Industrial Management Journal

Print ISSN: 2008-5885
Online ISSN: 2423-5369

Condition-Based Preventive Maintenance Planning of Railway Tracks: A Genetic Algorithm-Based Mathematical Model

Alireza Sedighi
Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: ar.sedighi@ase.ui.ac.ir

Mahsa Ghandehari *
*Corresponding Author, Associate Prof., Department of Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: m.ghandehari@ase.ui.ac.ir

Sayyed Mahdi Abtahi
Associate Prof., Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: mabtahi@cc.iut.ac.ir

Abstract

Objective

Railway tracks are among the most critical and costly components of any railroad. Optimal and timely maintenance allocation ensures system reliability and effective resource utilization. This article presents a mathematical model designed for condition-based preventive maintenance of railway tracks. The objective is to minimize total maintenance costs while maintaining system availability and reliability. The cost function considers maintenance and renewal expenses, track possession costs, and unplanned failure costs during the planning horizon. The network is divided into segments, with the standard deviation of the longitudinal level calculated as the track quality index. Prediction and recovery models are developed to assess variations in the track quality index over the planning period. Preventive operations, including inspections, tamping, and ballast replacement, are assigned to track segments based on the allowable index

Citation: Sedighi, Alireza; Ghandehari, Mahsa & Abtahi, Sayyed Mahdi (2025). Condition-Based Preventive Maintenance Planning of Railway Tracks: A Genetic Algorithm-Based Mathematical Model. *Industrial Management Journal*, 17(1), 1-33. (*in Persian*)

Industrial Management Journal, 2025, Vol. 17, No 1, pp. 1-33
Published by University of Tehran, Faculty of Management
https://doi.org/10.22059/IMJ.2025.383567.1008199
Article Type: Research Paper
© Authors
Received: December 26, 2023
Received in revised form: November 05, 2024
Accepted: December 24, 2024
Published online: March 12, 2025

limits and other constraints. The expected number of random failures is estimated using the non-homogeneous Poisson process, and preventive operations aim to reduce the incidence of such failures.

Methods

Given the complexity and non-linearity of the mathematical model, a meta-heuristic method based on a genetic algorithm was developed in MATLAB software. Initial random solutions were generated using a heuristic method. As a case study, input parameters were collected and modeled for one kilometer of railway in the Arak region. The efficiency of the proposed genetic algorithm was then compared with the results obtained using GAMS software.

Results

For the case study, the mathematical model was solved for various problem dimensions using both methods. When GAMS software was able to achieve the optimal solution, both methods produced identical results. When GAMS could only report a feasible solution, the genetic algorithm outperformed it. For higher dimensions where GAMS provided a solution, the genetic algorithm produced results with objective function values that were 40% better.

Conclusion

The planning of preventive maintenance operations for railway tracks during the project period is achieved through solving the proposed mathematical model. This allocation is based on the quality index of the tracks and considers the reducing effect of preventive operations on the expected number of random failures, ensuring the required minimum availability and reliability of the system. The variability of the model's input parameters allows for consideration of influencing heterogeneous factors based on the tracks, traffic, and environment, enabling adaptation to different conditions or the implementation of various strategies. Additionally, the proposed genetic algorithm can efficiently solve different dimensions of problem instances.

Keywords: Genetic Algorithm, Mathematical Modelling, Planning, Preventive Maintenance, Railway Track.

مدیریت صنعتی
شاپا چاپی: ۵۸۸۵-۲۰۰۸
شاپا الکترونیکی: ۵۳۶۹-۲۴۲۳

ارائه یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی عملیات نت پیشگیرانه و مبتنی بر وضعیت خطوط ریلی و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک

علیرضا صدیقی

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکدهٔ علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: ar.sedighi@ase.ui.ac.ir

مهسا قندهاری *

* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: m.ghandehari@ase.ui.ac.ir

سید مهدی ابطحی

دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: mabtahi@cc.iut.ac.ir

چکیده

هدف: خطوط ریلی از بخش‌های بسیار مهم و پُرهزینهٔ هر راه‌آهن به حساب می‌آید. تخصیص بهینه و بهنگام عملیات نت، ضامن قابلیت اطمینان سیستم است و به استفادهٔ مؤثر از منابع منجر می‌شود. در این مقاله به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان خطوط راه‌آهن، حداقل کردن هزینه‌های مرتبط با تعویض و نگهداری قطعات و در عین حال، در نظر گرفتن دسترس‌پذیری، یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی عملیات نت پیشگیرانه و مبتنی بر وضعیت خطوط ریلی توسعه داده شده است. هدف این مقاله، ارائهٔ مدلی به‌منظور حداقل کردن کل هزینه‌های نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن محدودیت حداقل دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم است. هزینه‌های درگیر عبارت‌اند از: هزینهٔ اجرای عملیات تعمیراتی و نوسازی، هزینهٔ مسدودی خط و هزینهٔ اصلاح خرابی‌های تصادفی در افق برنامه‌ریزی. برای سادگی محاسبهٔ هزینه‌ها، ضمن تقسیم شبکهٔ ریلی به قطعاتی از خط، انحراف استاندارد پروفیل طولی، به‌عنوان شاخص کیفیت خطوط در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های پیش‌بینی و بازیابی برای به‌دست آوردن تغییرات شاخص کیفیت خطوط در طول دورهٔ برنامه‌ریزی توسعه داده می‌شود. عملیات پیشگیرانه شامل بازرسی، زیرکوبی و تعویض لایه بالاست با توجه به حد مجاز شاخص و سایر محدودیت‌ها، به قطعات خط اختصاص داده می‌شود. متوسط تعداد خرابی‌های تصادفی با استفاده از توزیع پواسون ناهمگن برآورد می‌شود و اجرای عملیات پیشگیرانه، بر تعداد خرابی‌های تصادفی تأثیری کاهنده خواهد داشت.

روش: با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن مدل ریاضی، یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است که در آن، جواب‌های موجه اولیه توسط یک روش ابتکاری تولید می‌شود. به‌عنوان یک مطالعه موردی،

استناد: صدیقی، علیرضا؛ قندهاری، مهسا و ابطحی، سیدمهدی (۱۴۰۴). ارائه یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی عملیات نت پیشگیرانه و مبتنی بر وضعیت خطوط ریلی و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک. *مدیریت صنعتی*، ۱۷(۱)، ۱-۳۳.

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۴، دوره ۱۷، شماره ۱، صص. ۱-۳۳
ناشر: دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران
نوع مقاله: علمی پژوهشی
© نویسندگان
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲
doi: https://doi.org/10.22059/IMJ.2025.383567.1008199

جمع‌آوری پارامترهای لازم و مدل‌سازی، برای یک کیلومتر از راه‌آهن ناحیهٔ اراک انجام شد. همچنین کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در مقایسه با جواب‌های حاصل از حل دقیق مسئله بررسی شد.

یافته‌ها: مثال‌هایی با ابعاد گوناگون با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده در مطالعه موردی به‌کمک هر دو روش فرابتکاری و دقیق با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد. برای ابعاد کوچک‌تر جواب‌های بهینهٔ حاصل با استفاده از نرم‌افزار گمز با جواب حاصل از الگوریتم ژنتیک منطبق بود. برای ابعاد بزرگ‌تر، به‌دلیل پیچیدگی مسئله، نرم‌افزار گمز یک جواب زیربهینه ارائه داد و جواب حاصل از الگوریتم ژنتیک بهتر بود. در نهایت، در حداکثر بعدی از مسئله که نرم‌افزار گمز قادر به ارائهٔ جواب است، مقدار تابع هدف جواب حاصل از الگوریتم ژنتیک، ۴۰ درصد بهتر به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: برنامه‌ریزی عملیات نت پیشگیرانهٔ خطوط ریلی، در طول افق برنامه‌ریزی با استفاده از حل مدل ریاضی پیشنهادی به‌دست می‌آید. تخصیص عملیات نت، مبتنی بر وضعیت شاخص کیفیت خطوط بوده است و با لحاظ تأثیر کاهنده انجام عملیات پیشگیرانه بر متوسط تعداد خرابی‌های تصادفی، حفظ حداقل دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم را تضمین می‌کند. پویایی پارامترهای ورودی مدل برای هر قطعه، در هر زمان امکان لحاظ عوامل ناهمگون تأثیرگذار بر زوال خطوط، از قبیل عوامل مبتنی بر خط، ترافیک عبوری و شرایط محیطی و همچنین، تطبیق با شرایط مختلف یا پیاده‌سازی سیاست‌های گوناگون را می‌دهد. همچنین الگوریتم ژنتیک پیشنهادی قابلیت حل کارای مسئله در ابعاد زیاد را دارد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی، مدل‌سازی ریاضی، نت خطوط ریلی، نت پیشگیرانه.

مقدمه

زیرساخت ریلی از جمله سرمایه‌های حیاتی و مهم هر کشور در زمینه حمل بار و مسافر است. خطوط ریلی، بخش مهمی از زیرساخت راه‌آهن را تشکیل می‌دهد که عملکرد ایمن و کارآمد آن در گرو نگهداری و تعمیرات بهنگام است. تصادف‌های ناشی از خطوط[1] در آمریکا، به‌طور پیوسته، ۳۰ تا ۴۰ درصد از کل تصادف‌های دهۀ گذشته بوده است. (دفتر تحلیل ایمنی اداره راه‌آهن فدرال[2]، ۲۰۲۴). همچنین راحتی سیر[3] به‌عنوان عامل اصلی در جذب تقاضا، شاخص مورد توجه مدیران و وابسته به شاخص کیفیت خطوط[4] است (صادقی، حیدری و دولویی[5]، ۲۰۱۷). از طرفی هزینه‌های بالای نت[6]، از مسائل پراهمیت شرکت‌های بهره‌برداری است و صنعت ریلی هزینه زیادی را صرف پروژه‌های نوسازی و نت می‌کند. به‌طور مثال، حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد از هزینه‌های راه‌آهن در آمریکا، به نت خطوط مربوط می‌شود (دفتر تحلیل ایمنی اداره راه‌آهن فدرال، ۲۰۲۴).

عملکرد کارآمد خطوط ریلی را می‌توان با تصمیم‌گیری درست در مورد اینکه کدام عملیات نت، در چه مکان و زمانی انجام شود، تضمین کرد. وجود اهداف متعارضی از قبیل افزایش راحتی سیر، کاهش زمان سفر[7]، افزایش قابلیت اطمینان[8]، ارتقای ایمنی و کمینه‌سازی هزینه‌ها در کنار محدودیت‌هایی مانند مسدود کردن خطوط، منابع و ماشین‌آلات محدود برای اجرای عملیات، مسئله برنامه‌ریزی عملیات نت خطوط ریلی را به مسئله‌ای چالش برانگیز و نیازمند به یک مدل پشتیبان تصمیم‌گیری تبدیل کرده است (گوستاوسون[9]، ۲۰۱۵).

در گذشته، اجرای نت پیشگیرانه اغلب بر اساس دوره‌های زمانی ثابت و تجربیات تاریخی انجام می‌شد که این امر می‌توانست به توقف‌های ناگهانی و هزینه‌های اضافی منجر شود. انقلاب صنعتی چهارم با بهره‌گیری از فناوری‌های نوینی نظیر اینترنت اشیا، داده‌های کلان و هوش مصنوعی، در صنایع مختلف، به‌ویژه در حوزۀ نت پیشگیرانه خطوط ریلی تحولات عمیقی را به‌وجود آورده است. استفاده از حسگرهای پیشرفته و دستگاه‌های هوشمند، نظارت مستمر بر عملکرد سیستم‌های ریلی و دسترسی به داده را ممکن ساخته است. از طرفی، ظهور تکنیک‌های تحلیل داده و یادگیری ماشین امکان تجزیه‌وتحلیل دقیق از وضعیت تجهیزات و زیرساخت‌ها را فراهم کرده است و رویکرد برنامه‌ریزی نت به‌سمت مدل‌های مبتنی بر داده تحول یافته است (پینسیرولی، بارالدی و زیو[10]، ۲۰۲۳). این تحول در جهت افزایش چشمگیر کارایی و کاهش هزینه‌های ناشی از خرابی‌های تصادفی است. توسعۀ چنین مدل‌هایی برای برنامه‌ریزی نت خطوط ریلی به‌صورت کلی، شامل سه گام زیر است (سلیمانی میگونی، احمدی و کومار[11]، ۲۰۱۸):

---

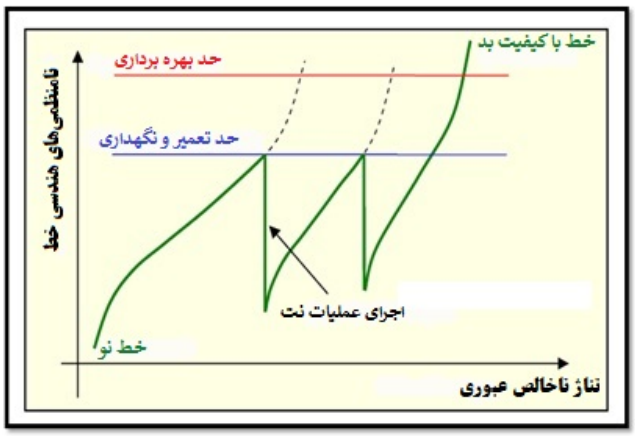
1. Track-caused accidents
2. Federal Railroad Administration Office of Safety Analysis (FRA)
3. Ride Comfort
4. Track Quality Index (TQI)
5. Sadeghi, Heydari & Doloei

۶. نگهداری و تعمیرات

7. Travel Time
8. Reliability
9.Gustavsson
10. Pinciroli, Baraldi & Zio
11. Soleimani Meigouni, Ahmadi & Kumar

۱. بازرسی خط[1]: هدف از پایش خطوط، اطمینان از سلامت خط، آگاهی از مشکلات بالقوه و خرابی‌های موجود و امکان برنامه‌ریزی برای اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی است. این بازرسی‌ها ممکن است به‌صورت سنتی و پیاده (راهبانی) یا توسط تجهیزات مکانیزه انجام شود. خروجی این سامانه، بیان وضعیت کیفیت خطوط در قالب شاخص‌های کمی معنادار است. این شاخص‌ها از پایگاه‌های داده حاصل از بازرسی‌های منظم خط برای هر بازهٔ زمانی محاسبه می‌شوند.

۲. مدل‌های زوال[2]: رسالت این مدل‌ها، پیش‌بینی شاخص کیفیت خط پس از یک گام زمانی معین یا عبور تناژ مشخصی از خط است. این پیش‌بینی اغلب بین دو عملیات نت متوالی رخ می‌دهد. در غیر این صورت باید تأثیر عملیات نت انجام شده روی خطوط، توسط مدل‌های بازیابی[3]، بر شاخص اعمال شود و پس از آن رفتار بلندمدت شاخص قابل پیش‌بینی خواهد بود (کسرائی و ذاکری[4]، ۲۰۲۲). شکل ۱ به‌صورت شماتیک نمونه‌ای از فرایند زوال در قالب افزایش شاخص نامنظمی‌های هندسی خط[5] در برابر تناژ عبوری تجمعی را نشان می‌دهد. مقایسه طول عمر خط طی زوال طبیعی با حالتی که مداخلات[6] در زمان‌های مناسبی انجام شده است، نشان می‌دهد که اگر عملیات نت به‌موقع و در مکان مناسب انجام شود، می‌تواند موجب افزایش عمر خط و در پی آن کاهش هزینه‌های نوسازی شود برنامه‌ریزی عملیات نت پیشگیرانه خطوط با درک رفتار زوال خط ممکن است (سراکو و نتو[7]، ۲۰۲۳).



شکل ۱. زوال هندسی خط، ارتباط شاخص خرابی با تناژ عبوری

منبع: (سراکو و نتو، ۲۰۲۳)

۳. مدل برنامه‌ریزی[8]: خروجی این مدل، برنامهٔ عملیات نت پیشگیرانهٔ خطوط در یک بازهٔ زمانی محدود برای قطعات مشخصی از خط است. به عبارت دیگر این برنامه مشخص می‌کند که برای هر قطعه از خط، چه عملیاتی و در چه

1. Track inspection
2. Degradation Models
3. Recovery Models
4. Kasraei & Zakeri
5. Track Irregularities
6. Intervention
7. Seraco & Neto
8. Planning Models

زمانی انجام شود تا هزینه‌های نت در چرخهٔ عمر خط حداقل شود یا کیفیت خط با وجود محدودیت بودجه تعمیراتی حداکثر شود. با تخصیص عملیات پیشگیرانه مبتنی بر وضعیت، بودجه محدود نت دقیقاً به قطعاتی از خط تخصیص داده می‌شود که نیازمند آن هستند و ممکن است در صورت بی‌توجهی، موجب اعمال هزینه‌های سنگین‌تر به سیستم یا ایجاد سانحه شوند (خسروی، احمدی، کسرایی و نیسن[1]، ۲۰۲۴).

هدف اصلی انجام این پژوهش ارائهٔ یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی عملیات نت پیشگیرانه خطوط ریلی با رویکردی مبتنی بر وضعیت به‌منظور حداقل کردن هزینه‌هاست؛ به‌طوری که ضمن رعایت حد مجاز شاخص کیفیت خط در هر دوره، حد مطلوبی از قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری سیستم تضمین شود. به این منظور لازم است پس از قطعه‌بندی شبکهٔ ریلی و مرزبندی مسئله، عناصر لازم برای تشکیل چارچوب مدل‌سازی توسعه داده شود. بنابراین چگونگی انجام این مدل‌سازی و دستیابی به روش حل مناسب، از سؤال‌های اصلی این پژوهش هستند.

پیشینهٔ نظری پژوهش

مطالعات مروری جامعی در زمینه برنامه‌ریزی نت خطوط ریلی توسط بیندر، مژویو و تسچاندل[2] (۲۰۲۳)، پرابهاکاران و همکاران[3] (۲۰۲۲) و زی، هوانگ، زنگ، جیانگ و پودلیچ[4] (۲۰۲۰) انجام شده که کاربرد رویکردها و تکنیک‌های متعدد را ذکر کرده‌اند. در این بخش تمرکز بر روی مطالعاتی در این زمینه است که بر مبنای مدل‌های ریاضی هستند.

بودای، دکر و کایماک[5] (۲۰۰۶و ۲۰۰۹) مسئله زمان‌بندی عملیات نت را برای خطوط راه‌آهن مورد مطالعه قرار دادند. در کار اول، نویسندگان با فرض مشخص بودن فهرست عملیات نت دوره‌ای و پروژه‌ای، به توسعهٔ مدل ریاضی پرداختند که با هدف حداقل کردن هزینهٔ اجرای عملیات[6] و مسدودی خط[7]، به زمان‌بندی عملیات با هم‌پوشانی حداکثر دست یافتند. به‌علاوه یک روش حل ابتکاری برای مدل مذکور نیز ارائه کردند. در کار دوم نیز با توسعهٔ الگوریتم‌های ژنتیک و ممتیک فرایند حل مدل را بهبود دادند. پنگ، کانگ، لی و اویانگ[8] (۲۰۱۱)، برای حل مسئله زمان‌بندی عملیات نت خطوط ریلی، یک مدل شبکه زمان ـ مکان ارائه داد. تابع هدف به حداقل رساندن کل هزینه‌های سفر تیم‌های نت و همچنین تأثیر عملیات نت بر بهره‌برداری راه‌آهن بود. همچنین رویکردی تکراری و ابتکاری برای حل مدل مذکور پیشنهاد شد. گوستاوسون، پاتریکسون، استرومبرگ، وویچیچوفسکی و اونهایم[9] (۲۰۱۴)، با فرض یک مدل قطعی برای رشد ترک‌های خستگی[10] ریل، یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی برنامه پیشگیرانه سنگ‌زنی ریل[11] برای مجموعه‌ای از قطعات خط ارائه داد. همچنین استفاده از مدل‌سازی ریاضی برای حل مسئلهٔ برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه در دیگر صنایع

1. Khosravi, Ahmadi, Kasraei & Nissen
2. Binder, Mezhuyev & Tschandl
3. Prabhakaran et al.
4. Xie, Huang, Zeng, Jiang & Podlich
5. Budai, Dekker & Kaymak
6. Maintenance costs
7. Possession costs
8. Peng, Kang, Li & ouyang
9. Gustavsson, Patriksson, Strömberg, Wojciechowski & Önnheim
10. Fatigue Cracks
11. Rail Grinding

نیز توسط کانتو[1] (۲۰۰۸)، مقدم و آشر[2] (۲۰۱۱)، لیو، لانگ، تانگ، ژانگ و چن[3] (۲۰۱۹) و کامل، فهمی، محب و عفیفی[4] (۲۰۲۰) ارائه شده است.

با توجه به رشد سریع‌تر خرابی‌های پروفیل طولی[5] خط که به اجرای عملیات اصلاحی برای لایه بالاست[6] نیاز خواهد داشت، مدل‌های برنامه‌ریزی اغلب با تمرکز بر برنامه‌ریزی بهینه عملیات زیرکوبی[7] توسعه یافته‌اند. اویاما و میوا[8] (۲۰۰۶) یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی عملیات زیرکوبی ارائه کردند که دارای یک مدل انتقال برای پیش‌بینی تغییرات نامنظمی‌های سطحی خط برای تخصیص عملیات بهینه بود. آندراده و تکسیرا[9] (۲۰۱۱) در یک بهینه‌سازی دو هدفه، ضمن حداقل کردن کل هزینه‌های زیرکوبی و تعویض بالاست[10]، همچنین حداقل کردن تعداد کل تاخیرهای قطار ناشی از اعمال محدودیت سرعت، به توسعه یک مدل ریاضی عدد صحیح پرداختند و با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده[11]، به تخصیص بهینه دست یافتند.

در پژوهشی دیگر، ژانگ، اندروز و وانگ[12] (۲۰۱۳) مسئله برنامه‌ریزی عملیات زیرکوبی در یک شبکه راه‌آهن منطقه‌ای در انگلستان را مطالعه کردند و از یک الگوریتم ژنتیک برای به‌دست آوردن جواب بهینه بهره بردند. ول، ریبیرو و کالچادا[13] (۲۰۱۴) و ول و ریبیرو (۲۰۱۲) با هدف به حداقل رساندن تعداد کل عملیات زیرکوبی در افق برنامه‌ریزی با یک مدل ریاضی، برنامهٔ بهینه عملیات زیرکوبی را به‌دست آوردند و در کار دوم با در نظر گرفتن زوال تصادفی و استفاده از توزیع داگوم[14]، مدل قبلی را توسعه دادند. فاموروا، شین، رانتاتالو و کومار[15] (۲۰۱۵) با در نظر گرفتن رفتار نمایی برای زوال و مدل تجربی بازیابی شاخص پس از عملیات زیرکوبی، مدل ریاضی تخصیص عملیات زیرکوبی را توسعه دادند. سپس گوستاوسون (۲۰۱۵) آن مدل را با در نظر گرفتن محدودیت‌های تفکیک‌شده برای تأثیر مسیر و به حداقل رساندن هزینه کل به‌جای تعداد عملیات زیرکوبی، ارتقا داد. در مطالعه دیگری ون، لی و سالینگ[16] (۲۰۱۶) مدل قبلی را با به حداقل رساندن هزینه خالص فعلی[17] و در نظر گرفتن تأثیر عملیات زیرکوبی قبلی از طریق بازیابی شاخص کیفیت خط توسعه داد. در ادامه دادو، ژانگ، کیو، ژانگ و لیو[18] (۲۰۲۰)، با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط[19] به برنامه‌ریزی عملیات زیرکوبی پرداختند. آن‌ها هزینه مسدودی خط و تعداد عملیات زیرکوبی در هر دوره را در مدل ریاضی

1. Canto
2. Moghaddam & Usher
3. Liu, Long, Tong, Zhang & Chen
4. Kamel, Fahmy, Mohib & Afefy
5. Longitudinal Level
6. Ballast layer
7. Tamping Operation
8. Oyama & Miwa
9. Andrade & Teixeira
10. Ballast Replacement
11. Simulated Annealing
12. Zhang, Andrews & Wang
13. Vale, Ribeiro & Calçada
14. Dagum distribution
15. Famurewa, Xin, Rantatalo & Kumar
16. Wen, Li & Salling
17. Net present cost
18. Daddow, Zhang, Qiu, Zhang & Liu
19. Mixed-Integer Linear Programming (MILP)

در نظر گرفتند. انحراف استاندارد پروفیل طولی قطعات به‌عنوان شاخص کیفیت خط انتخاب و از نرخ زوال ثابت برای پیش‌بینی مقدار شاخص استفاده شد. همچنین مقدار بازیابی به‌صورت وابسته از روی مقدار شاخص هندسی خط در هر دوره محاسبه شده است.

نوآوری پژوهش

مسئله تعریف شده در این پژوهش از لحاظ تعریف متغیرها، شرایط و محدودیت‌ها با آن‌چه در ادبیات مرتبط وجود دارد متمایز است. در مدل پیشنهادی عملیات‌های بازرسی و تعویض بالاست نیز در نظرگرفته می‌شود. همچنین نرخ زوال برای هر قطعه در هر دوره متغیر و وابسته به عملیات اجرا شده در دورهٔ قبل و متناسب با تقاضای شبکهٔ ریلی در آن دوره در نظر گرفته شده است که موجب می‌شود مدل ارتقا یابد و به آنچه در واقعیت وجود دارد، نزدیک شود. در نظر گرفتن هزینهٔ خرابی‌های تصادفی در تابع هدف و تأثیر کاهندهٔ اجرای عملیات نت پیشگیرانه در وقوع خرابی‌های تصادفی از دیگر موارد نوآوری مدل پیشنهادی است. علاوه‌برآن، مدل‌سازی وقوع تصادفی شکست جوش ریل‌ها با اقتباس از پژوهش کامل و همکاران (۲۰۲۰) که برای یک سیستم m ماشینی انجام شده، توسط فرایند پواسون ناهمگن[1] برای هر قطعه، صورت گرفته است. همچنین به‌دلیل اهمیت قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری سیستم، اعمال محدودیت برقراری حداقل مقدار برای این دو کمیت از دیگر نوآوری‌های این پژوهش است. مسئلهٔ پیشنهادی با استفاده از متغیرها و محدودیت‌های ذکرشده و با در نظر گرفتن محدودیت منابع در هر دوره و حداکثر بودجه قابل استحصال در دوره برنامه‌ریزی به‌صورت یک برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط[2] فرمول‌بندی می‌شود. همچنین الگوریتمی برای حل مسئله با استفاده از تکنیک‌های ابتکاری و فراابتکاری ارائه شد.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نوع توسعه‌ای ـ کاربردی است و هدف آن توسعه مدل ریاضی برنامه‌ریزی عملیات نت پیشگیرانه خطوط ریلی با رویکردی مبتنی بر وضعیت است، به نحوی که برای کلیهٔ خطوط بالاستی قابل استفاده باشد. بنابراین توجه به دو اصل تیغه اوکامی[3] (سادگی و ایجاز) و اصل تنوع ضروری[4] بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا کاربردی و عملیاتی بودن مدل پیشنهادی برای صنعت ریلی، اهمیت بسیار زیادی دارد. از طرفی جمع‌آوری داده‌ها و پارامترهای مورد نیاز پژوهش از نوع توصیفی و پیمایش تک مقطعی است. تخصیص عملیات نت مبتنی بر عدول نکردن شاخص کیفیت خطوط از رواداری مجاز در طول دوره طرح خواهد بود. همچنین رعایت حداقل مطلوب دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم ممکن است به تخصیص عملیات مازادی منجر شود تا وقوع خرابی‌های تصادفی، کنترل شده باشد (احمدی و گروسی مختارزاده، ۱۳۹۲). شکست جوش ریل‌ها در هر دوره، از یک فرایند تصادفی پیروی می‌کند و انجام عملیات پیشگیرانه بر نرخ وقوع آن تأثیری کاهنده خواهد داشت. یکی از اهداف، حداقل کردن هزینهٔ اصلاح خرابی‌های تصادفی است

1. non-homogeneous Poisson process
2. Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)
3. Parsimony
4. Requisite Variety

(جعفرنژاد، جشیره نژادی، صفایی و حافظی‌نیا، ۱۳۹۴). از طرفی انجام عملیات پیشگیرانه علاوه‌بر هزینهٔ اجرا، به مسدودی خط منجر خواهد شد و هزینه عدم‌النفع از خطوط ریلی از جمله هزینه‌های غیرمستقیم خواهد بود که بایستی در برنامه‌ریزی عملیات پیشگیرانه در نظر گرفته شود. مفروضات زیر در این پژوهش در نظر گرفته شده است:

- انحراف استاندارد پروفیل طولی خط، محاسبه شده روی قطعات به طول sl از خط آهن یک شاخص هندسی خطوط[1] است که براساس استاندارد EN 13848-5 به‌عنوان شاخص کیفیت خطوط برای برنامه‌ریزی عملیات نت پیشنهاد شده است (کمیته استانداردسازی اروپا[2]، ۲۰۱۷).
- داده‌های لازم برای محاسبه این شاخص طی بازرسی دوره‌ای ماشین اندازه‌گیر خط[3] EM120 توسط شرکت راه‌آهن ج.ا.ا برداشت می‌شود. این ماشین به‌صورت مکانیزه هندسه خطوط ریلی را پایش می‌کند که تجمیع و ساخت یک بانک داده از شبکهٔ ریلی پس از پاک‌سازی اطلاعات برداشت شده، امکان پذیر خواهد بود. صدیقی و شفاهی (۱۳۹۸) تشکیل پایگاه داده ماشین EM120 و الگوریتم‌های پاکسازی داده‌ها، همچنین نحوهٔ استخراج پارامترهای مورد نیاز را بیان کردند. همچنین رودریگز و تکسیرا[4] (۲۰۲۲) و نوهولد، ویدوویچ و مارشنیگ[5] (۲۰۲۰) کلیه مراحل تشکیل پایگاه داده و استخراج پارامترهای مورد نیاز تصمیم‌گیری نت خطوط ریلی را به‌ترتیب برای شبکه راه‌آهن پرتغال و اتریش بیان کردند.
- عملیات پیشگیرانه i طی مراحل زیر اجرا می‌شود:

بازرسی: عملیات بازرسی و نگهداری و تعمیرات معمولی[6] به‌صورت دوره‌ای انجام می‌شود. این فعالیت‌ها شامل انواع بازرسی‌های مکانیزه، بازدید خط، گریس‌کاری، سرویس/تمیزکاری، آچارکشی، تعویض ادوات شکسته و تنظیم است. زمان اجرای فعالیت‌ها نسبتاً کوتاه و بدون نیاز به مسدود کردن خطوط است. قطعات خط پس از اجرای این عملیات از نظر شاخص کیفیت در وضعیت همانند قبل[7] باقی می‌مانند و هزینه اجرای این عملیات در مدل‌های نت در نظر گرفته نمی‌شود.

عملیات زیرکوبی $(i = ۱)$: زیرکوبی به‌عنوان متداول‌ترین فعالیت در برطرف کردن خرابی‌های خط به‌عنوان یک فعالیت تعمیری پیشگیرانه در نظر گرفته شده است. اجرای این عملیات توسط ماشین‌های زیرکوب انجام می‌شود که ضمن اصلاح خرابی‌های خط، با افزایش پایداری خط و ایجاد تکیه‌گاه بهتر برای ریل و تراورس، ضربه زدن به جوش هنگام عبور ناوگان را کاهش می‌دهد. این فعالیت قطعه را به حالت همانند نو[8] بازنمی‌گرداند ولی موجب کاهش نرخ وقوع خرابی‌های تصادفی خواهد شد.

1. Track Geometry Index (TGI)
2. The European Committee for Standardization
3. Track recording car
4. Rodrigues & Teixeira
5. Neuhold, Vidovic & Marschnig
6. Routine Maintenance
7. As-bad-as-old
8. As-good-as-new

عملیات تعویض بالاست $(i = ۲)$: نوسازی بالاست یکی از فعالیت‌های پُرهزینه و زمان‌بر نت خطوط ریلی است که وضعیت سیستم را همانند نو ارتقا می‌دهد. عملیات زیرکوبی ضمن اصلاح خرابی‌های خط، یک فعالیت تعمیراتی مخرب است؛ زیرا موجب افزایش نرخ زوال خط می‌شود (سلیمانی میگونی و همکاران، ۲۰۱۶). در واقع تکرر اجرای زیرکوبی روی قطعات خط، دانه‌بندی استاندارد لایه بالاست را تغییر می‌دهد و به کاهش ظرفیت باربری، افزایش آلودگی بالاست، همچنین افزایش مدول خط منجر می‌شود که در نهایت تعویض لایه بالاست به‌صرفه خواهد شد. در هر دوره، تنها امکان تخصیص یکی از عملیات i روی هر قطعه وجود دارد و فرض شده است که فعالیت تخصیص داده شده در پایان هر دوره، روی قطعات اجرا خواهد شد.

- پیش‌بینی زوال شاخص کیفیت خطوط در هر دوره به‌صورت خطی و با نرخ زوال ثابت برای هر قطعه درنظر گرفته شده است.
- مقدار بازیابی شاخص پس از اجرای زیرکوبی، مطابق نظر دفتر تحقیقات و آزمایش‌های اتحادیهٔ بین‌المللی راه‌آهن[1] (۱۹۸۸) به‌صورت وابسته از روی مقدار شاخص هندسی خط قابل محاسبه خواهد بود. همچنین تأثیر مخرب زیرکوبی، به‌صورت یک افزایش پله‌ای روی نرخ زوال مدل شده است (گوستاوسون، ۲۰۱۵).
- فرایند شکست جوش‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین خرابی تصادفی در خطوط، دارای توزیع پواسون ناهمگن برای هر قطعه فرض شده است که دارای نرخ وقوع خرابی در زمان $t > ۰$ به‌صورت زیر است (هوانگ، فنگ و ویجاوا[2]، ۲۰۲۲):

رابطهٔ ۱) :پارامتر شکل قطعه $f_i(t) = \lambda_j \beta_j t^{\beta_j - 1}$

در این رابطه، λ_j: پارامتر مقیاس قطعه j و β_j پارامتر شکل قطعه j است.

- با تعریف سن مؤثر قطعه، فعالیت‌های پیشگیرانه سن مؤثر قطعه و میزان وقوع خرابی را کاهش می‌دهد. بنابراین، یک ضریب کاهنده برای عملیات اجرا می‌شود، روی سن اثر می‌گذارد و بهبود حاصل از انجام عملیات را با کاهش سن قطعه، مدل می‌کند.
- با توجه به ماهیت بازگشتی محاسبه شاخص، فرض شده است که در دورهٔ قبل از شروع برنامه‌ریزی، هیچ‌گونه عملیات نت روی خطوط انجام نگرفته است.

مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی

مدل پیشنهادی ارائه شده، با هدف حداقل کردن مجموع کل هزینه‌های اجرای عملیات نت، هزینه‌های مسدودی خط و هزینه‌های اصلاح خرابی‌های تصادفی، به تخصیص بهینه عملیات پیشگیرانه می‌پردازد. شرح پارامترها و سایر نمادهای به‌کار رفته در مدل، در جدول ۱ آمده است.

1. Office for Research and Experiments (ORE), part of the International Union of Railways (UIC)
2. Huang, Fang & Wijaya

جدول ۱. نمادهای به‌کار رفته در مدل ریاضی

مجموعه‌ها	
i	شاخص عملیات پیشگیرانه: $i = \{1,2\}$
j	شاخص شماره قطعات خط: $j = \{1,\dots,N\}$
t	شاخص دوره برنامه‌ریزی: $t = \{1,\dots,T\}$
پارامترها	
$C_{i,t}$	هزینه اجرای عملیات i در دوره t
CM	هزینه اصلاح/ جریمه خرابی‌های تصادفی
$PC_{j,t}$	هزینه واحد زمان مسدود کردن قطعه j از خط در دوره t
$Cap_{i,t}$	ظرفیت اجرای عملیات i در دوره t برحسب واحد طول خط
to_i	زمان لازم برای اجرای عملیات i (از صدور تا ابطال مجوز انجام کار)
tc	زمان لازم برای اصلاح خرابی تصادفی (از صدور تا ابطال مجوز انجام کار)
tp	گام دوره‌های برنامه‌ریزی
sl	طول قطعات خط
MGT_t	میلیون تن بار ناخالص عبوری در دوره t
$MGT^{initial}$	میلیون تن بار ناخالص عبوری تجمعی (در ابتدای برنامه‌ریزی)
Bud	حداکثر بودجه نت در دسترس برای کل دوره برنامه‌ریزی
λ_j	پارامتر مقیاس قطعه j
β_j	پارامتر شکل قطعه j
P	افزایش نرخ زوال بعد از هر بار زیرکوبی
α_i	ضریب بهبود (کاهنده سن) عملیات i
A, B	پارامترهای رگرسیون
$\sigma_j^{initial}$	مقدار اولیه شاخص کیفیت خط قطعه j
σ_{new}	مقدار شاخص کیفیت خط نو (رواداری مجاز شاخص در تحویل خط نو)
σ_{all}	بیشترین مقدار مجاز شاخص کیفیت خط
$r_{j,new}$	نرخ زوال قطعه j پس از نوسازی بالاست
$r_j^{initial}$	مقدار اولیه نرخ زوال قطعه j(در ابتدای برنامه‌ریزی)
$E_j^{initial}$	مقدار اولیه سن مؤثر قطعه j (در ابتدای برنامه‌ریزی)
AV_{min}	حداقل دسترس‌پذیری مطلوب
R_{min}	حداقل قابلیت اطمینان مطلوب برای سیستم

متغیرهای تصمیم	
$O_{i,j,t}$	متغیر باینری: مقدار ۱ می‌گیرد اگر عملیات i بر قطعه j در زمان tاجرا شود. در غیر این صورت صفر.
$\sigma_{j,t}$	شاخص کیفیت خطوط برای قطعه jدر زمان t
$r_{j,t}$	نرخ زوال قطعه jدر زمان t
$rec_{j,t}$	بازیابی شاخص کیفیت خطوط برای قطعه j در زمان t
$S_{j,t}$	سن مؤثر قطعه j در ابتدای دوره t
$E_{j,t}$	سن مؤثر قطعه j در انتهای دوره t
$NF_{j,t}$	تعداد شکست‌های تصادفی در قطعه j در زمان t
$Rl_{j,t}$	قابلیت اطمینان قطعه j در زمان t
AV_t	دسترس‌پذیری شبکه در زمان t

روابط ریاضی مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

رابطهٔ ۲)
$$Min\ Z = \sum_i \sum_j \sum_t O_{i,j,t} C_{i,t} + \sum_i \sum_j \sum_t O_{i,j,t} to_i PC_{j,t} + CM \sum_j \sum_t NF_{j,t}$$

s.t.

رابطهٔ ۳)
$$\sum_i O_{i,j,0} = 0 \qquad \forall\, j$$

رابطهٔ ۴)
$$\sum_i O_{i,j,t} \le 1 \qquad \forall\, j\,, \forall\, t$$

رابطهٔ ۵)
$$sl. \sum_j O_{i,j,t} \le Cap_{i,t} \qquad \forall\, i\,, \forall\, t$$

رابطهٔ ۶)
$$\sum_i \sum_j \sum_t O_{i,j,t} C_{i,t} \le Bud$$

رابطهٔ ۷)
$$\sigma_{j,0} = \sigma_j^{initial} \qquad \forall\, j$$

رابطهٔ ۸)
$$\sigma_{j,t} = \left(1 - O_{2,j,t}\right)\left(\sigma_{j,t-1} + r_{j,t} - O_{1,j,t} rec_{j,t}\right) + O_{2,j,t}\sigma_{new} \qquad \forall\, j\,, \forall\, t$$

رابطهٔ ۹)
$$\sigma_{j,t} \le \sigma_{all} \qquad \forall\, j\,, \forall\, t$$

$$r_{j,0} = r_j^{initial} \qquad \forall j \qquad \text{رابطهٔ ۱۰)}$$

$$r_{j,t} = \left(1 - O_{2,j,t-1}\right)\left(r_{j,t-1}\frac{MGT_t}{MGT_{t-1}} + O_{1,j,t-1}P\right) + O_{2,j,t-1}r_{j,new} \qquad \forall j\,, \forall t \qquad \text{رابطهٔ ۱۱)}$$

$$rec_{j,t} = A\left(\sigma_{j,t-1} + r_{j,t}\right) + B \qquad \forall j\,, \forall t \qquad \text{رابطهٔ ۱۲)}$$

$$E_{j,0} = E_j^{initial} \qquad \forall j \qquad \text{رابطهٔ ۱۳)}$$

$$S_{j,t} = \left(1 - \sum_i O_{i,j,t-1} + \sum_i O_{i,j,t-1}\alpha_i\right)E_{j,t-1} \qquad \forall j\,, \forall t \qquad \text{رابطهٔ ۱۴)}$$

$$E_{j,t} = S_{j,t} + MGT_t \qquad \forall j\,, \forall t \qquad \text{رابطهٔ ۱۵)}$$

$$NF_{j,t} = \int_{S_{j,t}}^{E_{j,t}} f_j(t)dt = \lambda_j\left({E_{j,t}}^{\beta_j} - {S_{j,t}}^{\beta_j}\right) \qquad \forall j\,, \forall t \qquad \text{رابطهٔ ۱۶)}$$

$$Rl_{j,t} = exp\left(-(\int_{S_{j,t}}^{E_{j,t}} f_j(t)dt)/sl\right) = exp\left(-NF_{j,t}/sl\right) \qquad \forall j\,, \forall t \qquad \text{رابطهٔ ۱۷)}$$

$$RS_t \le Rl_{j,t} \qquad \forall j\,, \forall t \qquad \text{رابطهٔ ۱۸)}$$

$$RS_t \ge R_{min} \qquad \forall t \qquad \text{رابطهٔ ۱۹)}$$

$$AV_t = \frac{Planning\ Interval - CM\ Times - M\&R\ Times}{Planning\ Interval} \qquad \forall t \qquad \text{رابطهٔ ۲۰)}$$

$$AV_t \ge AV_{min} \qquad \forall t \qquad \text{رابطهٔ ۲۱)}$$

تابع هدف در رابطهٔ ۲ به‌صورت هزینهٔ کل عملیات نت در نظر گرفته شده است که شامل سه جمله است. جملهٔ اول هزینهٔ اجرای عملیات نت برنامه‌ریزی شده در طول دوره طرح است که در آن، پارامتر $C_{i,t}$ می‌تواند برای هر دوره، بنابر پیش‌بینی تورم مقداردهی شود. جملهٔ دوم هزینهٔ مسدودی خط را براساس عملیات برنامه‌ریزی شده محاسبه می‌کند. مقداردهی به پارامتر $\mathrm{PC}_{j,t}$ کاملاً تحت تأثیر سطح سرویس هدف و خط مشی شرکت بهره‌بردار است. همچنین با تنظیم آن در دوره‌های مختلف، می‌توان حجم تخصیص عملیات را در طول دوره طرح مدیریت کرد. جملهٔ آخر هزینهٔ اجرای

عملیات اصلاحی برای خرابی‌های تصادفی را محاسبه می‌کند. این هزینه از ضرب متوسط تعداد کل خرابی‌های تصادفی در دوره طرح در پارامتر CM محاسبه می‌شود که این پارامتر بنابر حساسیت شکست‌های تصادفی، می‌تواند هزینهٔ اصلاح یا جریمه درنظر گرفته شود.

رابطهٔ ۳ با حفظ کلیت مسئله، فرض می‌کند که در $t = 0$ هیچ‌کدام از عملیات i روی قطعات j انجام نشده است. از طرفی رابطهٔ ۴ تضمین می‌کند که در هر دوره و روی هر قطعه تنها یکی از عملیات i اجرا شود. رابطهٔ ۵ محدودیتی را تحت عنوان ظرفیت اجرای هرکدام از عملیات i در هر دوره t در نظر می‌گیرد. ظرفیت اجرا وابسته به تعداد ماشین‌آلات و نیروهای اجرایی آماده به‌کار است و هرگونه کاهش یا افزایش در توان اجرایی، به‌علت برنامهٔ نت ماشین‌آلات یا قراردادهای پیمانکاری با این محدودیت قابل انعکاس است. رابطهٔ ۶ اطمینان حاصل می‌کند که در طول دوره برنامه‌ریزی هزینهٔ انجام عملیات نت از حداکثر بودجه قابل استحصال تجاوز نکند. با توجه به وجود قیود برای ظرفیت اجرایی در هر دوره، همچنین هزینه‌های متغیر اجرای عملیات در هر دوره، قیود بودجه نباید برای هر دوره اعمال شود. البته پس از انجام برنامه‌ریزی، مدل پیشنهادی قادر خواهد بود متوسط بودجه مورد نیاز برای هر دوره را تخمین بزند.

از آنجا که پیش‌بینی شاخص کیفیت خطوط در هر دوره از روی مقدار شاخص در دوره قبلی و به‌صورت وابسته به عملیاتی که قبلاً روی قطعه اجرا شده است، محاسبه می‌شود. رابطهٔ ۷ مقدار اولیه این شاخص در ابتدای دوره برنامه‌ریزی را تنظیم می‌کند و رابطهٔ ۸ به پیش‌بینی مقدار شاخص در هر دوره می‌پردازد. در صورتی که هیچ عملیاتی روی خطوط انجام نشود، مقدار شاخص به اندازه نرخ زوال قطعه در آن زمان افزوده می‌شود. اگر عملیات زیرکوبی تخصیص داده شود، مقدار شاخص به اندازه متغیر بازیابی، بهبود می‌یابد و در صورت اجرای عملیات نوسازی بالاست، لازم است به یک مقدار نو بازگردانیده شود. از طرفی رابطهٔ ۹ تضمین می‌کند که مقدار شاخص در هر دوره از حد مجاز فراتر نرود. در رابطهٔ ۱۰ مقدار اولیه نرخ زوال در ابتدای دوره برنامه‌ریزی تنظیم می‌شود و رابطهٔ ۱۱ به پیش‌بینی مقدار نرخ زوال در هر دوره، براساس عملیات انجام شده در دوره قبل می‌پردازد. نرخ زوال در صورت اجرای زیرکوبی بایستی افزایش پیدا کند و با اجرای نوسازی بالاست، به یک مقدار اولیه بازگردانیده شود. رابطهٔ ۱۲ مقدار بازیابی ایجاد شده در شاخص، طی انجام زیرکوبی را براساس مدل پیشنهادی دفتر تحقیقات و آزمایش‌های اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن (۱۹۸۸) محاسبه می‌کند.

روابط مربوط به پیش‌بینی و بازیابی شاخص کیفیت خط از دو نظر نسبت به مدل دادو و همکاران (۲۰۲۰) بهبود دارد. اول آنکه مقدار نرخ زوال در هر دوره متغیر درنظر گرفته شده و افزایش آن در اثر انجام عملیات زیرکوبی در مدل‌سازی وارد شده است. ثانیاً تغییرات بار عبوری از خطوط در هر دوره و تأثیر آن روی متغیرها در نظر گرفته شده است. این تغییرات ضمن ایجاد انعطاف لازم برای تطبیق با شرایط صنعت، به نزدیک‌تر شدن مدل‌سازی به واقعیت منجر شده است.

تغییر در شدت وقوع خرابی توسط یک فرایند پواسون ناهمگن مدل می‌شود (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۲). هر قطعه از خط در هر دوره دارای سن ابتدا و انتهای دوره است. رابطهٔ ۱۳ مقدار اولیه سن قطعات را در ابتدای هر دوره تنظیم می‌کند. اگر عملیاتی روی قطعات انجام نشود، سن ابتدای دوره برابر با سن انتهای دوره قبل خواهد بود ولی در صورت انجام عملیات پیشگیرانه، جوان‌سازی سن اتفاق می‌افتد که براساس ضریب کاهنده α_i مطابق رابطهٔ ۱۴ سن ابتدای دوره

به‌دست می‌آید. اختلاف بین سن ابتدای دوره و انتهای دوره همواره برابر با تناژ ناخالص عبوری[1] معین از خط در آن دوره است که با توجه به ماهنامه‌های منتشر شده راه‌آهن قابل احصا بوده و در رابطهٔ ۱۵ بیان شده است.

متوسط تعداد خرابی‌های تصادفی در هر دوره و برای هر قطعه در فرایند پواسون ناهمگن، از رابطهٔ ۱۶ به‌دست می‌آید. قابلیت اطمینان هر قطعه مطابق استاندارد EN-50126 به‌عنوان احتمال اینکه قطعه مورد نظر قادر به انجام عملکرد مطلوب در شرایط خاص و در یک بازه زمانی دل‌خواه باشد، تعریف می‌شود. بنابراین تعریف قابلیت اطمینان برای قطعه j در زمان t با اقتباس از پژوهش کامل و همکاران (۲۰۲۰)، مطابق رابطهٔ ۱۷ است. در یک مسیر مستقیم، قطعات خط یک سیستم سری را تشکیل می‌دهند به این صورت که با ایجاد اختلال در هر قطعه، کل شبکه مسدود می‌شود. بنابراین قابلیت اطمینان سیستم در زمان t برابر با حداقل قابلیت اطمینان قطعات در زمان t خواهد بود که این موضوع در رابطهٔ ۱۸ تعیین شده است (کمیته استانداردسازی اروپا، ۱۹۹۹). همچنین طبق رابطهٔ ۱۹ مقدار قابلیت اطمینان سیستم در هر زمان بایستی از حداقل مطلوب بزرگ‌تر باشد. علاوه‌براین دسترس‌پذیری، مطابق استاندارد EN-50126 براساس توانایی یک قطعه برای انجام وظیفه خود در یک شرایط خاص در یک دوره زمانی دل‌خواه تعریف می‌شود، درحالی‌که منابع خارجی لازم فراهم باشد (کمیته استانداردسازی اروپا، ۱۹۹۹). زمان اجرای هرکدام از عملیات نت و زمان برطرف کردن خرابی‌های تصادفی روی دسترس‌پذیری سیستم مؤثر است. رابطهٔ ۲۰ با اقتباس از پژوهش کامل و همکاران (۲۰۲۰)، دسترس‌پذیری شبکه در هر لحظه با استفاده از زمان‌های مسدودی خط محاسبه می‌شود که مطابق رابطهٔ ۲۱ بایستی از حداقل مطلوب بزرگ‌تر باشد.

روش حل

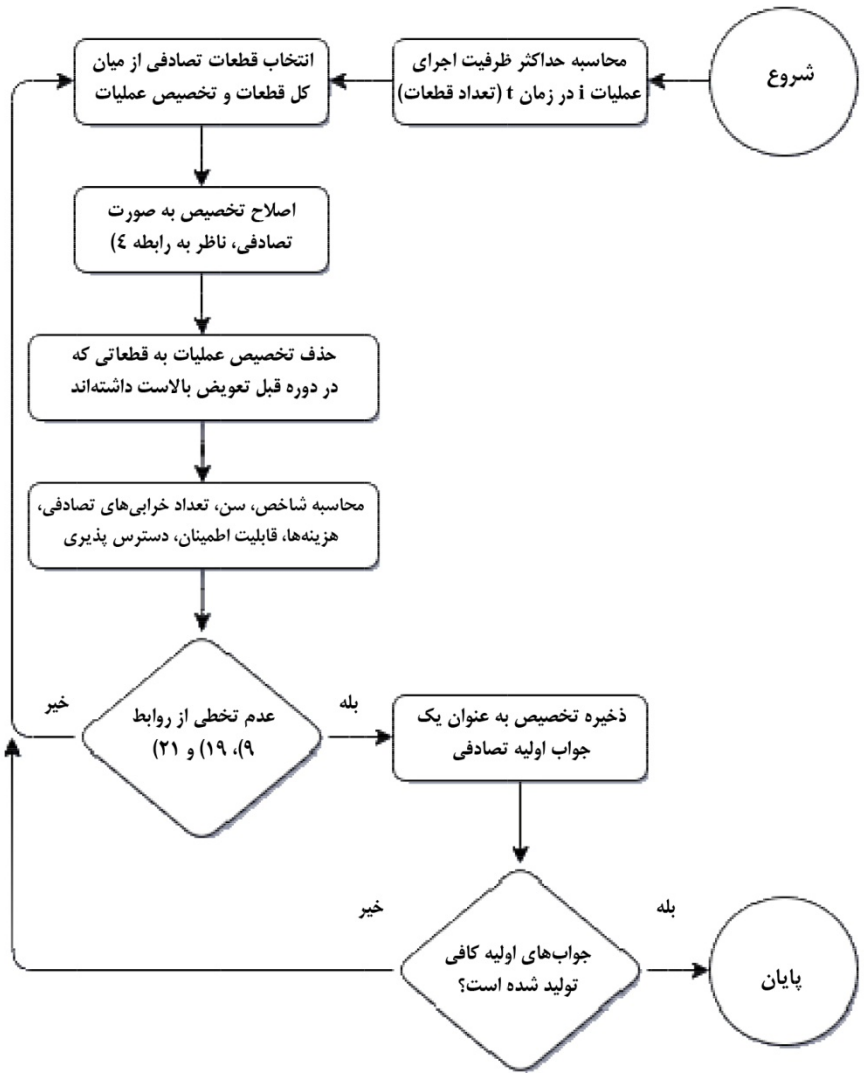
بنا به رفتار بازگشتی، پیچیدگی و غیرخطی بودن مدل، روش‌های دقیق حل مسئله کارا نیستند و لازم است الگوریتم فراابتکاری مناسب برای حل مسایل با اندازهٔ بزرگ توسعه داده شود. الگوریتم ژنتیک توسط هالند در سال۱۹۷۱، به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های تکاملی با الهام از علم زیست شناسی، ارائه شد (سیوانانداندام و دپا[2]، ۲۰۰۸). این الگوریتم با داشتن مجموعه‌ای از جواب‌های موجه شروع می‌شود که به هرجواب یک کروموزوم و به مجموعه مذکور جمعیت اولیه گفته می‌شود. دستیابی به جواب‌های اولیه به‌صورت تصادفی یا بر اساس یک الگوریتم ابتکاری ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک شامل عملگرهای تقاطع و جهش برروی کروموزوم‌های موجود، کروموزوم‌های جدیدی ایجاد می‌شود. جمعیت جدید با کروموزوم‌های بهتر به‌روزرسانی شده و این کار تا زمان برقرار شرایط توقف ادامه می‌یابد (اسماعیلیان، جعفرنژاد و جبلی، ۱۳۹۲).

نمایش کروموزوم و الگوریتم ابتکاری برای تولید جواب اولیه

شکل ۲ فلوچارت الگوریتم ابتکاری تولید جواب اولیه تصادفی را نشان داده است. هر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک معادل یک جواب برای مسئله مورد نظر است. در مدل پیشنهادی، با هر تخصیص عملیات، امکان بررسی کلیه قیود فراهم

1. Million Gross Tonnage (MGT)
2. Sivanandam & Deepa

می‌شود و در صورت موجه بودن، یک برنامه‌ریزی عملیات نت به‌دست آمده است. بنابراین برای نمایش کروموزوم از یک ماتریس سه بُعدی $O_{i,j,t}$ با ارائه‌های باینری استفاده شده است. به‌طور مثال اگر درایه i و j و t برابر یک باشد؛ بـه ایـن معناست که تخصیص عملیات i را بر قطعه j و در زمان t داشته‌ایم و در صورت صفر بودن، به معنـای عـدم تخصـیص عملیات است.



شکل ۲. الگوریتم ابتکاری برای تولید جواب‌های اولیه تصادفی

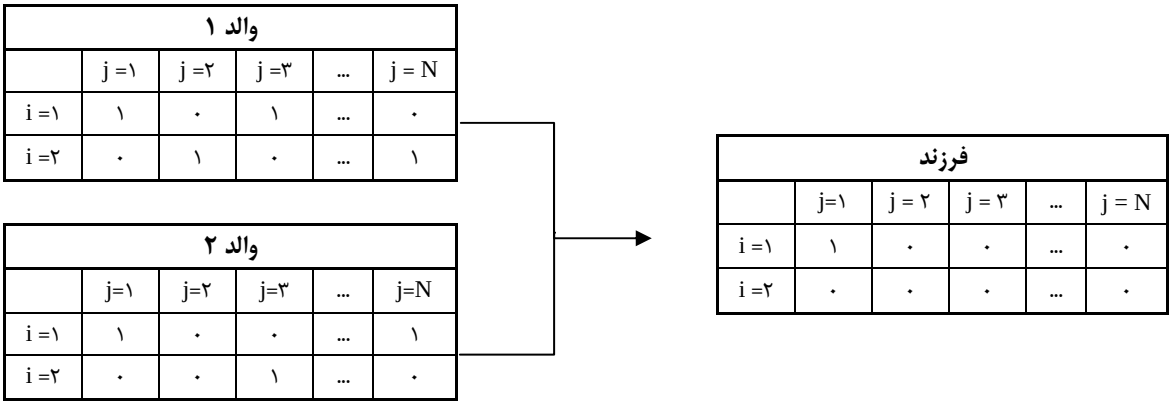
برای تولید جواب اولیه یک روش ابتکاری توسعه داده شده است. در هر زمان t، حداکثر تعداد قطعـاتی کـه امکـان تخصیص عملیات i روی آن‌ها ممکن است، از تقسیم $\mathrm{cap}_{i,t}$ بر sl قابل محاسـبه اسـت. بـه‌منظـور اسـتفاده از حـداکثر ظرفیت اجرایی ممکن، این تعداد از میان کل قطعات j به تصادف انتخـاب شـده و تخصـیص عملیـات بـه آن‌هـا انجـام می‌شود. البته با توجه به رابطهٔ ۳، لازم است در هر زمان حداکثر یکی از عملیات i به قطعـه j تخصـیص داده شـود کـه ممکن است با توجه به انتخاب تصادفی قطعات، این مورد رعایت نشود. بنابراین در یک حلقه اگر مواردی این محـدودیت را نقض کند، تخصیص به‌صورت تصادفی، فقط یه یکی از عملیات i داده خواهد شد و مابقی مقدار صفر خواهند گرفت. از

طرفی، در صورتی که روی یکی از قطعات، عملیات تعویض بالاست انجام شود، مشخص است که حداقل تا چند دوره بعدی نیازی به تکرار این عملیات و حتی عملیات زیرکوبی نخواهد بود. بنابراین در صورت تخصیص این عملیات در یک دوره، روی آن قطعه در دوره بعدی عملیاتی تخصیص داده نخواهد شد. به این ترتیب یک تخصیص اولیه و تصادفی که روابط ۳ و ۵ در آن‌ها رعایت شده، به‌دست می‌آید. با مشخص بودن تخصیص عملیات در کل دوره طرح، امکان محاسبه مقادیر سن ابتدای دوره، سن انتهای دوره، نرخ زوال، مقدار بازیابی و درنهایت مقدار شاخص کیفیت خط در هر دوره زمانی وجود خواهد داشت. همچنین با مشخص شدن متوسط تعداد خرابی‌های تصادفی، قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری و هزینه اصلاح خرابی‌های تصادفی، مقدار تابع هدف مشخص خواهد شد. برای موجه بودن جواب موجود، لازم است مقدار مجاز شاخص کیفیت خط، قابلیت اطمینان سیستم و دسترس‌پذیری شبکه در هر دوره بررسی شود. با توجه به تخصیص حداکثری عملیات در این جواب قید بودجه در این مرحله نقض خواهد شد که بررسی آن در تولید جواب‌های اولیه در نظر گرفته نمی‌شود. از بین جواب‌های تصادفی تولید شده، آن‌هایی که تخطی از قیود مذکور را ندارند، جواب موجه هستند و لازم است فرایند تولید جواب‌های تصادفی تا زمان تکمیل جمعیت اولیه ادامه پیدا کند.

مکانیزم انتخاب و ساختار روش‌های تقاطع و جهش

مکانیزم انتخاب در این پژوهش چرخهٔ رولت است. در این روش کروموزم‌هایی که مقدار تابع هدف کمتری داشته باشند، احتمال انتخاب بیشتری خواهند داشت. (یونس‌پور، اسماعیلیان و کیانفر، ۱۴۰۲). برای هر مرحله تقاطع دو والد توسط چرخهٔ رولت انتخاب می‌شود. دو عملگر تقاطع مختلف برای الگوریتم در نظر گرفته شده است که در هر مرحله یکی از آن‌ها به تصادف انتخاب می‌شود.

عملگر تقاطع ۱: از ضرب نظیر به نظیر درایه‌های دو والد، کروموزوم جدید حاصل می‌شود. اگر برای زمان t دو والد مطابق شکل ۳ انتخاب شوند، نحوه تولید فرزند جدید مشخص شده است.



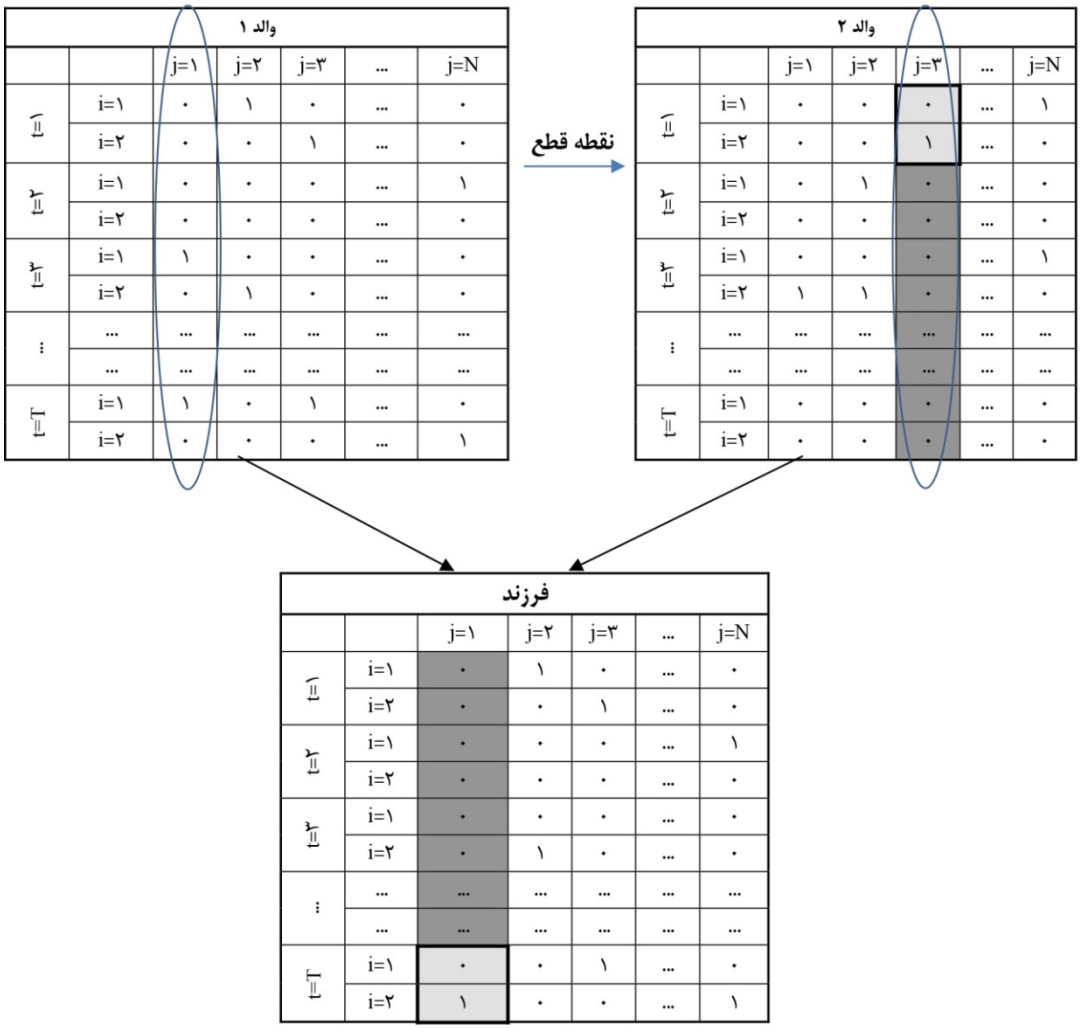
شکل ۳. عملگر تقاطع شماره ۱

عملگر تقاطع ۲: ابتدا از هر والد یک قطعه به تصادف انتخاب می‌شود. همچنین یک نقطه قطع در بازه دوره طرح روی والد دوم به تصادف انتخاب می‌شود. تخصیص قطعه منتخب از والد دوم از محل قطع بریده شده و قسمت اول به انتهای قسمت دوم چسبانیده شده تا تخصیص جدید به‌دست آید. تخصیص جدید حاصل به قطعه منتخب از والد اول اختصاص

داده شده و بدین ترتیب فرزند جدید تولید می‌شود. در شکل ۴ کروموزوم مربوط به قسمت‌هایی از دو والد نشان داده شده است. قطعهٔ اول از والد یک و قطعه سوم از والد دو به تصادف انتخاب شده است. همچنین نقطه قطع روی والد دوم به‌صورت $t = ۱$ انتخاب شده است. تخصیص قطعه سوم از محل قطع جدا شده و نیمه اول به انتهای نیمه دوم چسبانیده می‌شود و سپس تخصیص جدید به قطعه اول از والد یک اختصاص می‌یابد. بنابراین فرزند جدید مطابق شکل ۴ حاصل می‌شود.

همچنین دو نوع عملگر جهش نیز برای الگوریتم ژنتیک درنظر گرفته شده است که در هر مرحله پس از انتخاب یک والد توسط چرخهٔ رولت، یکی از آن‌ها به تصادف انتخاب می‌شود.

عملگر جهش ۱: به اندازه حاصل ضرب نرخ جهش در تعداد کل ژن‌ها، از هر کروموزوم به‌صورت تصادفی انتخاب شده و مقدار آن‌ها برابر صفر منظور می‌شود. به‌طور مثال اگر برنامه‌ریزی برای ۵ قطعه در ۳ دوره زمانی مد نظر باشد هر کروموزوم به‌صورت یک ماتریس $[O]_{2\times5\times3}$، شامل ۳۰ ژن خواهد بود. اگر نرخ جهش برابر ۱۰ درصد باشد، تعداد ۳ عدد از ژن‌ها به‌صورت تصادفی انتخاب و مقدار صفر خواهند گرفت.



شکل ٤. عملگر تقاطع شماره ۲

عملگر جهش ۲: در این عملگر ابتدا توسط الگوریتم ابتکاری تولید جواب‌های اولیه، یک جواب ایجاد می‌شود. سپس تخصیص یک قطعه تصادفی از والد با تخصیص متناظر از جواب تولید شده جایگزین می‌شود. در مثال بالا اگر از میان ۵ قطعه، قطعه چهارم به‌صورت تصادفی انتخاب شود، تخصیص متناظر در جواب تولید شده برای این قطعه، با تخصیص قبلی جایگزین می‌شود.

شرط توقف الگوریتم

در هر مرحله برای محاسبه مقدار تابع هدف برای هر جواب، به تعداد تخطی از قیود در طول دوره برنامه‌ریزی، به اندازه مقدار بودجه نت، به مقدار تابع هدف به‌عنوان جریمه اضافه خواهد شد. در هر تکرار جواب‌های جدیدی که از طریق عملگرهای تقاطع و جهش تولید شده‌اند با جواب‌های اولیه ترکیب شده و به اندازه جمعیت اولیه از بهترین جواب‌ها نگه‌داشته می‌شوند. شرط توقف الگوریتم تعداد تکرار مشخصی در نظر گرفته شده است.

مطالعه موردی و داده‌ها

به‌منظور نشان دادن اثربخشی رویکرد پیشنهادی، کاربرد آن برای یک کیلومتر از شبکهٔ ریلی ایران در ناحیه راه‌آهن اراک، بین ایستگاه‌های مؤمن‌آباد و ازنا مورد بحث و ارزیابی قرار گرفت. در اینجا یک خط بالاستی با عرض خط استاندارد، ریل UIC60 و تراورس بتنی B70 موجود است که شیب خط در این بلوک عمدتاً کمتر از ۰/۷ درصد و در یک مسیر مستقیم است. این بلوک در یک خط اصلی مورد استفاده برای قطارهای مسافری و باری قرار دارد. بار عبوری سالانه حدود ۴ میلیون تن ناخالص و حداکثر سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت است. دوره‌های برنامه‌ریزی در این مطالعه سه ماهه در نظر گرفته شده، بنابراین مقدار tp معادل ۲۱۹۶ ساعت خواهد بود. همچنین مقادیر MGT_0 و MGT_t برای همه دوره‌ها معادل ۱ میلیون تن فرض شده است. با در نظر گرفتن قطعات ثابت ۱۰۰ متری، وضعیت شاخص هندسی اولیه براساس آخرین برداشت (آبان ماه ۱۴۰۱) و پارامترهایی مانند نرخ زوال اولیه، پارامترهای توزیع شکست جوش‌ها در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. پارامترهای ورودی مدل مربوط به قطعات خط

قطعه j	$\sigma_j^{initial}$	$r_j^{initial}$	$r_{j,new}$	λ_j	β_j	$E_j^{initial}$
۱	۱/۰۳۵	۰/۲۶۹	۰/۱۳	۰/۱۲۴۴۱۶	۱/۵۰۳	۳۰
۲	۰/۹۱۶	۰/۲۶۵	۰/۱۶	۰/۰۸۶۴۵۲	۱/۴۸۶	۳۰
۳	۱/۱۵۹	۰/۳۰۳	۰/۱۶	۰/۰۶۰۴۸۲	۱/۴۷۷	۳۰
۴	۱/۰۹۰	۰/۲۸۸	۰/۱۶	۰/۱۶۷۶۱۶	۱/۴۴۴	۳۰
۵	۱/۱۵۹	۰/۲۵۵	۰/۱۴	۰/۱۳۴۷۸۴	۱/۳۳۲	۳۰
۶	۱/۰۶۱	۰/۲۷۳	۰/۱۳	۰/۱۳۸۲۴۶	۱/۴۲۸	۳۰
۷	۱/۱۶۵	۰/۳۳۱	۰/۱۷	۰/۰۵۵۱۲۳	۱/۵۱۳	۳۰
۸	۱/۰۶۲	۰/۳۱۲	۰/۱۵	۰/۱۵۸۹۷۶	۱/۴۳۵	۳۰
۹	۱/۲۵۴	۰/۳۴۱	۰/۱۴	۰/۰۵۸۷۵۲	۱/۴۲۱	۳۰
۱۰	۱/۲۴۰	۰/۳۲۸	۰/۱۴	۰/۰۸۲۹۴۴	۱/۴۷۴	۳۰

مقدار پارامتر σ_{new} معادل رواداری مجاز برای تحویل خطوط نوساز است که طبق نشریه ۳۰۱ سازمان برنامه و بودجه برابر ۰/۱ لحاظ شده است (مشخصات فنی عمومی روسازی راه‌آهن، ۱۴۰۱). همچنین مقدار σ_{all} براساس استاندارد EN13848-5 برای خطوط با سرعت بین ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتر برساعت بین ۱/۸ تا ۲/۷ توصیه شده است که در این مدل مقدار ۲ در نظر گرفته شده است (کمیته استانداردسازی اروپا، ۲۰۱۷). پارامترهای رگرسیونی A و B در رابطهٔ ۱۱، به‌ترتیب ۰/۴۲۵۷ و صفر به‌دست آمد. پارامتر AV_{min} برابر ۰/۹۵ و پارامتر R_{min} برابر ۰/۹ در نظر گرفته شد. در این مسئله برنامه‌ریزی برای دو سال، معادل هشت دوره سه ماهه، در نظر گرفته شده است.

در خصوص مقداردهی به پارامترهای هزینه، هزینه‌های زیرکوبی و تعویض بالاست یک قطعه به طول ۱۰۰ متر مطابق ردیف‌های فهرست بهای واحد پایه رشته راه، راه‌آهن و باند فرودگاه (۱۴۰۳) به‌ترتیب ۲۶/۴ و ۱۶۷/۲ میلیون تومان به‌دست آمده است که با لحاظ ضریب ۰/۷۵ درصد به‌عنوان تورم هر دوره، به‌صورت جدول ۳ خواهد بود.

جدول ۳. پارامترهای هزینه انجام عملیات نت

$C_{i,t}$	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
۱	۲۶/۴	۲۶/۶	۲۶/۸	۲۷/۰	۲۷/۲	۲۷/۴	۲۷/۶	۲۷/۸
۲	۱۶۷/۲	۱۶۸/۵	۱۶۹/۷	۱۷۱/۱	۱۷۲/۳	۱۷۳/۶	۱۷۴/۹	۱۷۶/۲

هزینه زیرکوبی شامل رلواژ نهایی با زیرکوب ۰۹، رگلاژ شیروانی بالاست با خط آرا و تثبیت خط، توسط ماشین پایدارساز است. همچنین هزینه مربوط به تعویض بالاست شامل تهیه بالاست از سنگ کوهی، حمل مصالح بالاست از محل تولید، بارگیری خط بسته، تخلیه و نصب خط به روش منقطع با جرثقیل ریلی، تنظیم درز و بستن اتصالی، تسطیح با خط آرا و رلواژ اول و دوم با زیرکوب ۰۸ و رلواژ نهایی با زیرکوب ۰۹، رگلاژ شیروانی بالاست با خط آرا و تثبیت خط، توسط ماشین پایدارساز است. در طول دوره برنامه‌ریزی مقدار بودجه جهت اجرای عملیات نت معادل ۱۷۴۰ میلیون تومان در نظر گرفته شده است.

ظرفیت اجرای هرکدام از این عملیات در هر دوره برنامه‌ریزی از پارامترهایی است که می‌تواند براساس در دسترس بودن ماشین‌آلات و قراردادهای پیمانکاری مقداردهی شود. همچنین می‌تواند براساس برنامه نت ماشین‌آلات مورد استفاده مقداردهی شود. در این مسئله کلیه مقادیر $cap_{i,t}$ برابر ۵۰۰ متر فرض شده است. همچنین زمان مسدودی خط برای اجرای هرکدام از عملیات براساس ماشین‌آلات و تکنولوژی موجود، to_i، به‌ترتیب ۱ ساعت و ۶ ساعت در نظر گرفته شده است که این زمان از صدور تا ابطال مجوز انجام کار است. پارامتر α_i به‌ترتیب ۰/۵ و ۰/۲۵ برای عملیات زیرکوبی و تعویض بالاست برآورد شده است. با بررسی داده‌های گذشته و بررسی تاریخچه عملیات اجرا شده مقدار پارامتر P برابر ۰/۲ در نظر گرفته شد.

مقداردهی به هزینه مسدودی خط، کاملاً به استراتژی مدیریت بهره‌برداری خطوط ریلی وابسته است و می‌تواند مقادیر متنوعی اتخاذ کند. در واقع هرچقدر حساسیت زمان مسافران و اهمیت تحویل به موقع بارها بیشتر باشد، این پارامتر مقدار واقعی‌تری خواهد داشت. به‌عنوان یک حد بالا برای این پارامتر می‌توان کلیه قطارهای عبوری از این خط را

مسافری درنظر گرفت. با فرض قطارهای ۱۵ واگنی که هر واگن شامل ۱۰ کوپه ۴ نفری و ۴ محور ۲۰ تنی باشد، عبور هر قطار معادل ۱۲۰۰ تن و شامل ۶۰۰ نفر مسافر خواهد بود. با توجه به مقدار ۱ میلیون تناژ عبوری ناخالص در هر دوره، بنابراین به‌طور متوسط در هر ساعت بایستی ۰/۳۸ قطار عبور کند. اگر هزینهٔ هر نفر ـ ساعت ۱۰۰ هزارتومان در نظر گرفته شود، هزینهٔ مسدودی خط برای هر ساعت معادل ۲۲/۸ میلیون تومان خواهد بود. این هزینه می‌تواند برگشت مبلغ بلیط به مسافر نیز در نظر گرفته شود. همچنین در خصوص بارها هزینه هر ساعت تاخیر مطابق بند جریمه در قرارداد فی‌مابین در نظر گرفته شود (نجات‌نیا، ماکوئی و جبارزاده، ۱۴۰۲). مقدار این پارامتر برای قطعات مختلف خط متفاوت است که این امکان را فراهم می‌کند تا قطعات مهم‌تر خطوط، هزینه مسدودی بیشتری داشته باشند. همچنین در دوره‌های مختلف براساس تغییرات تقاضا و تفاوت در مقداردهی به این پارامتر می‌توان عملیات پیشگیرانه را به دوره‌های کم تقاضا مدیریت کرد. در این مسئله برای کلیه قطعات در همه زمان‌ها پارامتر $PC_{j,t}$، مقدار ۲۲/۸ میلیون تومان بر ساعت لحاظ شده است.

هر شکست ریل به‌عنوان خرابی تصادفی نیاز به ۴ ساعت زمان برای اصلاح دارد که هزینه آن براساس فهرست بهای واحد پایه رشته راه، راه‌آهن و باند فرودگاه (۱۴۰۳) معادل ۵ میلیون تومان محاسبه شده است. این اصلاح شامل اجرای عملیات جوشکاری ریل با جوش ترمیت، روزنی، بغل‌زنی و تنش‌زدایی جوش طویل به همراه تست التراسونیک است. البته می‌توان به‌عنوان جریمه، مقدار پارامتر CM را بیشتر از هزینه اصلاح خرابی نیز در گرفت.

یافته‌های پژوهش

از مدل ریاضی پیشنهادی برای دستیابی به یک برنامه نت پیشگیرانه در مطالعه موردی استفاده شد. برای حل مدل، کد الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB (R2015a) روی کامپیوتر لپ تاپ (Intel/Core i7- 4710HQ CPU ، ۲/۵ گیگاهرتز و ۱۶ گیگابایت رم) نوشته شد. برای ابعاد مسئله به‌صورت J = ۱۰ و T = ۸، هر کروموزوم به فرم $[O]_{2,10,8}$ با تعداد ۱۶۰ ژن، معادل یک تخصیص و یک جواب خواهد بود. در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، پس از بررسی حالت‌های متعدد مقادیر پارامترهای الگوریتم برای دستیابی به جواب بهینه، تعداد ۲۰۰ تکرار، اندازه جمعیت ۱۰۰، اندازه تقاطع ۱۰۰ اندازه جهش ۱۵۰ و نرخ جهش ۰/۰۳ تنظیم شد.

جدول ٤. برنامه عملیات نت پیشگیرانه براساس الگوریتم ژنتیک

	j = ۱	j = ۲	j = ۳	j = ٤	j = ٥	j = ٦	j = ۷	j = ۸	j = ۹	j = ۱۰
t = ۱	N	N	N	N	N	N	**R**	N	**R**	**R**
t = ۲	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
t = ۳	N	N	**M**	N	N	N	N	**M**	N	N
t = ۴	**M**	N	N	**M**	**M**	**M**	N	N	N	N
t = ۵	N	**M**	**M**	N	N	N	N	**M**	N	N
t = ۶	**M**	N	N	**M**	**M**	**M**	N	N	N	N
t = ۷	**M**	**M**	**M**	N	N	**M**	N	**M**	N	N
t = ۸	N	N	**M**	**M**	**M**	N	N	**M**	N	N

مقدار تابع هدف در جواب الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، ۲۲۴۷/۲ میلیون تومان به‌دست آمد. تخصیص عملیات نت پیشگیرانه در جدول ۴ نشان داده شده است که در آن N، M، R به‌ترتیب اقدامات بازرسی، تعمیر و تعویض هستند. به‌منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی از نرم‌افزار GAMS 22.6 149 نیز برای حل مدل استفاده شد. با توجه به غیرخطی بودن مدل، حل‌کننده COINBONMIN با عملکرد بهتر، انتخاب شد. شایان ذکر است که ابعاد این مسئله، بزرگ‌ترین بعدی از مدل ریاضی بود که توسط این نرم‌افزار قابل حل بود و جواب صرفا به‌صورت یک جواب موجه گزارش شد. مقدار تابع هدف برابر ۳۱۵۵/۷ میلیون تومان به‌دست آمد که حدود ۴۰ درصد از جواب الگوریتم ژنتیک بزرگ‌تر است. تخصیص عملیات نت پیشگیرانه در این روش، مطابق جدول ۵ است.

جدول ۵. برنامه عملیات نت پیشگیرانه براساس حل نرم‌افزار گمز

	j = ۱	j = ۲	j = ۳	j = ٤	j = ٥	j = ٦	j = ۷	j = ۸	j = ۹	j = ۱۰
t = ۱	N	N	N	**R**	N	N	N	N	**R**	N
t = ۲	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
t = ۳	N	N	**M**	N	**M**	**M**	**R**	N	N	**M**
t = ۴	**M**	N	**M**	**M**	**N**	**N**	**N**	**R**	N	**M**
t = ۵	N	**M**	**M**	N	**M**	**M**	N	N	**M**	N
t = ۶	**M**	N	N	**M**	**M**	**M**	N	N	N	**M**
t = ۷	**M**	**M**	**M**	**M**	N	N	N	N	N	**M**
t = ۸	N	**R**	**M**	N	**M**	**M**	**M**	N	N	**M**

مقایسه نتایج روش‌های حل با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم افزار گمز در جدول ۶ آمده است.

جدول ٦. مقایسه نتایج روش‌های حل

	الگوریتم ژنتیک	نرم‌افزار گمز	درصد بهبود الگوریتم ژنتیک
مقدار تابع هدف	۲۲۴۷/۲	۳۱۵۵/۷	۴۰
هزینه کل اجرای عملیات نت	۱۱۰۳/۷	۱۶۱۶/۶	۴۶
هزینه کل مسدودی خط	۹۱۲/۰	۱۳۲۲/۴	۴۵
هزینه کل خرابی‌های تصادفی	۲۳۱/۴	۲۱۶/۶	-۶
متوسط دسترس‌پذیری	۰/۹۸۷۲	۰/۹۸۶۸	-۰/۰۴
متوسط قابلیت اطمینان سیستم	۰/۹۹۰۵	۰/۹۹۰۵	۰/۰۰۰

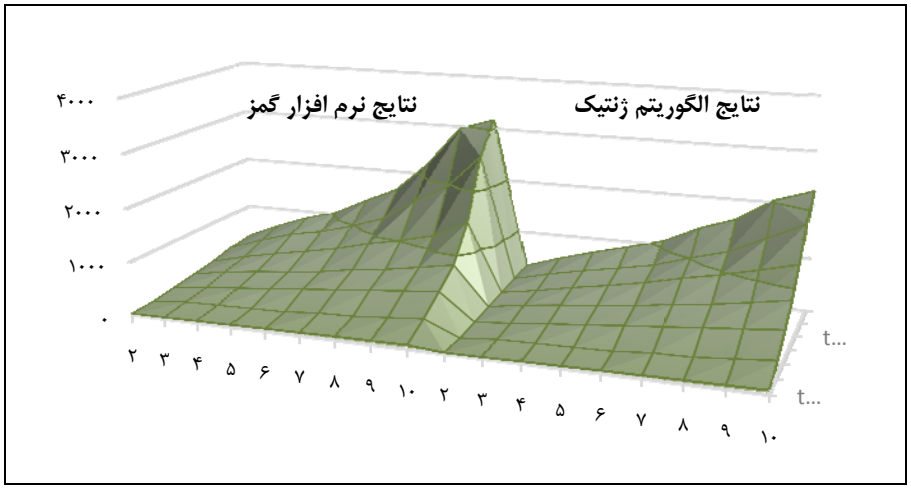
جهت بررسی دقیق‌تر، برای ابعاد گوناگون مسئله، حل مدل توسط هر دو روش انجام شد و مقادیر تابع هدف در جدول ۷ گزارش شده است. خروجی‌هایی که در نرم‌افزار گمز به‌عنوان جواب بهینه[1] گزارش شده، در جدول ۷ به‌صورت بولد مشخص شده و در دیگر موارد، خروجی نرم‌افزار صرفاً یک جواب موجه[2] گزارش شده است. مقایسهٔ مقادیر تابع هدف

1. Optimal Solution
2. Feasible Solution

به‌دست آمده از دو روش حل، در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است، در ابعادی از مدل که نرم‌افزار گمز قادر به گزارش جواب بهینه بوده است، الگوریتم پیشنهادی نیز همان جواب را به‌دست آورده و در ابعاد بزرگ‌تر، جواب الگوریتم ژنتیک بهتر از جواب نرم‌افزار گمز بوده است. در نهایت، تعداد ۱۰ قطعه ($J = ۱۰$) و ۸ دوره برنامه‌ریزی ($T = ۸$) حداکثر بعدی از مسئله است که نرم‌افزار گمز قادر به یافتن جواب موجه است.

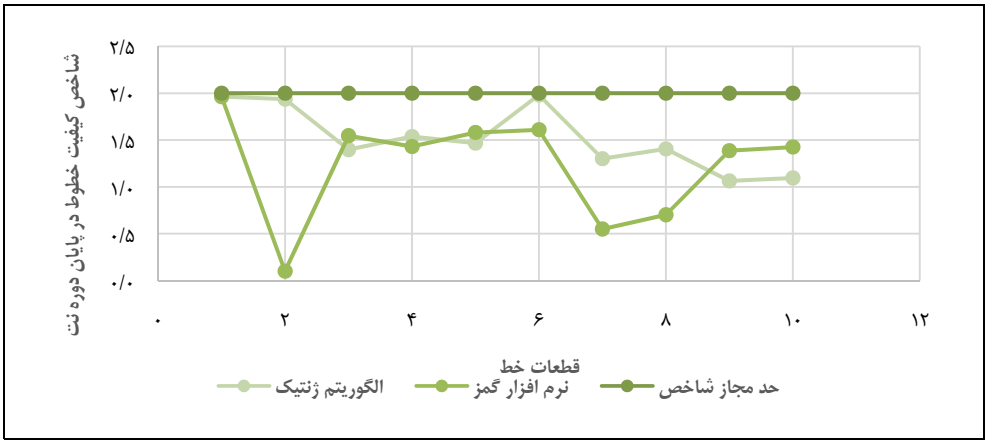
جدول ۷. مقادیر تابع هدف دو روش حل برای ابعاد متنوع مسئله

	۸	۷	٦	٥	٤	۳	۲	j/t
نتایج نرم‌افزار گمز	۳٥۸/۰	۲۹۹/۸	۱۹٦/۴	۱۴۰/۲	**۸۱/٥**	**۲٦/۲**	**۱۷/۳**	۲
	۶۲۰/٥	٥۱۰/۹	۳٥٥/۹	۲۴۸/۷	**۱۳۹/۸**	۸۱/۱	**۲۱/۹**	۳
	۸٥٥/۱	۶۹۲/۰	۴۸۴/۳	۳۲٥/۴	**۲۰۸/۸**	**۹۷/۹**	**۳۳/۱**	۴
	۱۰۲٥/۱	۸۱۰/۰	٥۹۸/۹	۳۸۸/۹	**۲٦۸/٤**	**۱۰٦/٤**	**۳۸/۷**	٥
	۱۳۳۱/۶	۹۸۴/۲	۷۲۱/۴	۴٥۹/۴	**۳۳۳/۱**	**۱۱۹/۳**	**٤۷/۲**	۶
	۱۶۲۷/۷	۱۲۰۰/٥	۸۸۲/۸	٥۷۰/۰	**۳۹۱/۸**	**۱۷٤/٤**	**٥۲/۱**	۷
	۲۲۰۱/۴	۱۶۱٥/۴	۱۰۱۱/۶	۶٤٥/۸	۴۶۰/۶	**۱۸۹/۸**	**٦۲/۳**	۸
	۲۹٥۱/۴	۱۹٥۴/۹	۱۱۷۰/۱	۷٥۳/۶	٥۱۷/۰	۲۴۴/۱	**٦٥/۸**	۹
	۳۱٥٥/۷	۲٥۸۲/۸	۱۴۸۶/۴	۸۶۷/۳	٥۷۸/۳	۳۰۱/۰	**۷۲/۰**	۱۰
	۸	**۷**	**٦**	**٥**	**٤**	**۳**	**۲**	**j/t**
نتایج الگوریتم ژنتیک	**۳۱۰/۲**	**۲٥۳/٤**	**۱۹٤/۸**	**۱۳۸/٥**	**۸۱/٥**	**۲٦/۲**	**۱۷/۳**	۲
	٥۲٥/۰	**٤۱٦/٦**	**۳۰٦/۱**	**۲٤۷/۰**	**۱۳۹/۸**	**۸۱/۰**	**۲۱/۹**	۳
	۷۱۳/۸	**٥٥۱/۲**	**٤۳٤/٥**	**۳۲۳/۷**	**۲۰۸/۸**	**۹۷/۹**	**۳۳/۱**	۴
	۸۸۳/۸	**٦٦۹/۲**	**٥٤۸/٤**	**۳۸۷/۷**	**۲٦۸/٤**	**۱۰٦/٤**	**۳۸/۷**	٥
	۱۰٦۳/۱	**۷۹٦/۰**	**٦۷۲/٤**	**٤٥۷/۷**	**۳۳۳/۱**	**۱۱۹/۳**	**٤۷/۲**	۶
	۱۳۷۹/٦	**۱۰۱۰/۱**	**۸۳۳/۰**	**٥٦٦/٦**	**۳۹۱/۸**	**۱۷٤/٤**	**٥۲/۱**	۷
	۱٦۱۲/۸	**۱۱۸۹/۰**	**۹٦۱/۲**	**٦٤۲/٥**	**٤٥۹/۲**	**۱۸۹/۸**	**٦۲/۳**	۸
	۲۰۲۹/۹	**۱٥۰۱/۹**	**۱۱۲۰/۱**	**۷٥۰/۲**	**٥۱٥/٥**	**۲٤۳/٥**	**٦٥/۸**	۹
	۲۲٤۷/۲	**۱۸۲۱/۲**	**۱۲۸٤/٥**	**۸٦۳/۷**	**٥۷٦/۸**	**۳۰۰/٤**	**۷۲/۰**	۱۰



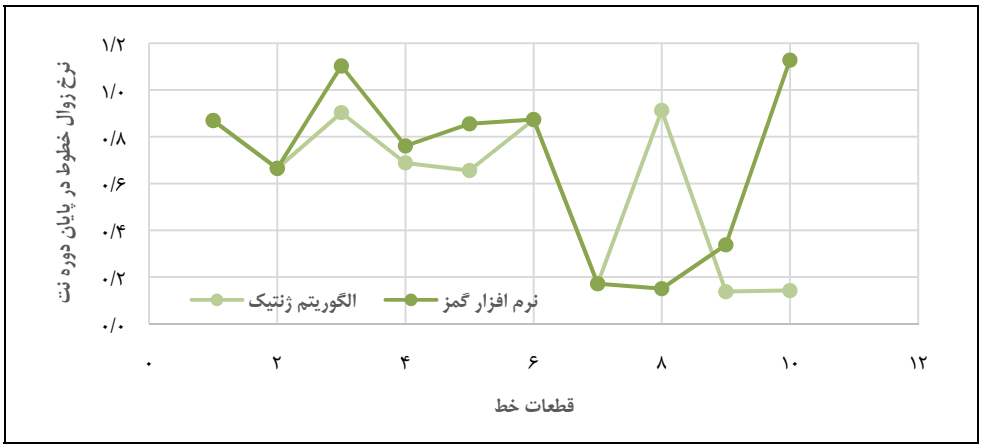
شکل ۵. مقادیر تابع هدف دو روش حل

با توجه به آنکه برنامه‌ریزی تخصیص عملیات نت پیشگیرانه مبتنی بر وضعیت خطوط است، استفاده حداکثری از ظرفیت خطوط، از دیگر پارامترهای مقایسه‌ای میان برنامه‌های حاصل از دو روش حل است. شکل ۶ مقایسه‌ای از مقادیر شاخص کیفیت خطوط در پایان دوره برنامه‌ریزی برای کلیه قطعات مورد مطالعه با حد مجاز شاخص، نشان داده است.



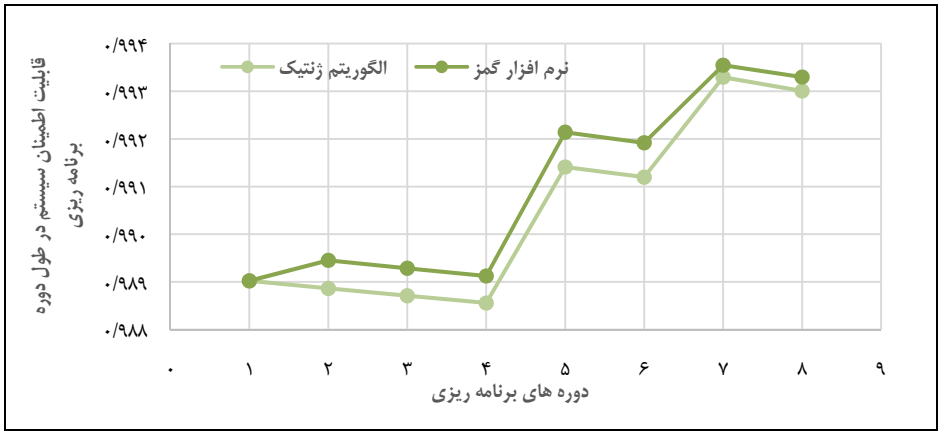
شکل ٦. مقایسه مقادیر شاخص کیفیت خطوط در پایان دوره برنامه‌ریزی برای دو روش حل

برنامه‌ریزی به‌دست آمده از نرم‌افزار گمز با تخصیص بیشتر عملیات پیشگیرانه همواره وضعیت شاخص کیفیت خطوط بهتری نسبت به برنامه‌ریزی به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک دارد. این امر به کاهش هزینه خرابی‌های تصادفی به مقدار ۶ درصد و بهبود متوسط قابلیت اطمینان تنها به مقدار ۰/۰۴ درصد منجر شده است که با توجه به افزایش کل هزینه‌ها به اندازه ۴۰ درصد، برنامه‌ریزی مقرون به صرفه‌ای نیست. در حالی که الگوریتم ژنتیک با تخصیص کمتر عملیات، استفاده بیشتری از ظرفیت موجود خطوط کرده است. باید توجه داشت که انجام عملیات زیرکوبی وضعیت شاخص کیفیت خط را بهبود می‌دهد؛ ولی به افزایش نرخ زوال خطوط منجر خواهد شد. بنابراین در برنامه‌های پیشگیرانه، بایستی این عملیات به‌صورت «حداقل لازم» تخصیص پیدا کند. در شکل ۷ مقادیر نرخ زوال قطعات خط در پایان دوره برنامه‌ریزی مقایسه شده است. همان طور که مشخص است برنامه نت ارائه شده توسط نرم‌افزار گمز ضمن صرف هزینه بیشتر برای نت خطوط، در پایان دوره برنامه‌ریزی خطوطی با نرخ زوال بزرگ‌تر برجای می‌گذارد.



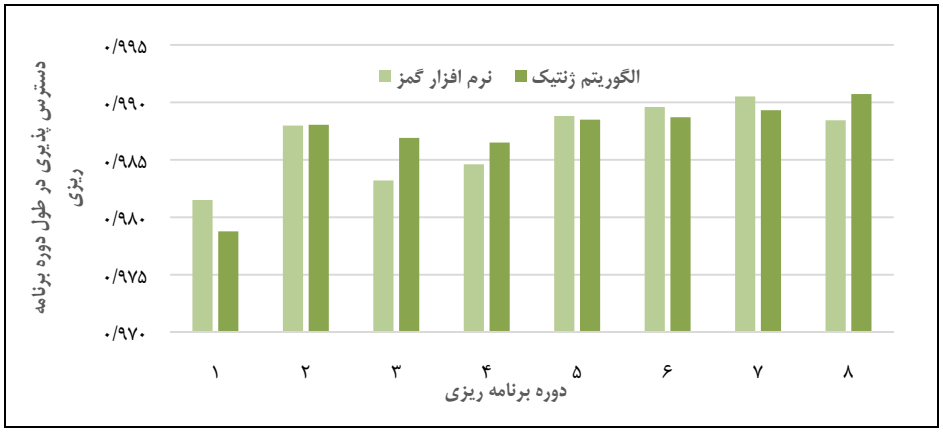
شکل ۷. مقایسه مقادیر نرخ زوال خطوط در پایان دوره نت برای دو روش حل

با توجه به اتکای حمل بار و مسافر بـر زیرسـاخت ریلـی، قابلیـت اطمینـان سیسـتم از دیگـر پارامترهـای مهـم در برنامه‌ریزی نت خطوط است. نکتهٔ حائز اهمیت آن است که برنامه‌ریزی مبتنی بر وضعیت، فارغ از روش حل، بـه‌صـورت کلی به ارتقای قابلیت اطمینان سیستم منجر خواهد شد. همان طور که در شکل ۸ مقـادیر قابلیـت اطمینـان سیسـتم در طول دورهٔ برنامه‌ریزی نشان داده شده است، تأمین حداقل قابلیت اطمینان مطلوب به راحتی محقق شـده اسـت و میـان روش‌های حل اختلاف کمی وجود دارد. اگرچه در برنامه‌ریزی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار گمز، هزینهٔ نت بیشـتری پرداخـت شده است، بهبود قابلیت اطمینان چشمگیر نیست.



شکل ۸. مقایسهٔ قابل اطمینان سیستم در طول دوره برنامه‌ریزی میان دو روش حل

شکل ۹ مقایسه‌ای میان مقادیر دسترس‌پذیری در دو روش حل انجام داده است. به‌صورت متوسط، تفاوتی میـان دو روش در این شاخص وجود ندارد و هر دو روش، به‌خوبی حداقل دسترس‌پذیری مورد نظـر را رعایـت کـرده‌انـد. بـا نگـاه موشکافانه‌تر متوجه می‌شویم که در برنامه‌ریزی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار گمز، عملیات پیشگیرانهٔ بیشـتری تخصـیص داده شده است؛ ولی از طرف دیگر، تعداد خرابی‌های تصادفی در این حالت کمتر بوده و در مجموع، متوسط دسترس‌پذیری در هر دو روش حل با هم برابر شده است. در مجموع با توجه به بررسی‌های انجام شده، کارایی الگوریتم ژنتیـک بـه لحـاظ دستیابی به برنامه‌ریزی بهینه، حل مسائل با ابعاد بزرگ، استفادهٔ حداکثری از ظرفیت خطـوط و قابلیـت اطمینـان بیشـتر، قابل قبول است.



شکل ۹. مقایسه دسترس‌پذیری در طول دوره برنامه‌ریزی برای دو روش حل

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی عملیات نت پیشگیرانه و مبتنی بر وضعیت برای خطوط ریلی ارائه شد. در مدل جامع ارائه‌شده کل هزینه‌های نت، شامل هزینه‌های اجرای عملیات پیشگیرانه، مسدودی خط و اصلاح خرابی‌های تصادفی، در تابع هدف لحاظ شد. محدودیت‌های حداقل قابل‌قبول دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان شبکه که به همراه شاخص کیفیت خطوط، دو معیار مهم برای شبکه است، در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شد. همچنین متوسط تعداد خرابی‌های تصادفی، به‌صورت فرایند پواسون ناهمگن لحاظ شد. در نظر گرفتن تأثیر اجرای عملیات پیشگیرانه بر کاهش نرخ وقوع خرابی‌ها و همچنین، بهبود پیش‌بینی شاخص کیفیت خطوط با فرض نرخ زوال وابسته به عملیات پیشین و تقاضای متغیر در طول زمان، از دیگر موارد نوآورانه‌ای بود که در این پژوهش اعمال شد. آنچه بیان شد، به همراه تعریف جدید متغیرهای تصمیم، به مدل‌سازی نزدیک‌تر به شرایط واقعی و جذاب‌تر برای صنعت ریلی انجامید.

مدل ریاضی پیشنهادی پویا و غیرخطی و مختلط است. به‌دلیل ماهیت پیچیدهٔ مدل برنامه‌ریزی ریاضی، یک الگوریتم ژنتیک، به همراه یک الگوریتم ابتکاری برای تولید جواب‌های اولیه، برای حل مدل پیشنهاد شد. طی بررسی ابعاد مختلف مسئله، کارایی و عملکرد قابل قبول الگوریتم ژنتیک، در مقایسه با روش‌های حل دقیق نشان داده شد.

با توجه به گستردگی خطوط ریلی در جغرافیا و تنوع عوامل ناهمگون تأثیرگذار بر زوال خطوط، از جمله عوامل مرتبط با وضعیت خط، ترافیک عبوری و شرایط محیطی، امکان منعکس کردن آن‌ها در مدل برنامه‌ریزی، نیاز ملموس صنعت ریلی است. این مهم با دریافت پارامترهای ورودی برای هر قطعه از خط توسط مدل ریاضی قابل پیاده‌سازی است. به‌علاوه یک مدل کارا برای استفاده در مسائل واقعی، بایستی بتواند با برنامه نت ناوگان و ماشین‌آلات تعمیراتی هماهنگ شود و محدودیت نفرهای اجرایی و قراردادهای تعمیراتی را برای هر دوره در نظر بگیرد. انعطاف لازم در این زمینه با متغیر بودن ظرفیت اجرایی هر عملیات برای هر دوره، قابل تنظیم خواهد بود. از طرفی با توجه به هزینهٔ سرسام‌آور هر ساعت مسدودی خط و تفاوت این هزینه در طول دورهٔ طرح، مدل برنامه‌ریزی بایستی به این زمان حساس باشد و بتواند تعادلی میان شاخص کیفیت خطوط، خرابی‌های تصادفی و مسدود کردن خط برقرار کند و از سوی دیگر، تخصیص عملیات را به دوره‌هایی با هزینهٔ کمتر انتقال دهد. نحوهٔ تعریف و مقداردهی به پارامترها، انعطاف زیادی به مدل داده و امکان بررسی یا پیاده‌سازی سیاست‌های مختلفی را فراهم کرده است. این موضوع به مدل اجازه می‌دهد تا تصمیم‌هایی اتخاذ کند که شامل تخصیص بهینه و بهنگام اقدامات پیشگیرانه در هر دوره با توجه به هزینه کل، قابلیت اطمینان، الزامات در دسترس بودن، شاخص کیفیت خط و محدودیت‌های منابع است.

به‌منظور ارائه پیشنهادهایی برای جهت‌گیری پژوهش‌های آتی، بایستی محدودیت‌های پژوهش انجام شده بررسی شود:

در سالیان اخیر با توسعهٔ انواع ماشین‌آلات اندازه‌گیر خط، ماشین‌آلات اولتراسونیک، تکنولوژی رادار نفوذ به زمین[1]، تکنولوژی پردازش تصویر و دیگر حسگرهای هوشمند، امکان دسترسی به انبوه داده مهیا شده است. مشابه پژوهشی که قاسمی، محقر، صفری و اکبری جوکار (۱۳۹۵) در حوزهٔ بهداشت و درمان یا کریمی، آذر، محبان و قاسمی (۱۴۰۱) در

1. Ground Penetrating Radar (GPR)

حوزهٔ صنایع غذایی انجام شده است، لازم است در پژوهشی بررسی اثرهای انقلاب صنعتی چهارم، بر نت پیشگیرانهٔ خطوط ریلی، ارزیابی چالش‌ها و ارائهٔ راه‌کارهایی برای پیاده‌سازی موفق فناوری‌های نوین انجام شود. این موضوع به اولویت‌بندی کاربردهای فناوری اینترنت اشیا و تدوین نقشه‌راه فناوری نت مبتنی‌بر اینترنت اشیا منجر خواهد شد.

با توجه به اینترنت اشیا که بیشترین نمود انقلاب صنعتی چهارم را نمایندگی می‌کند، پیشنهاد بعدی، بهبود برنامه‌ریزی نت خطوط ریلی، شامل استفاده از حسگرهای هوشمند برای جمع‌آوری داده‌های واقعی در زمان واقعی از تجهیزات و زیرساخت‌هاست. این داده‌ها می‌تواند به تحلیل پیش‌بینی‌کننده[۱] منجر شود که ضمن کمک به مدیریت بهینهٔ برنامه‌های نت، از خرابی‌های غیرمنتظره جلوگیری می‌کند. همچنین، پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت نت مبتنی بر ابر[۲]، می‌تواند به تسهیل دسترسی به اطلاعات و هماهنگی بین تیم‌ها و دستگاه‌ها کمک کند. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده از حسگرها، به شناسایی الگوهای خرابی و بهبود فرایندهای تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی نگهداری کمک می‌کند. در نهایت، ادغام فناوری‌های واقعیت افزوده[۳] و واقعیت مجازی[۴]، به آموزش کارکنان و بهبود فرایندهای نت کمک می‌کند و ایمنی و کارایی را در عملیات خطوط ریلی افزایش می‌دهد.

در مدل پیشنهادی متداول‌ترین شاخص کیفیت خط، یعنی انحراف استاندارد، افتادگی پروفیل طولی قطعات خط، در نظر گرفته شد. با توجه به وجود پارامترهای هندسی و تحلیلی دیگر که مطالعهٔ ماتسوموتو، میوا و ایاما[۵] (۲۰۲۲) روی آن‌ها انجام شده است، می‌توان استفاده از شاخص‌های ترکیبی یا چندگانه هندسی و همچنین شاخص‌های سازه‌ای[۶] یا شاخص‌های راحتی سیر[۷] را مدنظر قرار داد.

مروری بر سیاست‌های نت برای سیستم‌های تحت زوال توسط ونگ[۸] (۲۰۰۲) انجام شده است. مدل‌های زوال و بازیابی در این مطالعه، به‌صورت خطی در نظر گرفته شده و همچنین، بازرسی انجام شده و تشخیص خرابی‌ها به‌صورت کامل فرض شده است. مطابق مطالعهٔ آلتای و بایکال گورسوی[۹] (۲۰۲۲) می‌توان تشخیص عیوب را با عدم قطعیت در نظر گرفت، همچنین از مدل‌های پیچیده‌تر یا رویکردهای دیگری برای پیش‌بینی زوال خطوط استفاده کرد.

در نظر گرفتن دیگر خرابی‌های خطوط، از جمله انواع خرابی‌های ریل، تراورس و ادوات خط به همراه شاخص‌های مرتبط و عملیات پیشگیرانه مربوطه می‌تواند مد نظر قرار گیرد (ایزدی یزدان آبادی، خادم ثامنی و یقینی[۱۰]، ۲۰۲۳). تشخیص، پیش‌بینی و برطرف کردن پدیدهٔ آلودگی بالاست[۱۱] و استفاده از تکنولوژی رادار نفوذ به زمین[۱۲]، از جمله رویکردهای نوین در حوزه نت خطوط ریلی است (گوا و همکاران[۱۳]، ۲۰۲۲) که می‌تواند در مدل ریاضی وارد شود.

---

1. Predictive Maintenance Analytics
2. Cloud-based Maintenance Management Systems
3. Augmented Reality (AR)
4. Virtual Reality (VR)
5. Matsumoto, Miwa & Oyama
6. Track Structural Index (TSI)
7. Ride Comfort Index
8. Wang
9. Altay & Baykal-Gürsoy
10. Izadi Yazdan Abadi, Khadem Sameni & Yaghini
11. Ballast fouling
12. Ground Penetrating Radar (GPR)
13. Guo et al.

در صورت توسعهٔ مدل ریاضی پیشنهادی، با توجه به پیچیده‌شدن چندین برابـری مـدل، ممکـن اسـت اسـتفاده از روش‌های حل دیگری از جمله شبیه‌سازی یا برنامه‌ریزی محدودیت[1] مفید باشد (اسماعیلیان و بکران، ۱۳۹۳).

منابع

احمدی، سیدحسین و گروسی مختارزاده، نیما (۱۳۹۲). بررسی و اولویت‌بندی میزان حساسیت دستگاه‌ها جهت تعمیرات و نگهـداری پیشگیرانه با مدل مارتل و زاراس. *مدیریت صنعتی*، ۵ (۲)، ۱-۲۲.

اسماعیلیان، مجید و بکران، هاجر (۱۳۹۳). زمان‌بندی تعمیرات پیشگیرانه (PM) با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح و برنامه‌ریزی محدودیتی. *مدیریت صنعتی*، ۶ (۳)، ۴۳۳-۴۵۲.

اسماعیلیان، مجید؛ جعفرنژاد، احمد و جبلی، سید احسان (۱۳۹۲). ارائه روش‌های ابتکاری جدید برای زمانبندی تعمیرات پیشـگیرانه. *دوفصلنامه پژوهش در مدیریت تولید و عملیات*،۴ (۱)، ۱-۲۰.

جعفرنژاد، احمد؛ جشیره نژادی، علیرضا؛ صفایی، بهزاد و حافظی‌نیا، علی اکبر (۱۳۹۴). ارائه مدل مفهـومی نگهـداری و تعمیـرات بـا تمرکز بر هزینه‌های آن با استفاده از رویکرد پویایی‌های سیستم. *کنفرانس بین‌المللی مدیریت و علوم انسانی*.

صدیقی، علیرضا و شفاهی، یوسف (۱۳۹۸). پیش‌بینی زوال هندسی خطوط راه‌آهن با اسـتفاده از الگـوریتم‌هـای یـادگیری ماشـین، *ششمین کنفرانس بین‌المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه‌آهن ICRARE2019* ، دانشگاه علم و صنعت ایران.

فهرست بهای واحد پایه رشته راه، راه‌آهن و باند فرودگاه ـ رسته راه و ترابری (۱۴۰۳). *سازمان برنامه و بودجه کشور. معاونت فنـی، امور زیربنایی و تولیدی. امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران*.

قاسمی، روح اله؛ محقر، علی؛ صفری، حسین و اکبری جوکار، محمدرضا (۱۳۹۵). اولویت‌بندی کاربردهای فناوری اینترنـت اشـیا در بخش بهداشت و درمان ایران: محرکی برای توسعه پایدار. *مدیریت فناوری اطلاعات*، ۸ (۱)، ۱۵۵-۱۷۶.

کریمی، تورج؛ آذر، عادل؛ محبان، بهاره و قاسمی، روح اله (۱۴۰۱). تدوین نقشه راه فناوری حمل‌ونقل هوشمند مبتنـی بـر اینترنـت اشیا در صنایع غذایی دارای زنجیره تأمین سرد. *مدیریت صنعتی*، ۱۴ (۲)، ۱۹۵-۲۱۹.

مشخصات فنی عمومی روسازی راه‌آهن (بازنگری اول) ـ نشریه شماره ۳۰۱ (۱۴۰۱). *سازمان برنامه و بودجه کشور. معاونـت فنـی، امور زیربنایی و تولیدی. امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران*.

نجات‌نیا، مهدیس؛ ماکوئی، احمد و جبارزاده، آرمین (۱۴۰۲). رتبه‌بندی شرکت‌های حمل‌ونقل بین‌المللی ریلـی ایـران بـا اسـتفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره پویا و سیستم استنتاج فازی. *مدیریت صنعتی*، ۱۵ (۳)، ۳۸۶-۴۱۰.

یونس‌پور، مریم؛ اسماعیلیان، مجید و کیانفر، کامران (۱۴۰۲). ارائه مدل شبیه‌سازی ـ بهینه‌سـازی بـرای تعیـین بهینـه پارامترهـای رویکرد برنامه‌ریزی نیازمندی مواد مبتنی بر تقاضا. *مدیریت صنعتی*، ۱۵ (۴)، ۶۲۱-۶۴۹.

References

Ahmadi, S. & Mokhtarzadeh, N. (2013). Checking and Prioritizing the Rate of Sensetivity of Machines for Pprecautionary Maintenance with Martel & Zaras Method (The Case: Tolid

1. Constraint Programming (CP)

Atash Factory). *Industrial Management Journal*, 5(2), 1-22. (*in Persian*)

Altay, A. & Baykal-Gürsoy, M. (2022). Imperfect rail-track inspection scheduling with zero-inflated miss rates. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *138*, 103608

Andrade, A. R. & Teixeira, P. (2011). Biobjective Optimization Model for Maintenance and Renewal Decisions Related to Rail Track Geometry. *Transportation Research Record* (2261), 163–70.

Binder, M., Mezhuyev, V. & Tschandl, M. (2023). Predictive Maintenance for Railway Domain: A Systematic Literature Review. *IEEE Engineering Management Review*, 51 (2), 120-140.

Budai, G., Dekker, R. & Kaymak, U. (2009). Genetic and Memetic Algorithms for Scheduling Railway Maintenance Activities. *Erasmus University Rotterdam*, 200(1), 1–23.

Budai, G., Huisman, D. & Dekker, R. (2006). Scheduling Preventive Railway Maintenance Activities. *Journal of the Operational Research Society* 57(9), 1035–1044.

Canto, S. (2008). Application of Benders Decomposition to Power Plant Preventive Maintenance Scheduling. *European Journal of Operational Research*, 184(2), 759–777.

Daddow, M., Zhang, X., Qiu, H., Zhang, Z. & Liu, Y. (2020). A Mathematical Model for Ballast Tamping Decision Making in Railway Tracks. *Civil Engineering Journal*, 6(10), 2045–2057.

Esmaelian, M. & Bakran, H. (2014). Preventive maintenance scheduling with integer programming and constraint programming. *Industrial Management Journal*, 6(3), 433–452. (*in Persian*)

Esmailian, M., Jafarnejad, A. & Jebelli, S. E. (2013). Proposing New Heuristic Approaches for Preventive Maintenance Scheduling. *Research in Production and Operations Management*, 4(1), 1–20. (*in Persian*)

European Committee for Standardization. (1999). *Railway Applications-The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS).* (CSN EN 50126). https://www.en-standard.eu/

European Committee for Standardization. (2017). *Railway Applications-Track-Track geometry quality-Part 5: Geometric quality levels-Plain line, switches and crossings.* (CSN EN 13848-5: 2017E). https://www.en-standard.eu/

Famurewa, S., Xin, T., Rantatalo, M. & Kumar, U. (2015). Optimisation of Maintenance Track Possession Time: A Tamping Case Study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(1), 12–22.

Federal Railroad Administration Office of Safety Analysis. (2024). *FRA AccidentCauses*. http://safetydata.fra.dot.gov/officeofsafety/default.aspx (August 31, 2024). Accessed J.

Guo, Y., Liu, G., Jing, G., Qu, J., Wang, Sh. & Qiang, W. (2022). Ballast fouling inspection and quantification with ground penetrating radar (GPR). *International Journal of Rail Transportation*, 11(2), 151-168.

Gustavsson, E. (2015). Scheduling Tamping Operations on Railway Tracks Using Mixed

Integer Linear Programming. *EURO Journal on Transportation and Logistics,* 4(1), 97–112.

Gustavsson, E., Patriksson, M., Strömberg, A., Wojciechowski, A. & Önnheim, M. (2014). Preventive Maintenance Scheduling of Multi-Component Systems with Interval Costs. *Computers and Industrial Engineering,* 76, 390–400.

Huang, Y., Fang, Ch. & Wijaya, S. (2022). Condition-based preventive maintenance with a yield rate threshold for deteriorating repairable systems. *Quality and Reliability Engineering International*, 38(8), 4122-4140.

Izadi Yazdan Abadi, E., Khadem Sameni, M. & Yaghini, M. (2023). Analysis of the relationship between geometric parameters of railway track and twist failure by using data mining techniques. *Engineering Failure Analysis*, 143- part A.

Jafarnejad, A., Jashirenejadi, A., Safai, B. & Hafezinia, A. (2015). Presenting a conceptual model of maintenance and repairs focusing on its costs using the system dynamics approach. *International Conference on Management and Humanities*. (*in Persian*)

Kamel, G., Fahmy, A., Mohib, A. & Afefy, I. (2020). Optimization of a Multilevel Integrated Preventive Maintenance Scheduling Mathematical Model Using Genetic Algorithm. *International Journal of Management Science and Engineering Management,* 15(4), 247–257.

Kasraei, A. & Zakeri, J.A. (2022). Maintenance Decision Support Model for Railway Track Geometry Maintenance Planning Using Cost, Reliability, and Availability Factors: A Case Study. *Transportation Research Record*, 2676 (7), 161–172.

Khosravi, M., Ahmadi, A., Kasraei, A. & Nissen, A. (2024). Optimisation of railway tamping scheduling. *Heliyon*, 10(23).

Liu, G., Long, X., Tong, S., Zhang, R. & Chen, S. (2019). Optimum Consecutive Preventive Maintenance Scheduling Model Considering Reliability. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 24(4), 490-495.

Matsumoto, M., Miwa, M. & Oyama, T. (2022). Multivariate Analyses for Finding Significant Track Irregularities to Generate an Optimal Track Maintenance Schedule. *American Journal of Operations Research*, 12(6), 261-292.

Moghaddam, K. & Usher, J. (2011). A New Multi-Objective Optimization Model for Preventive Maintenance and Replacement Scheduling of Multi-Component Systems. *Engineering Optimization*, 43(7), 701–719.

Nejatnia, M., Makui, A. & Jabbarzadeh, A. (2023). Ranking Iran's International Rail Transportation Companies Using Dynamic Multi-criteria Decision-making and Fuzzy Inference System. *Industrial Management Journal*, 15(3), 386–410. (*in Persian*)

Neuhold, J., Vidovic, I. & Marschnig, S. (2020). Preparing Track Geometry Data for Automated Maintenance Planning. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 146(5).

Office for Research and Experiments. (1988). *Dynamic Vehicle/Track Interaction Phenomena, from the Point of View of Track Maintenance.* (Question D161, RP3), Union Internationale Des Chemins de Fer (UIC).

Oyama, T. & Miwa, M. (2006). Mathematical Modeling Analyses for Obtaining an Optimal Railway Track Maintenance Schedule. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 23(2), 207–224.

Peng, F., Kang, S., Li, X. & Ouyang, Y. (2011). A Heuristic Approach to the Railroad Track Maintenance Scheduling Problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(2), 129–145.

Pinciroli, L., Baraldi, P. & Zio, E. (2023). Maintenance optimization in industry 4.0. *Reliability Engineering and System Safety*, 234.

Prabhakaran, P., Subbaiyan, A., Gopalakrishnan, D., Balaji. M, H. V., Ramkumar, S., Veluswamy, S., ... & Bhaskaran, P. (2022). [Retracted] Maintenance Methodologies Embraced for Railroad Systems: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2022*(1), 7655245.

Rodrigues, P. & Teixeira, P. (2022). Modelling degradation rates of track geometry local defects: Lisbon-Porto line case study. *Structure and Infrastructure Engineering*, 20(6), 867-882.

Sadeghi, J., Heydari, H. & Doloei, E. (2017). Improvement of Railway Maintenance Approach by Developing a New Railway Condition Index. *Journal of Transportation Engineering*, 143(8).

Sedighi, A., Shafahi, Y. (2019). Prediction of Railway Track Geometry Condition Using Machine Learning Algorithms, *6th International Conference on Recent Advances in Railway Engineering (ICRARE 2019)*. Tehran – Iran. June 2019. (*in Persian*)

Seraco, I. & Neto, H. (2023). Contribution to Railway Track Maintenance Planning from the Analysis of Dynamic Movements of Trains. *Civil Engineering Journal*, 9(2), 254-272.

Sivanandam, S. N. & Deepa, S. N. (2008). Genetic Algorithms. *Introduction to Genetic Algorithm*s, 15–37. https://doi.org/10.1007/978-3-540 73190-0_2.

Soleimanimeigouni, I., Ahmadi, A. & Kumar, U. (2018). Track geometry degradation and maintenance modelling: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(1), 73–102.

Track Geometry Degradation and Maintenance Modelling: A Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(1), 73–102.

Vale, C. & Ribeiro, I. (2014). Railway Condition-Based Maintenance Model with Stochastic Deterioration. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(5), 686–692.

Vale, C., Ribeiro, I. & Calçada, R. (2012). Integer Programming to Optimize Tamping in Railway Tracks as Preventive Maintenance. *Journal of Transportation Engineering*, 138(1), 123–131.

Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139 (3), 469-489.

Wen, M., Li, R. & Salling, K. (2016). Optimization of Preventive Condition-Based Tamping for Railway Tracks. *European Journal of Operational Research*, 252(2), 455–465.

Xie, J., Huang, J., Zeng, C., Jiang, S. H., & Podlich, N. (2020). Systematic Literature Review on Data-Driven Models for Predictive Maintenance of Railway Track: Implications in Geotechnical Engineering. *Geosciences (Switzerland)*, 10(11), 1–24.

Younespour, M., Esmaelian, M. & Kianfar, K. (2023). Proposing a Simulation-based Optimization Model for Determining Optimal Parameters in a Demand Driven Material Requirements Planning Approach. *Industrial Management Journal*, 15(4): 621-649. (*in Persian*)

Zhang, T., Andrews, J. & Wang, R. (2013). Optimal Scheduling of Track Maintenance on a Railway Network. *Quality and Reliability Engineering International*, 29(2), 285–97.