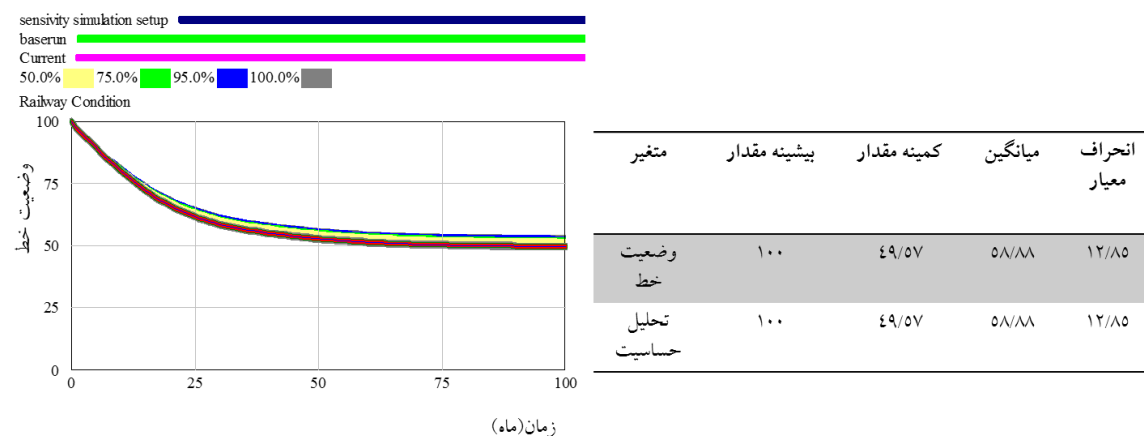
¹- Railway condition



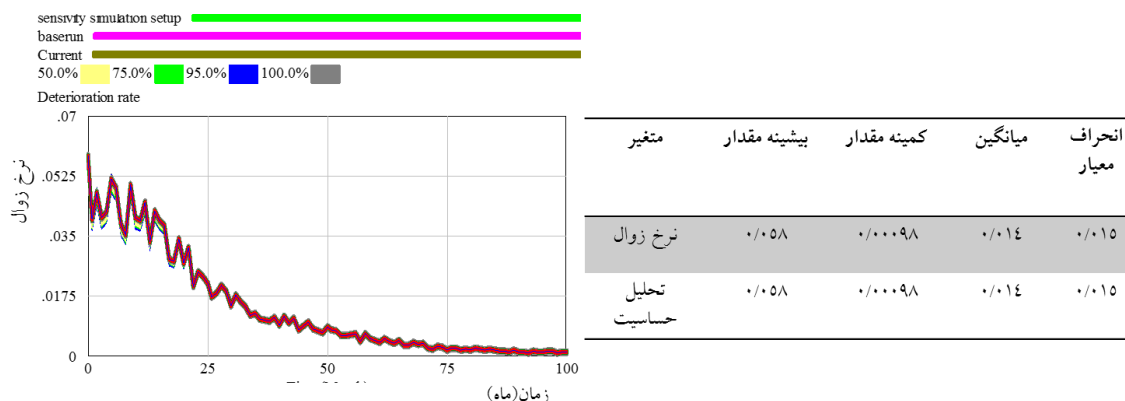
شکل ۹. تغییر در شاخص BCI در بازه ۴۰-۵۰ و تأثیر آن بر شاخص وضعیت خط



شکل ۱۰. تغییر در شاخص BCI در بازه ۴۰-۵۰ و تأثیر آن بر شاخص نرخ زوال



شکل ۱۱. تغییر در نرخ تناژ ماهانه در بازه ۰/۱-۰/۳۵ و تأثیر آن بر شاخص وضعیت خط



شکل ۱۲. تغییر در نرخ تناژ ماهانه در بازه ۰/۱-۰/۳۵ و تأثیر آن بر شاخص نرخ زوال

تعمیر و نگهداری به عنوان عاملی مثبت از میزان نرخ زوال می‌کاهد. از طرفی، براساس نتایج به‌دست آمده، می‌توان برآورد نمود که از دوره زمانی ماه پانزدهم به بعد خط نیازمند اقدامات اصلاحی (تعمیر) می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، فرم نمودار نرخ زوال بر حسب زمان از نوع نمایی است. لذا، به کمک روش‌های آماری و به روش رگرسیون غیرخطی می‌توان رابطه بین زوال و زمان را برآورد نمود. برای این منظور، از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. جدول ۱۰ و شکل ۱۳ خروجی‌های نرم‌افزار به منظور برآورد تابع زوال را نشان می‌دهد (DR: نرخ زوال). براساس این نتایج، مقدار $R^2=0.985$ برای برآورد رابطه نمایی است که نشان از دقت زیاد معادله برآورد شده دارد. همانطور که در نتایج جدول ۱۰ ارائه شده است، برآورد خطی از رابطه بین نرخ زوال و زمان، برآورد مناسبی نیست. این موضوع در شکل ۱۳ نیز قابل مشاهده است. بنابراین، با استفاده از نتایج آماری، رابطه زوال بر حسب زمان به صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$Deterioration\ rate = 0.058 e^{(-0.041*Time)} \quad (4)$$

نتایج ارائه شده در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نشان می‌دهد که تغییر در مقادیر ثابت شاخص بالاست و نرخ ماهانه تناژ، تأثیری بر خروجی مدل، یعنی مقادیر نرخ زوال و شاخص وضعیت خط، نخواهد داشت.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

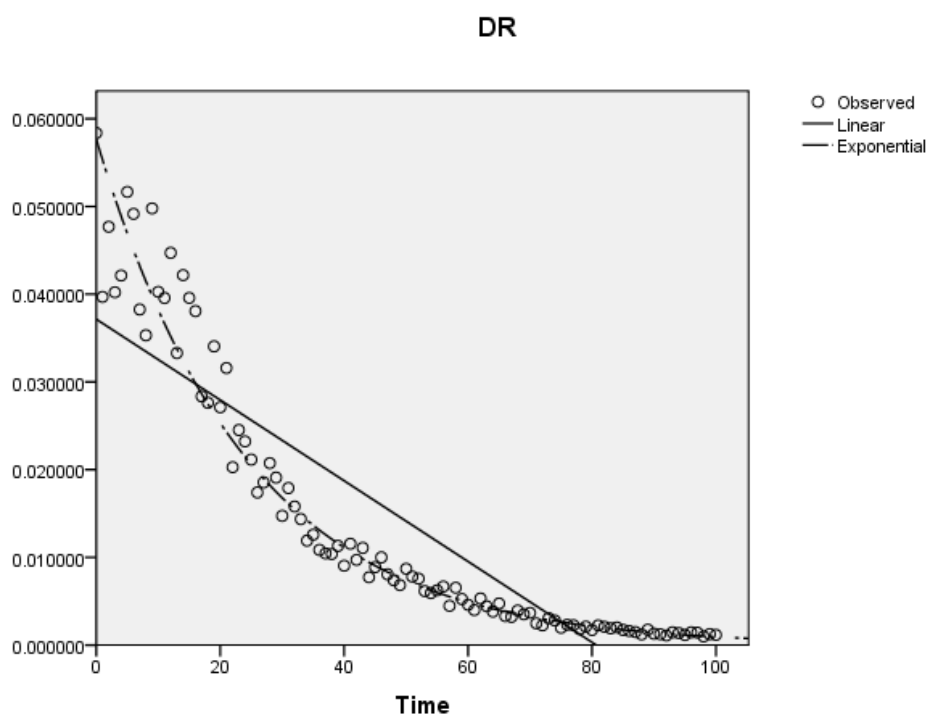
مدل پیشنهادی این مقاله، یک مدل پویای زوال خطوط ریلی است که تأثیر همزمان پارامترهای مختلف هندسی، سازه‌ای و ترافیکی را بر وضعیت خطوط ریلی مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

مدل پیشنهادی در بلوکی از مسیر ریلی ناحیه یزد پیاده‌سازی گردید. مطابق نتایج به‌دست آمده از اجرای مدل، بیشینه نرخ زوال برای بلوک طبرکوه-مهرداد در حدود ۰/۰۶ می‌باشد. دوره زمانی مرتبط با نرخ زوال بیشینه در ابتدای بازه زمانی مدل‌سازی مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از کم بودن نرخ زوال برای این مسیر است. علت این امر آن است که ثبت داده‌های مسیر فوق بعد از اجرای عملیات تعمیر و نگهداری و بهسازی مسیر صورت گرفته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که

جدول ۱۰. خروجی نرم افزار SPSS در برآورد رابطه بین زوال و زمان

| Model Summary and Parameter Estimates | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------|---------|-----|-----|---------------------|----------|-------|
| Dependent Variable: DR | | | | | | | |
| Equation | Model Summary | | | | Parameter Estimates | | |
| | R Square | F | df1 | df2 | Sig. | Constant | b1 |
| Linear | .788 | 368.770 | 1 | 99 | .000 | .037 | .000 |
| Exponential | .985 | 6.427E3 | 1 | 99 | .000 | .058 | -.041 |

The independent variable is time.



شکل ۱۳. برآورد رابطه خطی و نمایی بین زوال و زمان

این پژوهش اولین اقدام و تحقیق در زمینه ارائه مدل پویا زوال با استفاده از تئوری SD است. بنابراین، امکان توسعه بیشتر و انجام تحقیقات کامل تر در زمینه مدل پویای زوال وجود دارد. یکی از راهکارهای اصلی در دستیابی به نرخ زوال حقیقی تر برای خطوط ریلی، بررسی تأثیر میزان بهره‌وری عملیات نگهداری نظیر زیرکوبی و رگلاتور بر پارامترهای سازه‌ای و هندسی است که می‌تواند تا حدود بسیار زیادی در تعیین نرخ حقیقی تر از زوال خطوط ریلی مؤثر باشد.

تابع به دست آمده یک تابع گویا و ساده است که به راحتی جهت پیش‌بینی نرخ زوال در دوره‌های زمانی مختلف قابل استفاده است. به عبارتی، این تحقیق موفق شد که تابع زوال مبتنی بر زمان را ارائه نماید. این تابع براساس داده‌های خطوط ریلی ایران پیکربندی شده است. بنابراین، سایر شبکه‌های ریلی جهان می‌توانند با استفاده از مدل پیشنهادی این مقاله، تابع زوال متناسب با شرایط خود را برآورد نمایند. در نتیجه، تابع پیشنهادی زوال قابلیت تعمیم و توسعه به سایر راه آهن‌ها را دارد.

۷. مراجع

- احدی، م. ر. شیران، غ.، جعفریان مقدم، ا. ر. و فتحیان، م. ۱۳۹۲. "مدل دینامیکی ارزیابی عملکرد راه آهن ها (مطالعه موردی ارزیابی عملکرد راه آهن ایران)". سومین کنفرانس بین المللی پیشرفت های اخیر در مهندسی راه آهن.
- دزفولیان، ر.، صادقی، م. و جوادیان، ر. (۱۳۸۵). "ارائه مدل زوال خط به منظور مدیریت نت در خطوط ریلی ایران". هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.
- ذاکری، ج. ع. و رضازاده، م. ۱۳۸۵. "روش های نگهداری خط آهن". انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- ذاکری، ج. ع.، هماوندی، ش. و محمدوند، ح. ۱۳۸۴. "مقدمه ای بر مدیریت نگهداری و تعمیر خطوط راه آهن". جلد اول، انتشارات طاهر.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. ۱۳۸۴. "مشخصات فنی عمومی روسازی راه آهن". نشریه ۳۰۱.
- مجیدی فرد، ن. و حسینی، پ. ۱۳۸۲. "نگهداری و تعمیرات زیرسازی و روسازی خطوط ریلی". انتشارات آهوان.
- نصر آزادانی، م. ۱۳۸۴. "بررسی نقش نگهداری و تعمیرات خطوط بر راندمان صنعت حمل و نقل ریلی". کنفرانس ملی نگهداری و تعمیرات.
- Alva-Hurtado, J. E. and Selig, E. T. 1981. "Permanent strain behavior of railroad ballast". *In: Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Stockholm, Sweden, pp. 543-544.*
- Barlas, Y. 1994. "Model validation in system dynamics". *In: Proceedings of the 1994 International System Dynamics Conference, pp. 1-10.*
- Bing, A. J. and Gross, A. 1983. "Development of railway track degradation models". *Transport. Res. Record, 939: 27-31.*
- Chrismer, S. and Selig, E. T. 1993. "Computer model for ballast maintenance planning". *In: Proceedings of 5th International Heavy Haul Railway Conference, Beijing, pp. 223-227.*
- Dahlberg, T. 2001. "Some railroad settlement models- A critical review". *Proc. of the Inst. of Mech. Eng. Part F- J. Rail Rapid Transit, 215(4): 289-300.*
- Eberlein, R. L. and Peterson, D. W. 1992. "Understanding models with vensim". *Eur. J. Oper. Res., 59: 216-219.*
- Guler, H. 2014. "Prediction of railway track geometry deterioration using artificial neural networks: A case study for Turkish state railways". *Struct. Infrastruct. Eng., 10(5): 614-626.*
- Gunn, D. A., Chambers, J. E., Dashwood, B. E., Lacinska, A., Dijkstra, T., Uhlemann, S., Swift, R., Kirkham, M., Milodowski, A., Wragg, J. and Donohue, S. 2018. "Deterioration model and condition monitoring of aged railway embankment using non-invasive geophysics". *Constr. Build. Mater., 170: 668-678.*
- Hayward, J. 2005. "Introduction to system dynamics". University of Glamorgan.
- Misra, K. B. 2008. "Handbook of performability engineering". Springer-Verlag, London.
- Moridpour, S., Elkhoury, N., Hitihamillage, L. and Robert, D. 2018. "Degradation prediction of rail tracks: A review of the existing literature". *The Open Transport. J., 12: 88-104.*
- Oberg, J. 2006. "Track deterioration of ballasted tracks- Marginal cost models for different railway vehicles". MSc. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Sadeghi, J. and Askarinejad, H. 2007. "Influences of track structure, geometry and traffic parameters on railway deterioration". *IJE Trans. B: Appl., 20(3): 292-300.*
- Sadeghi, J. and Askarinejad, H. 2010. "Development of improved railway track degradation models". *Struct. Infrastruct. Eng., 6(6): 675-688.*
- Sadeghi, J. M. and Askarinejad, H. 2011. "Development of track condition assessment model based on visual inspection". *Struct. Infrastruct. Eng., 7(12): 895-905.*
- Sato, Y. 1995. "Japanese studies on deterioration of ballasted track". *Vehicle Sys. Dyn., 24: 197-208.*
- Shenton, M. J. 1985. "Ballast deformation and track deterioration, track technology". Tomas Telford, London.
- Sterman, J. D. 2001. "System dynamics modelling". *Calif. Manage. Rev., 43: 8-25.*
- Xu, P., Liu, R. K., Wang, F., Wang, F. T. and Sun, Q. X. 2013. "Railroad track deterioration characteristics based track measurement data mining". *Math. Probl. Eng., 2013: 1-7.*

مدل پویای زوال خطوط راه آهن به کمک تئوری پویایی سیستم: مطالعه موردی

پیوست ۱. نمونه‌ای از داده‌های ماشین اندازه‌گیری خطوط ریلی

| خرابی | متحرک | TWS10 | TWS50 | TWS32 | ALR | ALL | XLV | GAU | LLR | LLL | KM |
|----------|----------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| 3.014677 | -3.86368 | -0.777 | 1.762 | -4.286 | -3.026 | 0.67 | -0.849 | -4.647 | -0.428 | -2.804 | 819.11475 |
| 3.89091 | -3.89591 | -0.262 | 1.995 | -4.954 | -2.777 | 0.855 | -0.005 | -4.647 | -0.32 | -2.639 | 819.115 |
| 4.488564 | -3.92456 | 0.081 | 2.142 | -5.257 | -2.426 | 0.869 | 0.564 | -4.547 | -0.287 | -2.332 | 819.11525 |
| 4.939755 | -3.94775 | 0.428 | 2.133 | -5.264 | -1.722 | 0.739 | 0.992 | -4.178 | -0.073 | -1.82 | 819.1155 |
| 5.000757 | -3.96276 | 0.827 | 2.108 | -4.551 | -0.856 | 0.374 | 1.038 | -3.474 | 0.298 | -1.193 | 819.11575 |
| 5.467327 | -3.97233 | 1.411 | 1.981 | -3.436 | 0.355 | -0.014 | 1.495 | -2.618 | 0.7 | -0.537 | 819.116 |
| 5.812257 | -3.98326 | 2.095 | 2.015 | -1.98 | 1.431 | -0.393 | 1.829 | -1.713 | 0.965 | 0.019 | 819.11625 |
| 6.42933 | -3.99933 | 2.644 | 2.131 | -0.646 | 2.341 | -0.701 | 2.43 | -0.874 | 1.073 | 0.619 | 819.1165 |
| 6.447187 | -4.02019 | 3.049 | 2.388 | 0.428 | 2.889 | -1.113 | 2.427 | -0.002 | 1.225 | 1.314 | 819.11675 |
| 6.236231 | -4.04323 | 3.349 | 2.729 | 1.145 | 3.388 | -1.513 | 2.193 | 0.819 | 1.508 | 2.048 | 819.117 |
| 5.395193 | -4.06819 | 3.48 | 2.979 | 1.888 | 3.946 | -1.858 | 1.327 | 1.473 | 1.867 | 2.645 | 819.11725 |
| 4.015364 | -4.09236 | 3.364 | 3.209 | 2.577 | 4.601 | -2.032 | -0.077 | 1.792 | 2.233 | 3.107 | 819.1175 |
| 2.381802 | -4.1128 | 3.118 | 3.114 | 3.021 | 4.956 | -2.261 | -1.731 | 1.792 | 2.589 | 3.37 | 819.11775 |
| 0.770688 | -4.12669 | 2.964 | 3.002 | 3.074 | 4.864 | -2.615 | -3.356 | 1.658 | 3.069 | 3.691 | 819.118 |
| -0.43788 | -4.13312 | 3.187 | 2.968 | 2.827 | 4.722 | -2.896 | -4.571 | 1.44 | 3.67 | 4.15 | 819.11825 |
| -1.34724 | -4.13376 | 3.587 | 3.024 | 2.538 | 4.635 | -3.119 | -5.481 | 1.238 | 4.382 | 4.753 | 819.1185 |

فرخی، جعفریان مقدم

