



## Life cycle cost analysis (LCCA) of railway tracks maintenance decisions using the Markov forecast model based on the track recording machine data

Seyed Elyas Hashemian<sup>1,\*</sup>, Yousef Shafahi<sup>2</sup>, Fereidoon Moghadas Nejad<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** Rail transportation system plays an important role in the development of the economies of the countries. This system will be worn over time by operation and weather conditions and will require maintenance. One of the goals of this operation is to keep the tracks in an acceptable condition and prevent their excessive deviation from the optimal situation. Railways maintenance and repair management system has been studied and implemented to optimize activities and reduce related costs. Such systems have used various techniques to predict the future state of failure. Choosing the best maintenance policy is the goal of these systems. For policymaking, the best and most cost-effective option, life-cycle cost analysis is required. In the following, with help of the Markov prediction model, the life cycle cost (LCC) model is suggested for rail and ballast. In the end, it was found that the main costs in the ballast part are renewal costs and the track unavailability costs. The effect of renewal tonnage on these two costs is far higher than other costs. As you can see, the lowest ballast life cycle cost in the range of 100 to 150 million gross tons. In this study, assuming annual tonnage (16 million gross tonnages) as previously mentioned, it results in a renewal life of about 6 to 10 years. This value for the rails is from 500 to 540 million gross tons, which is equivalent to 30 to 35 years.

### Review History:

Received:

Revised:

Accepted:

Available Online:

### Keywords:

Life Cycle Cost

Quality Index

Rail and Ballast

Markov Prediction Model

Railway Infrastructure

## 1- INTRODUCTION

After the construction of the railway tracks, a set of operations is carried out to maintain their quality and keep efficiency at the optimal level which is referred to as maintenance operations. In general, a proper track maintenance decision system should be able to answer the question of when and how to maintain the track to get the most profit by spending the least cost. [1]. Using the Markov chain is one way to achieve degradation models and predict future conditions [2-4]. Ayyub et al. [5] and Hakhamaneshi and Shafahi [1] have presented the Markov model by optimizing and creating the transition matrix and Prescott has proposed the Markov chain by statistical analysis on the relative rate of rail wear [6].

The issue raised in this study is the implementation of a process for making optimal maintenance decisions for railways, taking into account long-term costs. The main focus of the work is on the implementation of the overall framework of the decision-making system based on life cycle cost. In this study, we have tried to compile a comprehensive database with the least error. After that, the degradation model is formed using comprehensive information. In the end, efforts have been made to process maintenance costs for the life cycle cost analysis.

## 2- METHODOLOGY

Many studies have used approaches in the form of extrapolation or nonlinear fitting to produce track prediction models having railway track conditions in different sections according to their age. Extrapolation models have the essence of a definitive model. Also, the form of a specific function has been often used in fitting models, usually exponential or polynomial models.[1]

In this study, the TTQI described in the previous section has been used. This index changes from 0 (zero) which represents the state of best track condition to 470 which is the threshold of complete failure (very bad condition). As discussed in the preceding section, the tolerance range of this index is presented fuzzily. Being fuzzy means that there is no clear boundary between track quality states. Also, Table 1 presents the track state classification for use in the Markov model. The presentation of the fuzzy Markov model can be one of the proposed future works.

In this study, a block is considered the smallest maintenance unit. Thus, for each class, a transition matrix has been computed that it's main diagonal shown in Table 4. It should be noted that, based on the information available in some classes, there is insufficient information to recommend the Markov model, so not all of the classes in Table 2 are present.

Since most maintenance activities focus on rail and ballast

\*Corresponding author's email: hashemian.se@aut.ac.ir



**Table 1. The track state classification corresponding to TTQI index**

Track State	Track Quality	TTQI
1	Excellent	0 – 75
2	Good	75 – 177.5
3	Medium	177.5 – 345
4	Bad	345 – 390
5	Bad and Very Bad Gap	390 – 470
6	Very Bad	More than 470

**Table 2. Diagonal elements of transition matrices for the classes of tracks**

Class	P <sub>11</sub>	P <sub>22</sub>	P <sub>33</sub>	P <sub>44</sub>	P <sub>55</sub>
K=1	0.8216	0.7111	0.5827	0.3271	0.2107
K=2	0.8442	0.7007	0.6137	0.4174	0.1124
K=3	0.8972	0.7552	0.5624	0.3410	0.1439
K=4	0.8342	0.6921	0.6023	0.3746	0.2752
K=5	0.7824	0.6885	0.5364	0.3488	0.2400
K=7	0.8320	0.7376	0.5435	0.3669	0.1754
K=8	0.8373	0.6829	0.5967	0.3820	0.1457
K=13	0.7923	0.6931	0.5627	0.4237	0.1913
K=14	0.8142	0.7329	0.6037	0.3913	0.1395
K=15	0.8636	0.7271	0.5723	0.3843	0.1993
K=16	0.8122	0.7084	0.6277	0.3955	0.2321
K=17	0.7444	0.6625	0.5291	0.3627	0.2557
K=18	0.7324	0.6271	0.4423	0.3725	0.1524

and also due to having reliable information on rail and ballast maintenance costs, this study presents only the rail and ballast maintenance, LCC model. It should be noted that the Rail and ballast LCC model are developed models available in the literature. Although both the Rail and Ballast LCC models have been discussed separately, an integrated approach should be developed. The result true comprehension of both models determines the best renewal time (in cumulative tonnage) for both.

### 3- CONCLUSION

In this study, the proposed new index MahmoudiFard [7] was used to improve the accuracy of the model. One advantage of using this indicator is the direct use of track recorder machine outputs. In the LCC Analysis section, considering the most important components of the railroad that are most likely to be repaired and maintained, their life cycle cost model and a way to find the optimal time for maintenance operations are presented. Applying the life cycle cost analysis to ballast maintenance decisions showed that in addition

to incorporating cost and cost over time in the process of determining the rail and ballast renewal optimum time, this analysis results in near-realistic responses. For example, as you can see, the lowest ballast life cycle cost in the range of 100 to 150 million gross tons. In this study, assuming annual tonnage (16 million gross tonnages) as previously mentioned, it results in a renewal life of about 6 to 10 years. This value for the rails is from 500 to 540 million gross tons, which is equivalent to 30 to 35 years.

### REFERENCES

- [1] Y. Shafahi, R. Hakhamaneshi, Application of a maintenance management model for Iranian railways based on the Markov chain and probabilistic dynamic programming, (2009).
- [2] I.A. Khouy, H. Schunnesson, U. Juntti, A. Nissen, P.-O. Larsson-Kräik, Evaluation of track geometry maintenance for a heavy haul railroad in Sweden: a case study, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 228(5) (2014) 496-503.
- [3] S. Kumar, A study of the rail degradation process to predict rail

breaks, Luleå tekniska universitet, 2006.

- [4] A.S. Suiker, R. de Borst, A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks, *International journal for numerical methods in engineering*, 57(4) (2003) 441-470.
- [5] B.M. Ayyub, *Uncertainty modeling and analysis in civil engineering*, CRC Press, 1997.
- [6] D. Prescott, J. Andrews, Investigating railway track asset management using a Markov analysis, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(4) (2015) 402-416.
- [7] s.m. MahmoudiFard, *Providing a quality index for Iran's railways*, Sharif University of Technology, 2008.(In Persian).

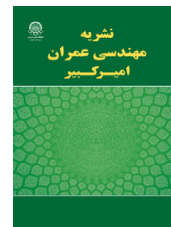
**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

*S.E. Hashemian, Y. YShafahi, F. Moghadas Nejad, Life cycle cost analysis (LCCA) of railway tracks maintenance decisions using the Markov forecast model based on the track recording machine data, Amirkabir J. Civil Eng., 53(2) (2021) 131-134.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2020.15952.6122](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.15952.6122)







## تحلیل هزینه‌ی چرخه‌ی عمر تصمیمات تعمیر و نگهداری با استفاده از خروجی مدل پیش‌بینی مارکوف بر مبنای اطلاعات ماشین اندازه‌گیر خط راه‌آهن

سیدالیاس هاشمیان<sup>۱\*</sup>، یوسف شفاهی<sup>۲</sup>، فریدون مقدس‌نژاد<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۸

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۰۷

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۲۲

### کلمات کلیدی:

هزینه دوره عمر

شاخص کیفیت

ریل و بالاست

مدل پیش‌بینی مارکوف

زیرساخت ریلی

**خلاصه:** سیستم حمل‌ونقل ریلی نقش مهم و حیاتی در توسعه اقتصاد کشورها دارد. این سیستم در طول زمان بر اساس بهره‌برداری و شرایط آب و هوایی فرسوده می‌شود و به تعمیر و نگهداری نیاز دارد. یکی از اهداف این عملیات، نگهداری خطوط در یک وضعیت قابل قبول و جلوگیری از انحراف بیش از حد آن‌ها نسبت به وضعیت مطلوب است. در راه‌آهن سامانه مدیریت تعمیر و نگهداری خط آهن جهت بهینه کردن فعالیت‌ها و کاهش هزینه‌های مرتبط با آن‌ها مطالعه و پیاده‌سازی شده است. چنین سامانه‌هایی برای پیش‌بینی وضعیت آتی خرابی، از تکنیک‌های مختلفی استفاده کرده‌اند. انتخاب بهترین سیاست تعمیر و نگهداری هدف این سامانه‌ها است. برای این که سیاست اتخاذی، بهترین و مقرون به‌صرفه‌ترین انتخاب باشد، نیاز است که تحلیل هزینه دوره عمر صورت پذیرد. در ادامه به کمک مدل پیش‌بینی زوال مارکوف پیشین، مدل هزینه دوره عمر برای بالاست و ریل به عنوان اجزای نگران کننده پیشنهاد می‌شود. در انتها مشخص شد که هزینه‌های اصلی در بخش بالاست مربوط به هزینه نوسازی بالاست و عدم در دسترس بودن خط است. همانگونه که مشاهده شد کمترین هزینه دوره عمر بالاست در بازه تناژ ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیون تن ناخالص رخ می‌دهد. در این مطالعه با فرض تناژ سالانه (۱۶ میلیون تن ناخالص)، نتیجه می‌شود که عمر نوسازی بالاست حدوداً ۶ تا ۱۰ سال است. این عدد برای ریل ۵۰۰ تا ۵۴۰ میلیون تن ناخالص است که معادل ۳۰ تا ۳۵ سال است.

### ۱- مقدمه

به تعمیر و نگهداری خط پرداخته شود تا با صرف کمترین هزینه، بیشترین سود به دست آید [۲].

ایجاد هر سامانه تصمیم‌گیری تعمیر و نگهداری مستلزم در اختیار داشتن یک پایگاه داده جامع است. این بانک اطلاعاتی می‌تواند شامل اطلاعات خرابی‌ها، گزارش بازرسی‌ها، سوابق تعمیر و نگهداری، مدت زمان، هزینه و نوع عملیات نگهداری و تعمیر باشد. هرچه این بانک اطلاعاتی جامع‌تر باشد، کارایی سیستم با استفاده از آن افزایش می‌یابد. پس از فراهم آوردن هرچه کامل‌تر و جامع‌تر بانک اطلاعاتی باید به سراغ مسئله پیش‌بینی کیفیت و وضعیت خط در آینده رفت؛ به عبارت دیگر مدل‌های زوال خط هستند که کیفیت خط را در زمان‌های آتی می‌توانند تخمین بزنند. زبان بیان کیفیت

پس از ساخت خطوط راه‌آهن و برای حفظ کیفیت و کارایی آن‌ها در حد مطلوب، مجموعه عملیاتی انجام می‌گیرد که به آن عملیات تعمیر و نگهداری می‌گویند. در سال‌های اخیر، تغییرات عمده‌ای در سیستم مدیریت و نگهداری زیرساخت‌های راه‌آهن کشورهای پیشرفته صورت گرفته است. رسیدن به معیارهای مهمی چون افزایش زمان در دسترس بودن خطوط ریلی به جهت بهره‌برداری بیشتر، قابلیت اعتماد، ایمنی و کمینه سازی هزینه‌ها از جمله اهداف تغییرات اخیر است [۱]. به طور کلی یک سامانه تصمیم‌گیری تعمیر و نگهداری خط مناسب باید بتواند به این سوال پاسخ بدهد که چه موقع و چگونه

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Hashemian.se@aut.ac.ir



ارائه شده است. مدل‌های برون‌یابی، مدل‌های برازش، مدل‌های تجربی، زنجیره مارکوف، مدل‌های چندجمله‌ای، مدل اساسی<sup>۱</sup> ORE، شبکه‌های عصبی و مدل‌های فازی از جمله این روش‌ها هستند.

در بخش مدل‌های تجربی، ژانگ<sup>۲</sup> و همکاران در دانشگاه کوینزلند<sup>۳</sup> استرالیا با کمک روابط تجربی اندرکنش اجزا خط به این نتیجه رسیده اند که با افزایش بار محوری، نرخ سایش در ریل افزایش می‌یابد [۵]. سوپکر<sup>۴</sup>، کومار<sup>۵</sup> و آراسته خوی از جمله محققانی بوده اند که به ترتیب با روش‌های عددی - آزمایشگاهی، تحلیل مکانیک شکست و توزیع‌های آماری بر مبنای نرخ نسبی زوال مدل‌های برازشی زوال را ارائه داده اند [۶-۸]. استفاده از زنجیره مارکوف یکی از راه‌های دستیابی به مدل‌های زوال و پیش‌بینی شرایط در آینده است. ایوب و همکاران [۹] و هخامنشی و شفاهی [۱۰] به کمک بهینه سازی و ایجاد ماتریس انتقال مدل مارکوف را ارائه داده اند و درن پرسکات با تحلیل آماری بر روی نرخ نسبی سایش ریل، زنجیره مارکوف را پیشنهاد داده است [۱۱]. داویدیان [۱۲] و رسولی و شفاهی [۱۳] با حداقل کردن خطا در مدل ارتباطی - عصبی و عصبی - فازی، مدل‌های شبکه‌ی عصبی در جهت پیش‌بینی وضعیت را توسعه داده اند. مدل‌های ابتکاری و موردی دیگری هم از جمله مدل‌های آماری منعطف - بیزین سلسله مراتبی بوده است که توسط آندراده و تکسیرا ارائه شده است [۱۴]. از دیگر سایر مدل‌های زوال می‌توان به مدل‌های چندجمله‌ای تک پارامتره که توسط جوانویچ و همکاران ایجاد شده اشاره کرد [۱۵]. یوسفی کیا در تحقیقی جذاب بر بخش متنوعی از مدل‌های احتمالاتی مروری مناسب داشته است [۱۶].

امروزه مسئله نگهداری و تعمیر و یا به عبارت فنی‌تر مهندسی نگهداری و تعمیرات با پیشرفت و توسعه تجهیزات، ماشین آلات دچار تغییرات ویژه ای شده است. روند تغییرات به گونه ای است که صاحبان صنایع و مدیران تولید بدون اطلاع و آگاهی از علوم پیشرفته مهندسی نگهداری و تعمیرات نه تنها قادر به رقابت در بازار تولیدات مشابه نبوده، بلکه برای حفظ موفقیت‌های گذشته خود با مشکلات زیادی مواجه هستند. آنچه که در حال حاضر بیشتر مورد نظر تمام مدیران سیستم‌های پیشرفته مانند خطوط ریلی است، مسأله نگهداری

خط، شاخص‌های کیفیت خط هستند؛ بنابراین ارائه و یا انتخاب یک شاخص کیفیت مناسب یکی از الزامات فرآیند پیش‌بینی کیفیت خط است.

روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی وضعیت خط در آینده وجود دارد. یک مدل زوال، روند تغییرات وضعیت خط در طول زمان را نشان می‌دهد. شناخت الگوی این تغییرات از دیگر مشخصه‌های مدل زوال خط است. نحوه توصیف روند زوال در مدل‌های زوال بر مبنای تعریفی که مدل در بیان شاخص زوال دارد، متفاوت است [۳].

نگهداری خطوط راه‌آهن در وضعیت نزدیک به حالت مطلوب و جلوگیری از انحراف بیش‌ازاندازه آن‌ها نسبت به وضعیت مطلوب یک مسئله حائز اهمیت است. جلوگیری از انحراف پارامترهای هندسی خط نسبت به وضعیت قبل در این راستا است. این انحراف، انحراف نامنظمی‌های هندسی گفته می‌شود. اگر انحراف از حد مجاز خود عبور کند علاوه بر سلب آسایش مسافران، ممکن است باعث سانحه در خط شود. اگر سوانح در خطوط مسافری اتفاق بیفتد، علاوه بر هزینه‌های زیاد اقتصادی، ممکن است باعث هزینه‌های سنگین سیاسی و اجتماعی شود. با پیش‌بینی نامنظمی‌ها و ارائه سامانه تصمیم‌گیری می‌شود از خسارت‌های سنگین سوانح تا اندازه زیادی جلوگیری کرد [۴]. مزیت دیگر ارائه مدل زوال، برنامه‌ریزی بهینه تعمیر و نگهداری خطوط است.

مدل‌های پیش‌بینی وضعیت خط یا مدل‌های زوال خط سعی می‌کنند به کمک شاخص‌های کیفیت تخمینی از وضعیت آینده خط را ارائه دهند. به وضوح شاخص انتخاب شده برای بیان کیفیت خط می‌تواند کارایی مدل‌های زوال را تحت تأثیر قرار دهد و حتی می‌توان گفت که با استفاده از یک مدل می‌توان تعیین کرد کدام شاخص می‌تواند وضعیت خط در آینده را بهتر و واقعیت‌تر نشان دهد. از طرف دیگر انتخاب یک مدل از میان چند مدل هم به این صورت است که یک شاخص را انتخاب کرده و با مقایسه چند مدل، وضعیت آینده را پیش‌بینی کرده، در نتیجه مدلی که وضعیت را بهتر پیش‌بینی کند مدلی کارتر و دقیق‌تر معرفی می‌گردد.

به هر حال، در سیستم تعمیر و نگهداری، وجود یک مدل برای توصیف روند زوال خطوط لازم است چرا که پیش‌بینی شرایط خط، یک بخش ضروری از فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت تعمیر و نگهداری خط است. روش‌های مختلفی برای تخمین وضعیت خط

1 Office for Research and Experiments

2 Zhang

3 Queensland university

4 Suiker

5 Kumar

بر این مبنای، مطالعات گسترده ای در زمینه ی تحلیل هزینه های دوره عمر زیرساخت ریلی صورت گرفته است. این تحقیقات در دو قالب کلی پروژه های تحقیقاتی اتحادیه اروپا (EU<sup>2</sup>) و اتحادیه بین المللی راه آهن ها (UIC<sup>3</sup>) طبقه بندی نمود [۱۸]. همچنین پژوهشگران دیگری در زمینه تحلیل هزینه های دوره عمر راه آهن متمرکز شده اند که می توان به کار پاترا در زمینه مدل پشتیبان تصمیم گیری و تحلیل LCC و RAMS<sup>4</sup> اشاره کرد [۱۹]. نیسن نیز تحلیل هزینه دوره عمر را مبتنی بر تئوری شکست برای سوزن و ادوات ریل صورت داده است [۲۰]. همچنین تادوری و کومار اخیرا به صورت یکپارچه سه مفهوم چرخه دوره عمر، خطر پذیری (ریسک) و رمز<sup>۵</sup> را در خصوص برنامه ریزی تعمیر و نگهداری خطوط راه آهن به کار برده اند [۲۰]. ساسیدهاران و همکاران نیز اخیرا تحقیقی در خصوص رویکرد کل دوره عمر تحت عدم قطعیت برای نگهداری مسیر ریلی بالاستی صورت داده اند. این رویکرد تحلیل کل هزینه چرخه عمر از رویکرد عدم اطمینان استفاده می کند که هزینه ها و مزایای نگهداری مسیر را برای آموزش اپراتورهای قطار، کاربران و محیط زیست در نظر می گیرد [۲۰].

از جمله کارهای ارزشمند صورت گرفته در ایران که بیشتر نیز عنوان گردید کتاب چاپ شده در زمینه تحلیل هزینه چرخه عمر در مهندسی راه آهن «از دیدگاه مدیریت نگهداری و تعمیر» توسط فتحعلی و همکاران می باشد [۲۰].

در نهایت، مساله مطرح در این مقاله انجام تحلیل هزینه دوره عمر به کمک یک مدل پیش بینی شاخص کیفیت است.

در مقاله ی حاضر با جمع آوری اطلاعات دستگاه اندازه گیری خط (EM120) در تمام نواحی راه آهن ایران در سال های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۲ و تجزیه و تحلیل این اطلاعات، ابتدا خطاهای متنوع موجود در درون داده ها برطرف گردید و سپس به کمک طبقه بندی، خطوط در کلاس های مشخصی قرار گرفتند. پس از آن با در دست داشتن مقدار شاخص کیفیت خط برای تمام کلاس های خطوط راه آهن ایران، مدل پیش بینی بر مبنای زنجیره مارکوف ارائه گردید. در نهایت مدل حاضر با استفاده از شاخص کیفیت خط ذکر گردیده با سایر مدل های پیش بینی مورد مقایسه قرار گرفت.

سیستم است. با توجه به شرایط ویژه حمل و نقل ریلی (درگیر بودن بسیاری از جنبه های مهندسی از جمله سازه، خطوط ریلی، ناوگان، تأسیسات، سیستم های برقی و الکترونیکی) پایه ریزی صحیح سیستم نت (نگهداری و تعمیر) مبتنی بر سامانه های مدیریتی نقش مهم و تعیین کننده ای در کاهش هزینه ها در بلند مدت و در طول دوره عمر محصول خواهد داشت. در راه آهن سامانه مدیریت تعمیر و نگهداری خط آهن جهت بهینه کردن فعالیت ها و کاهش هزینه های مرتبط با آن ها مطالعه و پیاده سازی شده است. چنین سامانه هایی برای پیش بینی وضعیت آتی خرابی، از تکنیک های مختلفی استفاده کرده اند. انتخاب بهترین سیاست تعمیر و نگهداری هدف این سامانه ها است. برای این که سیاست اتخاذی، بهترین و مقرون به صرفه ترین انتخاب باشد، نیاز است که تحلیل هزینه دوره عمر صورت پذیرد.

هزینه ی دوره عمر<sup>۱</sup> یک سازه، مجموع تمام هزینه های پرداخت شده جهت پشتیبانی از طرح، ساخت و نگهداری سازه و عملکرد بهینه ی آن تا انتهای عمر مفید آن است. یکی از اهداف تحلیل هزینه دور عمر بهبود بخشیدن به رقابت های اقتصادی است. تحلیل هزینه دوره عمر تأکید بر پرداخت حداقل هزینه ممکن را دارد [۲]. استفاده از روش هزینه دوره عمر نه تنها کارایی یک مدل تصمیم گیری را بهبود می بخشد بلکه باعث کاهش هزینه های بلند مدت نیز می گردد [۱۷]. در گذشته فقط به نگهداری خط آهن توجه می شد و مدیریت خط امری ناشناخته بود. عامل تعیین کننده در انتخاب روش ترمیم و نگهداری مناسب تجربه مهندسیین بوده است، در عین حال که توجه چندانی به هزینه های دوره عمر و یا به اولویت بندی بر اساس ضرورت در سطح شبکه معطوف نمی گردید. در اقتصاد امروزی به همان نسبت که از عمر خطوط موجود می گذرد نیاز به یک روش نظام مندتر برای تعیین ضرورت ها در امر ترمیم و نگهداری بیشتر احساس می گردد. امروزه شبکه خطوط نیاز به مدیریت دارد و دیگر نگهداری به تنهایی کافی نیست. پیاده سازی یک سامانه مدیریت تعمیر و نگهداری خط از یک طرف می تواند منتج به بهینه و بهنگام سازی تعمیرات و از طرف دیگر باعث کاهش هزینه های بلند مدت شود.

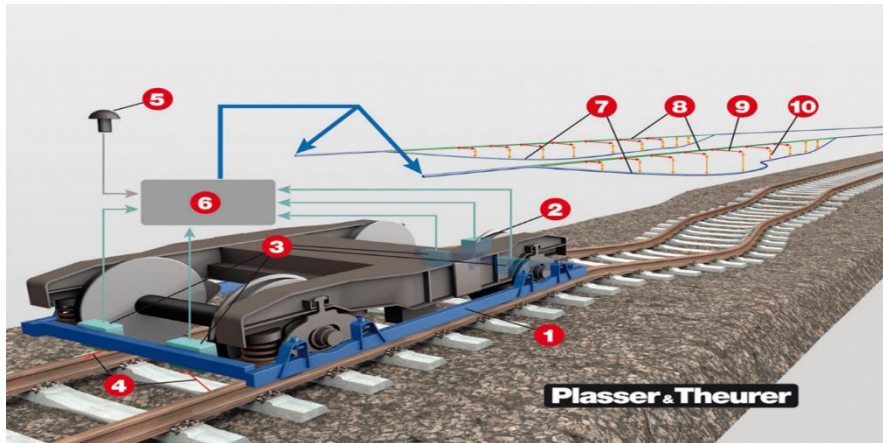
وجود رقابت در گزینه های تعمیر و نگهداری و همچنین اولویت بندی گزینه تعمیر و نگهداری باعث شد که رویکرد تحلیل هزینه دوره عمر بیش از پیش و با جزییات بیشتری مورد بحث قرار گیرد.

2 European Union  
3 International Union of Railways  
4 Reliability Availability Maintainability Safety  
5 RAMS

1 Life Cycle Cost (LCC)

KM	SPD	LLL	LLR	GAU	XLV	ALL	ALR	TWS32	TWS50	TWS10	ACCH	ACCV	ACCL	ACCT	TEMP
763.00000	105.909	1.154	0.961	-1.143	2.638	3.758	4.224	5.435	10.604	8.824	-2.464	-5.417	-1.352	5.951	36.842
762.99975	105.626	0.047	0.724	-0.353	3.676	3.158	3.929	5.819	10.634	8.647	-1.61	-5.614	-1.024	5.84	36.842
762.99950	105.322	-1.053	0.502	0.121	4.517	2.533	3.733	6.135	10.644	8.429	-0.755	-5.745	-1.024	5.795	36.842
762.99925	105.018	-2.099	0.296	0.137	5.368	1.902	3.622	6.136	10.641	8.309	-0.032	-6.14	-0.958	6.14	36.875
762.99900	104.866	-3.017	0.089	-0.274	6.225	1.209	3.212	5.805	10.623	8.111	0.559	-6.271	-0.761	6.296	36.859
762.99875	104.736	-3.859	-0.042	-0.811	7.02	0.492	2.591	5.082	10.436	8.061	0.954	-6.403	-0.695	6.473	36.875
762.99850	104.714	-4.571	-0.226	-1.174	8.008	-0.375	1.666	4.242	10.092	8.097	1.348	-6.337	-0.695	6.479	36.859
762.99825	104.583	-5.295	-0.42	-1.127	8.905	-1.193	0.938	3.437	9.5	8.192	1.611	-6.337	-0.892	6.539	36.875
762.99800	104.583	-5.913	-0.71	-0.811	9.797	-1.894	0.45	2.631	8.601	8.596	1.94	-6.271	-0.958	6.564	36.859
762.99775	104.627	-6.543	-1.109	-0.432	10.351	-2.328	0.395	1.735	7.495	9.12	2.006	-6.205	-1.024	6.522	36.859
762.99750	104.823	-6.844	-1.462	-0.337	10.601	-2.703	0.207	0.645	6.292	9.82	2.269	-6.008	-1.155	6.422	36.859
762.99725	104.909	-7.017	-1.578	-0.511	10.783	-2.939	-0.116	-0.521	5.239	9.688	2.466	-5.614	-1.352	6.132	36.859
762.99700	104.996	-7.006	-1.425	-1.032	10.882	-3.162	-0.657	-1.869	4.26	9.292	2.794	-5.088	-1.484	5.805	36.859
762.99675	105.127	-7.184	-1.207	-1.791	10.894	-3.541	-1.271	-3.171	3.388	8.274	2.992	-4.562	-1.615	5.456	36.859
762.99650	105.322	-7.283	-1.081	-2.549	10.763	-4.083	-2.088	-4.352	2.451	7.621	3.189	-3.971	-1.747	5.093	36.859
762.99625	105.583	-7.428	-1.084	-3.023	10.503	-4.59	-3.017	-4.994	1.66	6.815	3.517	-3.313	-2.01	4.832	36.875

شکل ۱. نمونه‌ی اطلاعات موجود در پایگاه داده‌های مطالعه  
Fig. 1. Sample information in study databases



شکل ۲. برخی پارامترهای برداشت‌شده توسط ماشین اندازه‌گیر [۲۱]  
Fig. 2. Some parameters taken by the recorder machine [21]

مشاهده چشمی یا اندازه‌گیری ابزار ساده‌ی دستی صورت می‌گرفت؛ اما در سال‌های اخیر از ماشین‌های اندازه‌گیری خط برای ثبت خرابی‌های خط راه‌آهن‌ها به صورت چشمگیری استفاده می‌شود. ماشینی که امروزه در ایران به‌صورت متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد، ماشین اندازه‌گیر EM120 است. مهمترین پارامترهایی که یک ماشین اندازه‌گیر ثبت می‌کند در زیر آمده و یک نمونه از اطلاعات در شکل ۱ آورده شده‌است. این اطلاعات در فاصله‌های ۲۵ سانتی متری برداشت می‌شوند. برای آشنایی با برخی از این اطلاعات شکل ۲ آورده شده‌است.

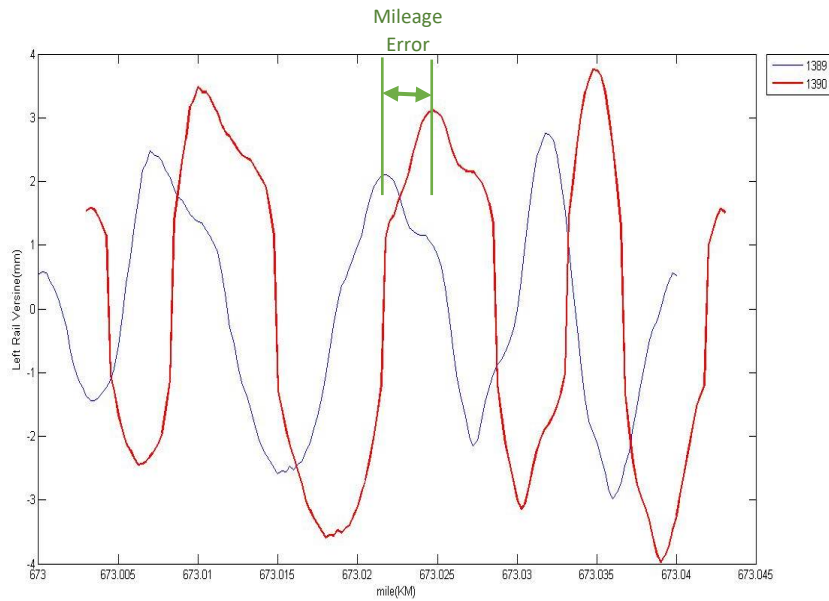
۱. کیلومتر از مسیر - km (کیلومتر) ۲. سرعت عملیات اندازه‌گیری (سرعت حرکت ماشین اندازه‌گیر حین ثبت پارامترها) - SPD (کیلومتر بر ساعت) ۳. تراز طولی ریل چپ و راست - LLL

به منظور شناخت کاربردی تحلیل هزینه دوره عمر در نگهداری و تعمیر زیرساخت راه‌آهن، مدل‌های هزینه‌ی دوره بالاست و ریل خطوط راه‌آهن به صورت مجزا مورد مطالعه قرار گرفتند. لازم به ذکر است که برآوردهای صورت گرفته و نتایج محاسبه شده صرفاً بر مبنای فرضیات حاکم در این پژوهش قابل استناد بوده و ممکن است در شرایط متفاوت نگهداری و ساخت نتایج متفاوتی حاصل گردد. تأکید اصلی بر نتایج این پژوهش صرفاً به لحاظ نشان دادن قابلیت‌های تحلیل هزینه‌های دوره عمر در تصمیم‌گیری نگهداری خطوط راه‌آهن است.

## ۲- پایگاه داده

در ابتدا ثبت خرابی‌های خط توسط افراد گروه نگهداری خط با





شکل ۳. مثالی از یک پارامتر هندسی خط قبل از تصحیح خطای کیلومتر (خیز ریل چپ)

Fig. 3. An example of a track geometrical parameter before the mileage error correction (left rail versine)

در زمان‌های متفاوت نشان داد که تفاوت‌هایی در پارامترهای هندسی برداشت‌شده توسط ماشین اندازه‌گیر خط در زمان‌های مختلف وجود دارد. این تفاوت‌ها نه تنها در مقدار عددی پارامترهای هندسی (برای مثال، تراز طولی، خیز ریل، عرض خط) بلکه در خطای کیلومتر خود را نشان می‌دهد.

با توجه به این که اپراتورهای ماشین اندازه‌گیر خط، شروع و پایان بلاک‌ها را به صورت دستی با فشردن دکمه ثبت می‌کند، ممکن است در هر بار برداشت اطلاعات هر بلاک، کیلومتر نقاط بر هم منطبق نباشند. برای مثال در شکل ۳ پارامتر خیز ریل چپ در قسمتی از خط راه‌آهن در دو سال متوالی مشاهده می‌شود که دارای تفاوت در کیلومتر تراژ مسیر است.

با استفاده از اطلاعات پارامتر هندسی معینی در بخش مشخصی در دو زمان مختلف و با تغییر میزان جابجایی به جهت تصحیح خطای کیلومتر تراژ می‌توان این خطا را برطرف نمود. این روش در نتیجه به یک مسئله بهینه‌سازی مقدار تصحیح خطا منجر می‌شود. مدل بهینه‌سازی به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$\text{Min } u = \sum_{i=1}^N (Y_{1i} - Y_{2(i+x)})^2 \quad (1)$$

$$\text{S.t. } -250 \leq x \leq 250, x \in \mathbb{Z}$$

که:

LLR / (میلیمتر) ۴. عرض خط - GAU (میلیمتر) ۵. شیب عرضی (دور) - XLV (میلیمتر) ۶. خیز ریل چپ و راست - ALL / ALR (میلیمتر) ۷. پیچش در طول‌های متفاوت - TWS (میلیمتر) ۸. شتاب‌های عمودی، طولی و افقی - ACCV / ACCL / ACCH (متر برمجذور ثانیه) ۹. دمای محیط - TEMP (درجه سانتیگراد)

در شکل ۲ موارد ذکر شده با شماره به صورت زیر است:

۱. شاسی بوژی ماشین اندازه‌گیر ۲، ۳ و ۴. حسگرهای برداشت اطلاعات ۵ و ۶. ثبت‌کننده اطلاعات و اجزا آن ۷. مسیر خط آهن دچار انحراف شده ۸. مسیر خط آهن قبل از انحراف (حالت ایده آل) ۹. افتادگی‌های (تراز طولی) ریل (LLL/LLR) ۱۰. خیز ریل (ALL/ALR)

اطلاعات دریافتی دارای محدودیت‌هایی از قبیل یکپارچه نبودن فایل‌ها برای نواحی مختلف و مجزا و یکپارچه نبودن رکوردها و فیلهای اطلاعاتی بودند که با ماکرونویسی در محیط اکسل این محدودیت‌ها برطرف گردید. همچنین حین ثبت اطلاعات خطاهایی همچون خطای کیلومتر تراژ هنگام ثبت اطلاعات وجود داشته که با الگوریتمی که در ادامه اشاره خواهد شد حداقل شده اند.

#### ۲-۱- خطای کیلومتر تراژ هنگام ثبت اطلاعات

نگاهی به نمودار اطلاعات برداشت شده از قطعات مشخص راه‌آهن

جدول ۱. طبقه‌بندی و کلاس خطوط راه آهن ایران  
Table 1. The Iranian railway tracks classification

شماره کلاس خط راه آهن (k)						
بار محوری (تن)	ترافیک عبوری					
	کم			زیاد		
	موقعیت جغرافیایی (شرایط توپوگرافی)					
	هموار	تپه ماهوری	کوهستانی	هموار	تپه ماهوری	کوهستانی
۲۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۲۲.۵	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۲۵	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸

آماري راه آهن جمهوری اسلامی ایران، بار محوری به عنوان نماینده زیرساخت خط انتخاب گردید [۲۲]. از طرفی با در نظر گرفتن نحوه گسترش شبکه خطوط راه آهن در نواحی جغرافیایی ایران و همچنین تناژ عبوری، خطوط راه آهن به هجده دسته مطابق جدول ۱ تقسیم بندی شدند.

همان طور که گفته شد سه معیار طبقه بندی بار محوری، موقعیت جغرافیایی و تناژ عبوری هستند که از سالنامه آماری راه آهن جمهوری اسلامی ایران و گزارش نواحی راه آهن به تفکیک استخراج شده اند [۲۲]. خطوط راه آهن ایران بر اساس بارهای محوری ۲۰، ۲۲/۵ و ۲۵ تن طراحی شده اند. پستی و بلندی زمین و منطقه عبور مسیر به طور کلی به سه دسته ۱. مناطق هموار: شیب زمین کمتر از ۳ درصد ۲. مناطق تپه ماهوری: شیب زمین بین ۳ تا ۷ درصد ۳. مناطق کوهستانی: شیب زمین بیش از ۷ درصد تقسیم می شود. بر اساس آمار تناژ بار بارگیری و فعالیت قطارها در سال های مورد مطالعه، این معیار در این مطالعه به دو دسته ترافیک کم و ترافیک زیاد تقسیم شدند.

در جدول ۱ همانگونه که اشاره شد، راه آهن ایران بر اساس مطالب فوق به ۱۸ کلاس مختلف تقسیم بندی شدند. به عنوان مثال  $k=11$  معرف خطوط راه آهن در نواحی تپه ماهور با ترافیک زیاد است که شرایط زیرساخت آن مطابق با بار محوری ۲۲/۵ تن است. پس از بررسی و شناخت تک تک ناحیه ها و بلاک های خطوط راه آهن ایران، اطلاعات دریافتی به هجده کلاس اشاره شده اختصاص پیدا کردند. نتایج توزیع بلاک های خطوط راه آهن در این طبقه بندی در جدول ۲ نشان داده شده است.

$Y_{ii}$ : اطلاعات پارامتر هندسی قبلی در نقطه  $i$  ام (اطلاعات مرجع)  
 $Y_{(i+x)}$ : اطلاعات پارامتر هندسی بعدی در نقطه  $i+x$  ام (اطلاعاتی که قرار است تصحیح شود)

$X$ : فاصله تغییر کیلومتر از جهت تصحیح خطای کیلومتر از

$N$ : تعداد کل نقاط انتخاب شده در بخش مورد محاسبه

فرایند تصحیح خطای کیلومتر از جهت مؤثر بودن در سه گام صورت می پذیرد. این سه گام شامل، پیش پردازش اطلاعات، ساختن اطلاعات مرجع و تصحیح خطای کیلومتر از است. منظور از پیش پردازش حذف اطلاعاتی که ناقص هستند و یا مقاطعی که اطلاعات کیلومتر از بین دو ناحیه وارد نشده و یا صفر وارد شده است. انتخاب یک مجموعه از اطلاعات به عنوان داده های مرجع برای این کار صورت می گیرد که کل اطلاعات بر اساس این مجموعه از اطلاعات تصحیح شوند. در این پژوهش اولین زمان برداشت شده موجود به عنوان داده مرجع انتخاب شد. در گام آخر پس از یافتن بهترین فاصله تصحیح خطای کیلومتر از، اطلاعات بر مبنای اطلاعات مرجع تصحیح می شوند.

## ۲-۲- طبقه بندی داده ها

به منظور یکسان ساختن تأثیر دوره های مأموریت از یک سال به سال دیگر بر خط راه آهن، خطوط راه آهن باید به کلاس های مختلف طبقه بندی شوند. طبقه بندی خط بر اساس زیرساخت خط، ترافیک عبوری و موقعیت جغرافیایی ایده آل ترین روش طبقه بندی خطوط است. در این پژوهش، با فرض این که خطوط راه آهن برای بار محوری مشخصی طراحی شده اند و با استفاده از آمار سالنامه های

جدول ۲. طبقه‌بندی خطوط راه‌آهن ایران و اختصاص خطوط به کلاس‌ها

Table 2. Iranian Railway tracks classification and assigning existing railway tracks data to classes

شماره کلاس	تعداد بلاک	طول (کیلومتر)	شماره کلاس	تعداد بلاک	طول (کیلومتر)
۱	۲۹	۵۲۱	۱۰	۰	۰
۲	۶۰	۱۰۵۰	۱۱	۰	۰
۳	۸۰	۱۲۰۶	۱۲	۰	۰
۴	۲۶	۵۱۰	۱۳	۳۵	۶۲۹
۵	۳۷	۶۴۶	۱۴	۵۲	۱۱۱۹
۶	۰	۰	۱۵	۲۲	۶۱۰
۷	۱۱	۱۹۲	۱۶	۵۹	۱۳۶۰
۸	۲۷	۴۰۶	۱۷	۳۱	۵۵۴
۹	۰	۰	۱۸	۱۲	۳۹۲
مجموع				۴۸۱	۹۱۹۵

جدول ۳. شاخص‌های ارزیابی کیفیت خط [۲۴]

Table 3. Some of the most applicable track quality indices

شماره	شاخص ارزیابی کیفیت خط	توسعه دهنده	رابطه
۱	شاخص هندسی خط TGI <sup>1</sup>	راه‌آهن هند	$TGI = \frac{2UI + TI + 6AI + GI}{10}$
۲	شاخص W <sub>5</sub>	راه‌آهن اتریش	$W_5 = 1 - [(1 - W_a)(1 - W_l)(1 - W_t)(1 - W_c)(1 - W_g)]$
۳	شاخص J	راه‌آهن هلند	$J = \frac{S_z + S_r + S_w + 0.5S_e}{3.5}$
۴	شاخص CTR <sup>2</sup>	راه‌آهن هند	$CTR = 100 - (U + G + T + A)$
۵	شاخص TQI <sup>3</sup>	استاندارد ایمنی خط فدرال <sup>۴</sup>	$TQI = (\frac{L_s}{L_0} - 1) \times 10^6$

1 Track Geometric Index

2 Combined Track Records

3 Track Quality Index

4 Federal Track Safety standards (FTSS)

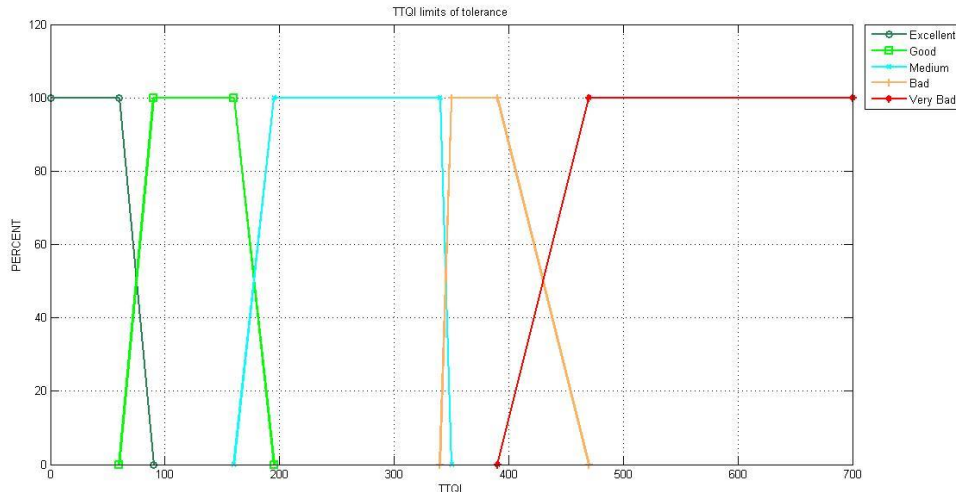
### ۳- شاخص کیفیت خطوط راه‌آهن

محمودی فرد با استفاده از مدل‌های آماری و داده کاوی، یک شاخص کیفیت خط (TTQI<sup>1</sup>) برای راه‌آهن پیشنهاد کرده است. این شاخص که اقتباسی از شاخص TQI است به صورت زیر تعریف گردیده است [۲۳]:

$$TTQI = 0.495\sqrt{(LLL \times LLR)} + 0.023(GAU \times XLV) + 1.299\sqrt{(ALL \times ALR)} + 0.037(TWS3.5)^u \quad (2)$$

ارزیابی سطح کیفیت خط آهن بر اساس تحلیل پارامترهای هندسی خط صورت می‌گیرد. بدین منظور پارامترهای هندسی خط توسط ماشین‌های اندازه‌گیر یا سایر تجهیزات، اندازه‌گرفته می‌شوند و با استفاده از داده‌های به دست آمده شاخص‌های هندسی خط محاسبه می‌شوند. این شاخص‌ها شامل یک یا چند پارامتر هندسی خط مانند عرض خط، پروفیل خط، تراز افقی خط، دور و اعوجاج می‌باشند. تعدادی از کاربردی‌ترین شاخص‌های ارزیابی کیفیت خط در ایران در «جدول ۳» آورده شده‌اند.

1 Total Track Quality Index



شکل ۴. حدود رواداری شاخص TTQI [۲۳]  
Fig. 4. TTQI tolerance limit [23]

بر حسب سن آن‌ها، در بسیاری از پژوهش‌ها رویکردهایی به شکل برون‌یابی و یا برازش غیر خطی را به منظور تولید مدل‌های پیش‌بینی شرایط خط به کار گرفته‌اند. مدل‌های برون‌یابی، ذات مدل ماهیتی قطعی دارد. همچنین در مدل‌های برازش، اغلب شکل تابع مشخصی، به طور معمول مدل‌های نمایی و یا چندجمله‌ای، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰].

فرایند مارکوف این خصوصیات را واضح‌تر و مفهومی‌تر بیان می‌کند. البته این وضوح به انتخاب درست پارامترها و درک صحیح از فرایند مارکوف بستگی دارد. به صورت تئوری، با افزایش سن یا ترافیک، تغییرات در شرایط خط، سرانجام به صفر میل می‌کند، زیرا که خطوط با افزایش سن به سمت حالت کاملاً زوال یافته حرکت می‌کنند مگر آنکه مورد تعمیر قرار گیرند. مفهوم مهمی به نام دوره ماموریت یا دوره مکرر بهره برداری در مدل زوال تجمعی پیشنهادی باگدانوف عنوان گردید [۲۵]. زوال به شکل تجمعی در این دوره صورت می‌گیرد. بدین خاطر در این پژوهش دوره ماموریت برای خط راه‌آهن یک سال در نظر گرفته شده‌است. که طی آن ترافیک عبوری و شرایط جوی عوامل تغییر شاخص کیفیت خط (کاهش کیفیت خط) خواهند بود.

فرض اساسی برای یک فرایند مارکوف به این شرح است که تغییر شاخص کیفیت خط (بدتر شدن وضعیت) در انتهای یک دوره ماموریت به صورت احتمالی فقط به مقدار شاخص کیفیت در آغاز

در رابطه‌ی ۲ داریم:

TTQI شاخص کلی کیفیت خط آهن، LLL و LLR شاخصه مربوط به تراز طولی راست و چپ، GAU شاخصه‌ی مربوط به عرض خط، XLV شاخصه مربوط به دور، ALL و ALR شاخصه‌های مربوط به راستای خط در چپ و راست TWS3.5 شاخصه‌ی مربوط به پیچش.

حدود رواداری این شاخص جدید در شکل ۴ ذکر گردیده است [۲۳].

این حدود رواداری را به صورت فازی نشان می‌دهد. بدین ترتیب که ممکن است قسمتی از خط با توجه به نمودار درصدی از یک حالت و درصدی از حالت دیگر خود باشد. در مقاله [۲۴] نشان داده شده‌است که شاخص توانست ۷۸ درصد شرایط و وضعیت منطقه را با توجه به نظرات کارشناسان به خوبی بیان نماید.

#### ۴- مدل مارکوف به منظور توصیف پیش‌بینی زوال خطوط راه‌آهن

با توجه به عدم قطعیت در بسیاری از پارامترهای تأثیرگذار برای توصیف روند زوال در خطوط راه‌آهن، یک مدل احتمالی مورد نیاز است. ضمن این‌که در همه کارهای پیشین هم از ضروری بودن پیش‌بینی شرایط خط در فرایند تصمیم‌گیری جهت تعمیر و نگهداری یاد شده‌است. با داشتن شرایط خطوط راه‌آهن در بخش‌های مختلف

جدول ۴. طبقه‌بندی حالت خط متناظر با شاخص TTQI

Table 4. The track state classification corresponding to TTQI index

شاخص TTOI	کیفیت خط	حالت خط
۰ تا ۷۵	عالی	۱
۷۵ تا ۱۷۷.۵	خوب	۲
۱۷۷.۵ تا ۳۴۵	متوسط	۳
۳۴۵ تا ۳۹۰	بد	۴
۳۹۰ تا ۴۷۰	محدوده بین بد و بسیار بد	۵
۴۷۰ و بیشتر	بسیار بد	۶

حاضر عدد ۱ (یک سال) فرض شده است ( $h=1$ ). این احتمالات می‌توانند در یک ماتریس انتقال،  $P$ ، قرار گیرند که احتمالات انتقال حالات ممکن مختلف را توضیح دهد. همان‌طور که گفته شد هر درایه از ماتریس ذکر شده در رابطه (۴) بیانگر یک احتمال انتقال است. بررسی‌های مختلف نشان داده است که ممکن است خط راه‌آهن در پایان دوره مأموریت در حالت خود باقی بماند یا ممکن است به حالت بعدی نزول کند. فرض این‌که خط راه‌آهن به دو حالت یا بیشتر پایین‌تر انتقال یابد (نزول کند) در این پژوهش با توجه بررسی اطلاعات و نتایج شاخص‌های کیفیت صفر فرض گردید. بنابراین عملاً ماتریس انتقال به صورت ماتریس (۵) می‌شود.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & P_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{55} & P_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

در عین حال اگر امکان گذر به حالتی از حالت پایین‌تر بعدی در

دوره مأموریت وابسته است و مستقل از اتفاقات و رویدادهایی است که پیش از شروع دوره مأموریت رخ داده و انباشته شده‌است.

در این مطالعه، از شاخص TTQI که در بخش پیشین بیان گردید، استفاده شده‌است. این شاخص از عدد ۰ (صفر) که نمایان‌گر وضعیت بهترین شرایط خط است تا عدد ۴۷۰ که آستانه خرابی کامل (وضعیت بسیار بد) است تغییر می‌کند. همان‌طور که در بخش قبل بحث شد حدود رواداری این شاخص به صورت فازی ارائه شده‌است. فازی بودن به این معنی است که مرز مشخصی بین حالات کیفیت خط وجود ندارد.

در «جدول ۴» طبقه‌بندی حالت خط برای استفاده در دستیابی به مدل مارکوف آورده شده‌است.

ماتریس انتقال یا ماتریس احتمال انتقال، مولفه اساسی یک زنجیره مارکوف است. درایه‌های این ماتریس هر یک بیانگر مفهومی هستند که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. فرض کنید خط راه‌آهن در حالت  $i$  در ابتدای دوره  $i$  مأموریت قرار دارد. احتمال باقی ماندن در حالت  $i$  و احتمال رفتن به حالت بعدی  $i+1$ ، به ترتیب  $p_{ii}=p_i$  و  $p_{ij}=q_i$  است.

$$p_{ii} = p_i = \text{Prob}[x(t+h) = i | x(t) = i] \quad (3)$$

$$p_{ij} = q_i = \text{Prob}[x(t+h) = j | x(t) = i]$$

$$\text{or } p_{ij} = q_i = \text{Prob}[x(t+h) = i+1 | x(t) = i]$$

$$q_i = 1 - p_i$$

که در رابطه (۳) مقدار  $h$  طول دوره مأموریت است که در پژوهش

جدول ۵. درایه‌های قطر اصلی ماتریس‌های انتقال

Table 5. Diagonal elements of transition matrices for the classes of tracks

کلاس خط	P <sub>11</sub>	P <sub>22</sub>	P <sub>33</sub>	P <sub>44</sub>	P <sub>55</sub>
K=1	۰/۸۲۱۶	۰/۷۱۱۱	۰/۵۸۲۷	۰/۳۲۷۱	۰/۳۱۰۷
K=2	۰/۸۴۴۲	۰/۷۰۰۷	۰/۶۱۳۷	۰/۴۱۷۴	۰/۱۱۲۴
K=3	۰/۸۹۷۲	۰/۷۵۵۲	۰/۵۶۲۴	۰/۳۴۱۰	۰/۱۴۳۹
K=4	۰/۸۳۴۲	۰/۶۹۲۱	۰/۶۰۲۳	۰/۳۷۴۶	۰/۲۷۵۲
K=5	۰/۷۸۲۴	۰/۶۸۸۵	۰/۵۳۶۴	۰/۳۴۸۸	۰/۲۴۰۰
K=7	۰/۸۳۲۰	۰/۷۳۷۶	۰/۵۴۳۵	۰/۳۶۶۹	۰/۱۷۵۴
K=8	۰/۸۳۷۳	۰/۶۸۲۹	۰/۵۹۶۷	۰/۳۸۲۰	۰/۱۴۵۷
K=13	۰/۷۹۲۳	۰/۶۹۳۱	۰/۵۶۲۷	۰/۴۲۳۷	۰/۱۹۱۳
K=14	۰/۸۱۴۲	۰/۷۳۲۹	۰/۶۰۳۷	۰/۳۹۱۳	۰/۱۳۹۵
K=15	۰/۸۶۳۶	۰/۷۲۷۱	۰/۵۷۲۳	۰/۳۸۴۳	۰/۱۹۹۳
K=16	۰/۸۱۲۲	۰/۷۰۸۴	۰/۶۲۷۷	۰/۳۹۵۵	۰/۲۳۲۱
K=17	۰/۷۴۴۴	۰/۶۶۲۵	۰/۵۲۹۱	۰/۳۶۲۷	۰/۲۵۵۷
K=18	۰/۷۳۲۴	۰/۶۲۷۱	۰/۴۴۲۳	۰/۳۷۲۵	۰/۱۵۲۴

گذر برپایه اطلاعات در دسترس TTQI در بازه‌های زمانی مختلف، رویکرد کواسی-نیوتن مورد استفاده قرار گرفت. یکی از روش‌های کواسی - نیوتن الگوریتم پیشنهادی فلچر و پاول است. این الگوریتم کار خود را با یک ماتریس انتقال پیشنهادی اولیه آغاز می‌کند و در یک فرایند تکراری سعی در یافتن ماتریسی دارد که تابع هدف را بهینه می‌کند [۲۶].

در این پژوهش، یک بلاک به عنوان کوچکترین واحد تعمیر و نگهداری در نظر گرفته شده است. فاصله بین دو نقطه جدایی (ایستگاه، علائم ارتباطات) در خطوط راه‌آهن که فقط یک قطار می‌تواند در آن قرار گیرد بلاک گفته می‌شود. به منظور محاسبه ماتریس‌های انتقال، شاخص TTQI به تفکیک بلاک‌ها و در کلاس‌های مربوطه در دوره‌های مختلف مورد نیاز است که همانگونه که در بخش قبل ذکر گردید این اطلاعات در این پژوهش فراهم شد. اطلاعات شاخص TTQI برای اطلاعات ماشین اندازه‌گیر خط EM120 برای تمام نواحی راه‌آهن ایران برای سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۲ محاسبه گردیده است. بدین ترتیب، برای هر کلاس خط یک ماتریس گذر محاسبه گردید که درایه‌های قطر اصلی آن در «جدول ۵» نمایش داده شده است. لازم به ذکر است، بر مبنای اطلاعات موجود برخی از کلاس‌ها دارای اطلاعات کافی نبوده تا

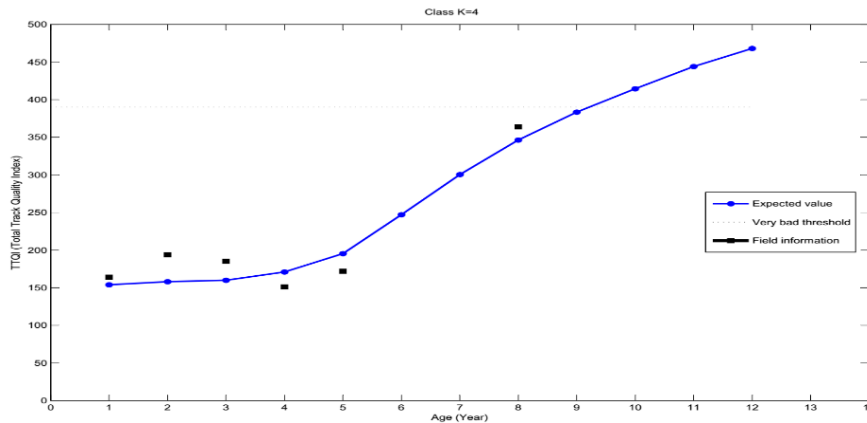
طی یک دوره ی ماموریت معنا دار باشد، یک ردیف قطری غیرصفر سومی را نیز می‌توان به این ماتریس اضافه کرد. وارد کردن عدد ۱ در گوشه پایین سمت راست ماتریس به این علت است که حالت ۶ یک حالت جذاب است؛ بدین معنی که خط بدون عملیات تعمیر نمی‌تواند از این حالت بگریزد.

در تئوری زنجیره مارکوف بیان شده است که بردار حالت در زمانی در آینده را می‌توان از ماتریس انتقال و بردار حالت اولیه به شکل زیر محاسبه کرد:

$$p(t) = P(0) * P^t \quad \text{or} \quad p(t+n) = p(t) * P^n \quad (6)$$

در این قسمت مسئله اصلی یافتن ماتریس احتمال انتقال یا ماتریس گذر P است. ساختن این ماتریس و به دست آوردن تک تک احتمال‌های انتقال از اطلاعات شرایط خط راه‌آهن کار دشوار و پیچیده ای است. البته داشتن حجم زیاد اطلاعات که در بردار حالت p(t) قرار می‌گیرد، تلاش برای یافتن ماتریس انتقال را ارزشمندتر خواهد کرد.

در این مطالعه، برای تعیین ماتریس گذر P از اطلاعات شاخص TTQI استفاده شد. به منظور دست یافتن به ماتریس احتمال



شکل ۵. مقایسه شاخص کیفیت مورد انتظار خط بر اساس مدل زوال تجمعی و اطلاعات میدانی شرایط خط (k=۴)

Fig. 5. Comparison of expected track quality index values based on cumulative deterioration model and field information (k = 4)

نگهداری خط راه‌آهن، مدل هزینه دوره عمر بالاست به چهار بخش هزینه عملیات زیرکوبی، هزینه نوسازی، هزینه بازرسی و هزینه عدم دسترس بودن خط به هنگام خرابی شدید تقسیم می‌شوند. به طور کلی شکل عمومی مدل هزینه بالاست به صورت زیر است:

$$TLCC_{Ballast} = TLCC_{Tamp} + TLCC_{Renewal} + TLCC_{Inspection} + TLCC_{Unavailability} \quad (7)$$

$TLCC_{Tamp}$ : کل هزینه دوره عمر برای عملیات‌های زیرکوبی،  
 $TLCC_{Renewal}$ : کل هزینه دوره عمر نوسازی،  
 $TLCC_{Inspection}$ : کل هزینه دوره عمر بازرسی، و  
 $TLCC_{Unavailability}$ : کل هزینه دوره عمر عدم دسترس بودن خط است.

#### • هزینه‌ی عملیات زیرکوبی

برای ارزیابی هزینه دوره عمر بالاست، نیاز است فرایندهای زوال هندسه خط را درک کرد، زیرا زوال هندسه مسیر به شدت به پدیده زوال بالاست بستگی دارد. بسیاری از مطالعات تجربی نشان داده‌اند که پدیده زوال هندسه مسیر ممکن است در دو مرحله متفاوت رخ بدهد [۲۷]. یکی از آنها به طور مستقیم بعد از عملیات زیرکوبی، که در آن نشست خط نسبتاً سریع است (تقریباً تا ۲ میلیون تن بار ناخالص)؛ در حالی که فاز دیگر خیلی کندتر است و ارتباط بین افت کیفیت (نشست خط) و زمان (یا تناژ) تقریباً خطی است [۲۷]. با داشتن نرخ تغییر کیفیت (نرخ زوال) و همچنین کیفیت اولیه رابطه

بتوان مدل مارکوف را برای آن‌ها پیشنهاد داد، از این رو در «جدول ۵» تمامی کلاس‌ها حضور ندارند.

در شکل ۵ اطلاعات مشاهده شده در کنار مقادیر قابل انتظار محاسبه شده بر اساس ماتریس احتمال انتقال («جدول ۵») برای یک کلاس خط، به عنوان نمونه، نشان داده شده است. اخیراً جهت آزمایش مدل‌ها اطلاعاتی جدید از راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران برای سال ۱۳۹۵، یعنی سال ۸ م از مبنای سال ۱۳۸۸، اخذ شد. این اطلاعات دارای مشکلاتی است. به عنوان مثال یکی از مشکلات این است که اطلاعات اخذ شده فقط برای دو کلاس ۴ و ۱۵ دارای اطلاعات صحیح و کامل است. به همین دلیل در «شکل ۵» اطلاعات کلاس ۴ برای نمونه آورده شده است.

#### ۵- مدل هزینه‌ی دوره‌ی عمر خط در عملیات نگهداری منطبق بر شرایط ایران

از آنجایی که در ایران غالباً به فعالیت‌های تعمیر و نگهداری حول بالاست و ریل پرداخته می‌شود، به دلیل داشتن اطلاعات موثق در زمینه هزینه نگهداری و تعمیر ریل و بالاست، در این پژوهش صرفاً مدل هزینه دور عمر تعمیر و نگهداری بالاست و ریل مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که مدل هزینه دوره عمر بالاست و ریل توسعه یافته مدل‌های موجود در ادبیات موضوع هستند.

#### ۵-۱- مدل هزینه دوره عمر بالاست

به دلیل اندرکنش قابل توجه بالاست به عنوان جزء مهم و قابل

خطی برای هر واحد عملیات نگهداری و تعمیر که بیشتر ذکر گردید به صورت رابطه (۸) قابل بیان است:

$$TTQI = C_1 + C_0 T \quad (8)$$

در این رابطه:

$TTQI$ : شاخص کیفیت خط برای واحد عملیات نگهداری و تعمیر مشخص،

$C_1$ : شاخص کیفیت اولیه بعد از عملیات زیرکوبی یا نوسازی،

$C_0$ : نرخ تغییر شاخص کیفیت خط آهن (نرخ زوال)، و

$T$ : زمان بین عملیات‌های زیرکوبی (یا تناژ تجمعی بین عملیات‌های زیرکوبی) است.

با توجه به پارامترهای درگیر در رابطه فوق، رابطه (۹) جهت برنامه ریزی عملیات‌های زیرکوبی پیشنهاد می‌شود:

$$T_i = \frac{TTQI_{lim} - C_{1i}}{C_{0i}} + \varepsilon \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

$$C_{1i} = C_1 \cdot (1 + r_1)^{(i-1)} \quad *** \quad C_{0i} = C_0 \cdot (1 + r_0)^{(i-1)}$$

که:

$T_i$ : زمان سپری شده  $i$  امین عملیات زیرکوبی (تناژ  $i$  امین عملیات زیرکوبی)،

$TTQI_{lim}$ : حد شاخص که با رسیدن به آن عملیات زیرکوبی برنامه ریزی می‌شود،

$C_{1i}$ : شاخص کیفیت اولیه قبل از عملیات زیرکوبی  $i$  ام،

$C_{0i}$ : نرخ تغییر شاخص کیفیت خط آهن (نرخ زوال) در دوره قبل

از عملیات زیرکوبی  $i$  ام،

$r_1$ : نرخ تغییر  $C_1$  در دوره‌های زیرکوبی متفاوت،

$r_0$ : نرخ تغییر  $C_0$  در دوره‌های زیرکوبی متفاوت، و

$\varepsilon$ : دوره افت شدید کیفیت (تقریباً ۲ میلیون تن بار ناخالص) است.

با داشتن مجموعه ( $i = 1, 2, \dots, T_1 = 0, \dots$ ) که با توجه به اطلاعات

موجود در پایگاه داده هر مطالعه می‌تواند زمان یا تناژ بار باشد،

محاسبه هزینه دوره عمر عملیات زیرکوبی برای هر کیلومتر از خط از

رابطه‌ی ۱۰ می‌تواند محاسبه شود:

$$LCC_{tamp} = \sum_{i=1}^N \frac{C_{tamp}}{(1+r)^{T_i}} (Time) \quad (10)$$

$$or \ LCC_{tamp} = \sum_{i=1}^N \frac{C_{tamp}}{(1+r)^{\left[ \frac{T_i^{accum}}{T_{year}} \right]}} (Tonnage)$$

که:

$LCC_{tamp}$ : هزینه‌ی دوره عمر برای عملیات‌های زیرکوبی در طول

یک کیلومتر،

$C_{tamp}$ : متوسط هزینه زیرکوبی یک کیلومتر خط آهن،

$r$ : نرخ بهره،

$T_i$ : زمان  $i$  امین عملیات زیرکوبی،

$T_i^{accum}$ : تناژ تجمعی تا  $i$  امین عملیات زیرکوبی،

$T_{year}$ : تناژ تجمعی سالیانه، و

$N$ : آخرین عملیات زیرکوبی تا نوسازی بالاست است.

زمانی می‌رسد که تعداد تقاضای عملیات زیرکوبی بالا می‌رود،

این به معنای افت کیفیت بیش از حد بالاست در بازه‌های زمانی

کوتاه است و در این موقعیت انجام عملیات زیرکوبی تاثیر زیادی بر

کیفیت بالاست نخواهد گذاشت، بنابراین بالاست نیاز به نوسازی دارد.

یافتن زمان یا تناژ نوسازی بالاست ( $T_{renewal}$ ) از جمله مقادیری است

که دارای عدم قطعیت است. این مقدار در تعیین تعداد عملیات‌های

زیرکوبی هم تاثیر گذار است. از چالش‌های موجود در مسئله حاضر

برای کارهای آتی تحلیل قابلیت اعتماد جهت تعیین بازه اطمینان این

عدد است. در نتیجه هزینه کل دوره عمر عملیات زیرکوبی برای کل

خط مورد نظر به صورت زیر است:

$$TLCC_{tamp} = \frac{\sum_{k=1}^M LCC_{tamp,k}}{T_{renewal}} \quad (11)$$

که:

$TLCC_{tamp}$ : کل هزینه دوره عمر برای عملیات‌های زیرکوبی برای

$M$  کیلومتر خط و

$T_{renewal}$ : زمان یا تناژ نوسازی بالاست است

• هزینه‌ی عملیات نوسازی



پس از این که تقاضای عملیات زیرکوبی بیش از حد شود، بالاست نیاز به نوسازی دارد. در عمل فاصله زمانی بین عملیات زیرکوبی بسیار کوتاه می‌شود. از آنجایی که هزینه نوسازی بالاست یک بار، آن هم در انتهای دوره عمر لحاظ می‌شود، لذا نیاز است هزینه دوره عمر بر اساس زمان یا تناژ نوسازی بالاست ( $T_{renewal}$ ) بیان گردد. مدل هزینه دوره عمر برای عملیات نوسازی بالاست به صورت زیر است:

$$LCC_{Inspection} = \sum_{i=1}^N \frac{c_{inspection} \cdot n_{inspection}}{(1+r)^i} \quad (14)$$

$$N = \left[ \frac{T_{renewal(tonnage)}}{T_{year}} \right] = T_{renewal(time)}$$

$LCC_{Inspection}$ : هزینه‌ی دوره عمر برای عملیات بازرسی یک کیلومتر خط،

$c_{inspection}$ : متوسط هزینه بازرسی یک کیلومتر خط آهن،  
 $n_{inspection}$ : تعداد بازرسی در سال،  
 [ ]: نشان دهنده جز صحیح است.

در نهایت هزینه‌ی کل دوره عمر عملیات بازرسی کل یک خط به صورت زیر می‌تواند محاسبه شود:

$$TLCC_{Inspection} = \frac{\sum_{k=1}^M LCC_{Inspection,k}}{T_{renewal}} \quad (15)$$

$TLCC_{Inspection}$ : کل هزینه دوره عمر بازرسی M کیلومتر خط است.

• هزینه‌ی دوره‌ی عمر عدم در دسترس بودن خط راه آهن یکی از هزینه‌های دوره عمر مهم که نبایستی نادیده شود، هزینه‌ی عدم در دسترس بودن زیرساخت خط است. بیشتر عملیات‌های تعمیر و نگهداری جاری (به عنوان مثال عملیات زیرکوبی) در طول زمان غیر عملیاتی (زمان تعمیر و نگهداری شبانه) انجام می‌شود، بنابراین مخل ترافیک نیستند. با این حال، هر زمان که تعداد عملیات‌های زیرکوبی بیشتر شوند، باعث تداخل عملکرد معمولی خط، تأخیر و حتی لغو برنامه حرکت قطارها می‌شوند. در حقیقت، مدیران برای عملکرد نادرست در دسترس بودن خط جریمه تعیین می‌کنند. این فرآیندها می‌توانند یک رفتار نمایی داشته باشند، به این معنا که وقتی مدت زمان عدم دسترسی افزایش یافت، جریمه‌ها شدیدتر می‌شوند [۲۸]. بیان مدل هزینه عدم در دسترس بودن نیازمند اطلاعاتی در مورد تاریخچه خط موردنظر است. در عین حال، در این پژوهش صرفاً

$$LCC_{Renewal} = \frac{c_{renewal}}{(1+r)^{T_{renewal(time)}}} (Time) \quad (12)$$

$$or LCC_{Renewal} = \frac{c_{renewal}}{(1+r)^{\left[ \frac{T_{renewal(tonnage)}}{T_{year}} \right]}} (Tonnage)$$

که در این رابطه:

$LCC_{Renewal}$ : هزینه دوره عمر نوسازی یک کیلومتر خط آهن،

$c_{renewal}$ : متوسط هزینه نوسازی یک کیلومتر خط آهن،

$T_{renewal(time)}$ : زمان نوسازی بالاست بر مبنای سال، و

$T_{renewal(tonnage)}$ : زمان نوسازی بالاست بر مبنای میلیون تن بار

ناخالص است.

در نتیجه هزینه کل دوره عمر نوسازی برای کل خط مورد نظر به صورت زیر است:

$$TLCC_{Renewal} = \frac{\sum_{k=1}^M LCC_{Renewal,k}}{T_{renewal}} \quad (13)$$

در این رابطه:

$TLCC_{Renewal}$ : کل هزینه دوره عمر نوسازی M کیلومتر خط

است.

• هزینه‌ی عملیات بازرسی

در این قسمت جهت بررسی دقیق‌تر مدل هزینه چرخه عمر بالاست بهتر است عملیات بازرسی هندسی نیز مورد بررسی قرار بگیرد. این عملیات که در این تحقیق همان بازدید و برداشت ماشین اندازه‌گیر فرض شده‌است، به صورت دوره‌ای انجام می‌پذیرد. مدل هزینه دوره عمر این عملیات برای هر کیلومتر خط به صورت زیر

است بالاست خطوط راه آهن به دلایل کمبود تجهیزات، نبود سرمایه و نیروی انسانی همچنان پس از رسیدن به تناژ آستانه نیز مورد استفاده قرار بگیرد. اینجا است که هزینه عدم در دسترس بودن معنا پیدا می کند.

• جمع بندی مدل هزینه دوره عمر بالاست

با داشتن هزینه های مرتبط با دوره عمر اقتصادی بالاست، می توان مجموع هزینه های چرخه عمر در هر قسمت را به صورت رابطه ی ۳ که پیش تر گفته شد بیان کرد. در این قسمت پیاده سازی مدل بر روی قسمتی از اطلاعات موجود صورت می گیرد. مقادیر اتخاذ شده برای سایر پارامترهای مدل در جداول ۶ تا ۸ ذکر شده است.

۵-۲- مدل هزینه دوره عمر ریل

در این قسمت مدل هزینه دوره عمر ریل ژائو و همکاران پس از اصلاح ارائه گردید [۲۷]. در ادامه تلاش شده است مدل LCC بالاست

مدل هزینه دوره عمری ارائه می گردد که وابسته به  $T_{renewal}$  است. با این توضیح، هزینه های غیرقابل دسترس بودن زیرساخت های موجود در طول دوره عمر خط به صورت زیر می تواند محاسبه شود:

$$TLCC_{Unavailability} = \begin{cases} 0 & T_{renewal} < T_{disruptive} \\ (500 \cdot 10^6) e^{0.015 \cdot T_{renewal}} & T_{renewal} \geq T_{disruptive} \end{cases} \quad (16)$$

که :

$TLCC_{Unavailability}$ : کل هزینه دوره عمر عدم در دسترس بودن M کیلومتر خط و

$T_{disruptive}$ : تناژی که از آنجا به بعد شرایط عادی خط آهن مختل می شود است.

توجه داشته باشید که تعیین تناژ آستانه ( $T_{disruptive}$ ) به عواملی نظیر تجهیزات تعمیر و نگهداری، تیم های منابع انسانی و گستره خط مورد تعمیر بستگی دارد. این نکته را باید در نظر گرفت که ممکن

جدول ۶. هزینه های به کارگیری ماشین آلات مکانیزه تعمیر و نگهداری برای هر کیلومتر خط بالاستی (فهرست بها سال ۱۳۹۶)

Table 6. The mechanized repair and maintenance machinery costs for the ballasted track (one kilometer)

هزینه کل (ریال)	مقدار	واحد	نوع عملیات
۳۱,۳۹۶,۰۰۰	۱	کیلومتر	رلواژ خط با ماشین آلات مکانیزه و تنظیم رقوم مختصاتی و ارتفاعی و زیرکوبی
۱۹,۰۹۲,۰۰۰	۱	کیلومتر	تثبیت خط با ماشین آلات مکانیزه
۱۶,۴۳۶,۰۰۰	۱	کیلومتر	تنظیم شانه بالاست و خط آرایی با ماشین آلات مکانیزه
۶۶,۹۲۴,۰۰۰	مجموع عملیات زیرکوبی یک کیلومتر (ریال) ( $C_{lamp}$ )		

جدول ۷. ضرایب و پارامترهای مدل هزینه دوره عمر بالاست برای کلاس K=4

Table 7. The ballast life cycle cost model parameters and coefficient (K=4)

مقدار	پارامتر مدل
۱۶۵	$C_1$ - اولین شاخص کیفیت
۳۰	$C_0$ - نرخ تغییر شاخص کیفیت (بر سال)
۰.۱۲	$r_1$ - نرخ تغییر $C_1$
۰.۰۵	$r_0$ - نرخ تغییر $C_0$
۲۵۰	$TTQI_{lim}$ - حد شاخص جهت زیرکوبی
۶٪	$r$ - نرخ نزول بانکی
۱۶	$T_{year}$ - تناژ تجمعی سالیانه (MGT)

جدول ۸. ادامه ضرایب و پارامترهای مدل هزینه دوره عمر بالاست برای کلاس K=۴

Table 8. The ballast life cycle cost model parameters and coefficient (K=4) (Continued)

مقدار	پارامتر مدل
۱,۵۰۰,۰۰۰,۰۰۰	$C_{renewal}$ - هزینه نوسازی بالاست یک کیلومتر خط (ریال)
۱۰,۰۰۰,۰۰۰	$C_{inspection}$ - هزینه بازرسی یک کیلومتر خط (ریال)
۲	$n_{inspection}$ - تعداد بازرسی در سال
۱۲۵	$T_{disruptive}$ - تناژ آستانه (MGT)

$$T_n: \text{تناژ تجمعی در سال } n \text{ ام، } T_N=0, T_0=1, N = \left\lfloor \frac{T}{T_{year}} \right\rfloor \text{ که } [ ] \text{ نشان دهنده جز صحیح است.}$$

### ۵-۳- مدل هزینه دوره عمر یکپارچه ریل و بالاست

اگرچه هر دو مدل LCC ریل و بالاست به طور جداگانه مورد بحث قرار گرفتند، اما بهتر است یک روش یکپارچه توسعه داده شود. درک خروجی هر دو مدل باعث تعیین بهترین زمان نوسازی (به صورت تناژ تجمعی) برای هر دو جزء می‌شود. یک راه سریع برای ادغام هر دو مدل هزینه بر مبنای ساختن سناریوهای فرضی با زمان‌های مختلف نوسازی برای هر جزء است، در حالی که مقدار کل هزینه دوره عمر (ریل+بلاست) در هر تناژ برای هر سناریو کمترین مقدار ممکن باشد. مدل یکپارچه ریل و بالاست به صورت رابطه (۱۹) پیشنهاد می‌گردد.

$$TLCC_{rail+ballast} = \frac{1}{T_{rail}} \left\{ T_{ballast1} \times TLCC_{ballast}(T_{ballast1}) + T_{ballast2} \times \frac{TLCC_{ballast}(T_{ballast2})}{(1+r)^{\lfloor \frac{T_{ballast2}}{T_{year}} \rfloor}} + T_{ballast3} \times \frac{TLCC_{ballast}(T_{ballast3})}{(1+r)^{\lfloor \frac{T_{ballast3}+T_{ballast2}}{T_{year}} \rfloor}} + T_{rail} \times TLCC_{rail}(T_{rail}) \right\} \quad (19)$$

که در این رابطه:

$TLCC_{rail+ballast}$ : هزینه دوره عمر یکپارچه ریل و بالاست،

$T_{rail}$ : تناژ تجمعی نوسازی ریل، و

$T_{ballast1}, T_{ballast2}, T_{ballast3}$ : تناژ تجمعی نوسازی اولین و دومین و سومین نوسازی بالاست است.

طبق رابطه (۱۹) و با توجه به اعداد نوسازی مدل‌های هزینه ریل و بالاست پیشنهاد می‌گردد سومین نوسازی بالاست به طور همزمان با نوسازی ریل صورت پذیرد. از طرفی دیگر هزینه نوسازی دومین

قسمت قبل و مدل LCC ریل یکپارچه گردد. در مدل ژائو هزینه‌های نوسازی ریل، بازرسی، سنگ زنی، تعمیر خرابی و خروج از خط لحاظ شده‌است. با توجه به شرایط موجود و همچنین در نظرگیری هزینه بازرسی در مدل هزینه‌ی دوره عمر بالاست، مدل اصلاح شده هزینه دوره عمر ریل ژائو به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$LCC(T) = \frac{1}{T} \left( c_{renewal} + \frac{C_{renewal} \times T}{S_{grinding}} + c_{defect} \times N_{defect}(T) \right) \quad (17)$$

که:

$LCC(T)$ : هزینه دور عمر در پایان دوره عمر  $T$  بر واحد میلیون

تن ناخالص،

$c_{renewal}$ : هزینه نوسازی یک کیلومتر ریل،

$c_{grinding}$ : هزینه سنگ زنی یک کیلومتر ریل،

$S_{grinding}$ : بازه سنگ زنی،

$T$ : تناژ نوسازی ریل (میلیون تن ناخالص)

$c_{defect}$ : متوسط هزینه تعمیر هر خرابی، و

$N_{defect}$ : تعداد خرابی‌ها تشخیص داده شده در بازه  $(t, 0)$  است.

برای این که بتوان هزینه حاضر را تخمین زد باید ارزش پول را

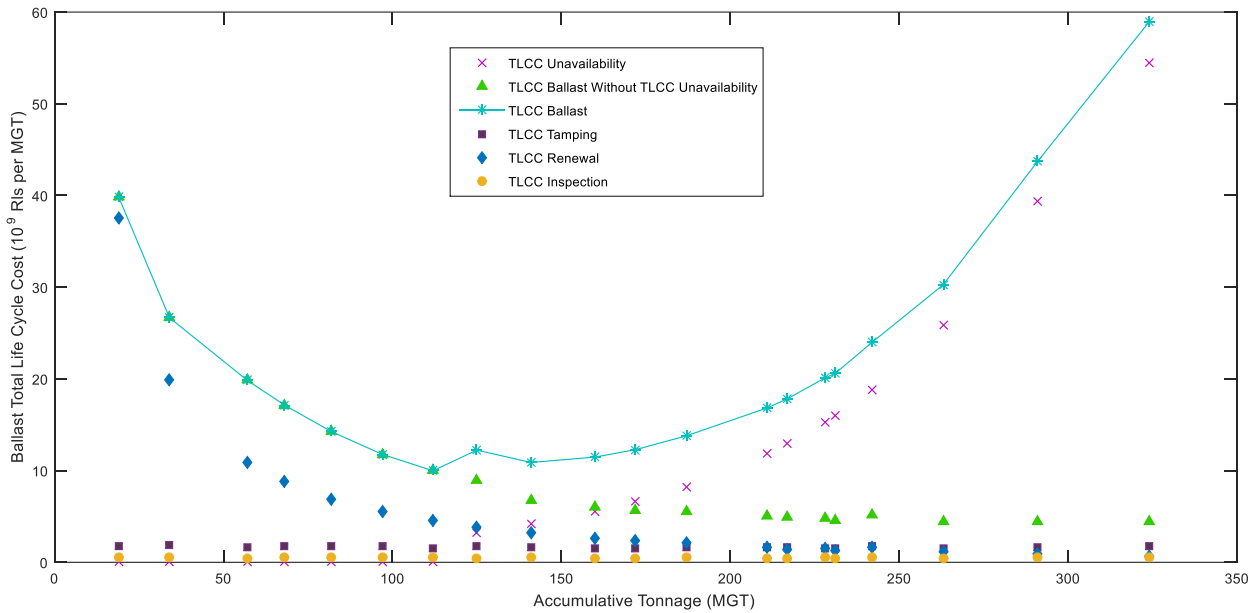
نیز در نظر گرفت. در نتیجه هزینه دوره عمر به صورت رابطه‌ی ۱۸

می‌تواند محاسبه شود:

$$LCC_0(T) = \frac{1}{T} \left\{ \frac{c_{renewal}}{(1+r)^{\lfloor \frac{T}{T_{year}} \rfloor}} + \sum_{n=0}^N \frac{T_n \cdot LCC(T_n) - T_{n-1} \cdot LCC(T_{n-1})}{(1+r)^{\lfloor \frac{T_n}{T_{year}} \rfloor}} \right\} \quad (18)$$

$LCC_0(T)$ : هزینه حاضر  $LCC(T)$ ،

$T_{year}$ : تناژ تجمعی سالیانه،



شکل ۶. کل هزینه دوره عمر بالاست بر واحد تناژ برای کلاس  $(TLCC_{ballast}, K=4)$   
 Fig. 6. The ballast total life cycle cost per unit tonnage (k=4)

نتیجه می‌شود که عمر نوسازی بالاست حدوداً ۶ تا ۱۰ سال است. هزینه دوره عمر بالاست در این بازه تقریباً معادل ۱۲ میلیارد ریال بر واحد تناژ است. در این قسمت مشخص شد که تأثیر مقدار تناژ نوسازی بالاست بر هزینه نوسازی بالاست و عدم در دسترس بودن خط بیشتر از هزینه بازرسی و زیرکوبی است.

در ادامه با توجه پارامترهای فرض شده مدل هزینه دوره عمر ریل ذکر شده برای یک کیلومتر از خط محاسبه گردید و نتیجه آن که هزینه دوره عمر ریل برای یک کیلومتر خط است در شکل ۷ قابل نمایش است. مقادیر فرض شده پارامترها در جدول ۹ آمده است.

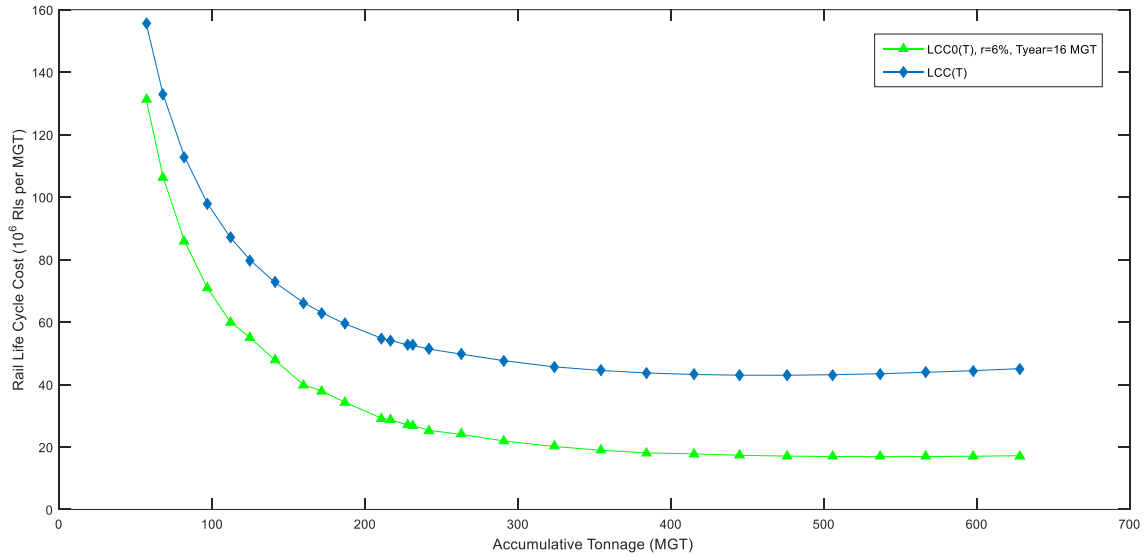
همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود حداقل میزان هزینه دوره عمر در تناژ ۴۷۵ میلیون تن ناخالص رخ می‌دهد. میزان هزینه دوره عمر بر واحد میلیون تن ناخالص در این تناژ، ۴۲/۹۷ میلیون ریال است. مقدار حداقل هزینه دوره عمر با اعمال هزینه حاضر و نرخ بهره و تناژ سالیانه، در تناژ ۵۴۰ میلیون تن ناخالص رخ می‌دهد و مقدار آن ۱۶/۹ میلیون ریال است. لازم به ذکر است مقادیر ارائه شده برای ۱ کیلومتر از خط آهن است و برای هر طول مورد نیاز کافی است در مقدار مورد نظر ضرب شود. برای نشان دادن قابلیت مدل یکپارچه هزینه دوره عمر ریل و

و سومین بالاست باید بر اساس عمر دوره نوسازی قبلی توسط نرخ بهره و تناژ سالیانه تبدیل به هزینه فعلی شود.  $(T_{ballast2} + T_{ballast1})$

$$(T_{rail} = T_{ballast3})$$

## ۶- نتایج و بحث

پس از استخراج تندترین شیب نمودار زوال از خروجی مدل مارکوف برای استفاده در رابطه‌ی ۹، مدل‌های ذکر شده پیاده سازی گردید، کل هزینه دوره عمر عملیات برای قسمتی از خطوط موجود در پایگاه داده با فرضیات و اطلاعات موجود تخمین زده شد. این تخمین برای کلاس ۴ که شامل ۲۶ بلاک و ۵۱۰ کیلومتر خط است صورت پذیرفت. در نتیجه هزینه‌های تک تک مدل‌های هزینه‌ای و همچنین مجموع هزینه‌های دوره عمر بالاست در شکل ۶ آمده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است هزینه‌های اصلی مربوط به هزینه نوسازی بالاست و عدم در دسترس بودن خط است. میزان تأثیر تناژ نوسازی در دو هزینه ذکر شده به مراتب بیشتر از سایر هزینه‌ها است. همانگونه که مشاهده می‌شود کمترین هزینه دوره عمر بالاست در بازه ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیون تن ناخالص رخ می‌دهد. در این مطالعه با فرض تناژ سالیانه (۱۶ میلیون تن ناخالص) که پیشتر عنوان شد،



شکل ۷. هزینه دوره عمر ریل بر واحد تناژ برای ۱ کیلومتر خط آهن  
 Fig. 7. The rail life cycle cost per tonnage unit for 1 km

جدول ۹. ضرایب و پارامترهای مدل هزینه دوره عمر ریل برای کلاس K=۴  
 Table 9. Rail LCC model parameters (K=4)

مقدار	پارامتر مدل
۸,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	$C_{renewal}$ - هزینه نوسازی ریل یک کیلومتر خط (ریال)
۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰	$C_{grinding}$ - هزینه سنگ زنی ریل یک کیلومتر خط (ریال)
۱۲	$S_{grinding}$ - بازه‌های سنگ زنی (MGT)
۵۰,۰۰۰,۰۰۰	$C_{defect}$ - هزینه تعمیر هر خرابی (ریال)

ناخالص و همزمان سومین نوسازی بالاست و نوسازی ریل در تناژ تجمعی ۵۲۸ میلیون تن ناخالص است.

### ۷- نتیجه گیری

در این مطالعه در ابتدا سعی بر این بود مدلی برای پیش‌بینی وضعیت خطوط راه‌آهن در آینده ارائه شود. با توجه به این که اطلاعات بالغ بر ۹۰۰۰ کیلومتر خط آهن در طی ۵ سال در اختیار بود، ضمن برطرف کردن خطاهای مهم به هنگام ثبت اطلاعات توسط ماشین اندازه‌گیر، مدل مارکوف پیشنهادی توسط هخامنشی [۱۰] توسعه داده شود. در مسیر توسعه با گسترش کلاس‌های خطوط راه‌آهن ایران سعی شد کل خطوط پوشش داده شوند. در این مطالعه خطوط

بالاس در جدول ۱۰ بیست سناریو برای یافتن بهترین روش نوسازی بالاست و ریل در دوره عمر بیشتر (ریل) ارائه شده‌است. هدف یافتن سناریویی با کمترین هزینه دوره عمر است.

همان‌طور که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، سناریوی شماره ۱۳ با کمترین هزینه کل دوره عمر به عنوان بهترین سناریو انتخاب گردید. انتخاب سناریوها با توجه به نتایج تک تک مدل‌ها و هزینه دوره عمر نوسازی ریل و بالاست صورت گرفته است، لذا محاسبه مدل‌ها به صورت مجزا پیش از انتخاب و بررسی سناریوها ضروری است. کل هزینه دوره عمر یکپارچه ریل و بالاست ۲۰,۴۵۴۹ میلیارد ریال است که شامل نوسازی اولیه بالاست در تناژ تجمعی ۱۴۵ میلیون تن ناخالص، نوسازی دوم بالاست در تناژ تجمعی ۳۴۵ میلیون تن

جدول ۱۰. سناریوهای یافتن کمترین هزینه دوره عمر ریل و بالاست جهت نوسازی

Table 10. Scenarios for finding the lowest rail and ballast life cycle cost for renewal

کل هزینه دوره عمر بر MGT (میلیارد ریال بر MGT)					تناژهای تجمعی نوسازی (MGT)				سناریو
$TLCC_{rail+ballast}$	$TLCC_{rail}$ ( $T_{rail}$ )	$TLCC_{ballast}$ ( $T_{ballast3}$ )	$TLCC_{ballast}$ ( $T_{ballast2}$ )	$TLCC_{ballast}$ ( $T_{ballast1}$ )	$T_{rail}$	$T_{ballast3}$	$T_{ballast2}$	$T_{ballast1}$	
۲۳.۵۳۸۳	۱۵.۹۶	۱۲.۸	۱۱.۵	۱۱.۹	۴۸۰	۱۸۰	۱۳۵	۱۶۵	۱
۲۳.۸۱۵۸		۱۱.۹	۱۱.۵	۱۲.۸		۱۶۵	۱۳۵	۱۸۰	۲
۲۳.۵۵۵۸		۱۱.۹	۱۲.۸	۱۱.۵		۱۶۵	۱۸۰	۱۳۵	۳
۲۳.۸۶۶۳		۱۱.۵	۱۱.۹	۱۲.۸		۱۳۵	۱۶۵	۱۸۰	۴
۲۲.۳۲۸۳	۱۴.۷۹	۱۲.۲	۱۳.۱	۱۱.۲	۴۹۶	۱۷۱	۱۸۵	۱۴۰	۵
۲۲.۶۰۱۷		۱۱.۲	۱۳.۱	۱۲.۲		۱۴۰	۱۸۵	۱۷۱	۶
۲۲.۳۷۶۲		۱۳.۱	۱۱.۲	۱۲.۲		۱۸۵	۱۴۰	۱۷۱	۷
۲۲.۷۶۹۱		۱۱.۲	۱۲.۲	۱۳.۱		۱۴۰	۱۷۱	۱۸۵	۸
۲۰.۶۰۶۴	۱۳.۲۶	۱۳.۹	۱۱.۹	۱۱.۴	۵۱۲	۱۹۲	۱۶۵	۱۵۵	۹
۲۱.۳۱۵۷		۱۱.۹	۱۱.۴	۱۳.۹		۱۶۵	۱۵۵	۱۹۲	۱۰
۲۰.۹۶۳۳		۱۱.۴	۱۳.۹	۱۱.۹		۱۵۵	۱۹۲	۱۶۵	۱۱
۲۰.۹۲۴۵		۱۱.۹	۱۳.۹	۱۱.۴		۱۶۵	۱۹۲	۱۵۵	۱۲
۲۰.۴۵۴۹	۱۲.۸۱	۱۳.۱	۱۴.۳	۱۱.۳	۵۲۸	۱۸۳	۲۰۰	۱۴۵	۱۳
۲۱.۲۹۵۵		۱۱.۳	۱۳.۱	۱۴.۳		۱۴۵	۱۸۳	۲۰۰	۱۴
۲۰.۶۷۴		۱۴.۳	۱۱.۳	۱۳.۱		۲۰۰	۱۴۵	۱۸۳	۱۵
۲۱.۱۰۴۴		۱۳.۱	۱۱.۳	۱۴.۳		۱۸۳	۱۴۵	۲۰۰	۱۶
۲۱.۳۶۲۵	۱۳.۱۷	۱۳.۹	۱۱.۴	۱۴.۳	۵۴۴	۱۹۰	۱۵۵	۱۹۹	۱۷
۲۰.۸۳۰۴		۱۴.۳	۱۳.۹	۱۱.۴		۱۹۹	۱۹۰	۱۵۵	۱۸
۲۱.۵۸۲۷		۱۱.۴	۱۴.۳	۱۳.۹		۱۵۵	۱۹۹	۱۹۰	۱۹
۲۱.۶۱۶		۱۱.۴	۱۳.۹	۱۴.۳		۱۵۵	۱۹۰	۱۹۹	۲۰

دوره عمر مربوط به آن‌ها و روشی برای چگونگی یافتن زمان بهینه برای عملیات‌های تعمیر و نگهداری ارائه شد. استفاده از تحلیل هزینه دوره عمر برای تصمیمات تعمیر و نگهداری بالاست نشان داد که علاوه بر دخیل کردن سرمایه اولیه، هزینه در طول زمان، در فرآیند تعیین زمان بهینه نوسازی ریل و بالاست، این تحلیل منجر به پاسخ‌هایی نزدیک به واقعیت می‌گردد،

در ۱۸ کلاس توزیع گردیدند. مدل مارکوف در شش وضعیت نسبت به مدل مارکوف پنج وضعیته توانایی بیشتری در مرزبندی حالات خطوط دارد. در این تحقیق ماتریس انتقال در مدل مارکوف دارای شش حالت بود. که گذر از حالت به حالت بعدی معیار ارزیابی بود. در قسمت تحلیل هزینه دوره عمر با در نظر گرفتن اجزاء مهم خط آهن که بیشتر دستخوش تعمیر و نگهداری می‌شوند، مدل هزینه

- Larsson-Kråik, Evaluation of track geometry maintenance for a heavy haul railroad in Sweden: a case study, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, (2014) (5)228 503-496.
- [7] S. Kumar, A study of the rail degradation process to predict rail breaks, Luleå tekniska universitet, 2006.
- [8] A.S. Suiker, R. de Borst, A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks, International journal for numerical methods in engineering, -441 (2003) (4)57 470.
- [9] B.M. Ayyub, Uncertainty modeling and analysis in civil engineering, CRC Press, 1997.
- [10] Y. Shafahi, R. Hakhamaneshi, Application of a maintenance management model for Iranian railways based on the Markov chain and probabilistic dynamic programming, (2009).
- [11] D. Prescott, J. Andrews, Investigating railway track asset management using a Markov analysis, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 416-402 (2015) (4)229.
- [12] M. Davidian, Nonlinear models for repeated measurement data, Routledge, 2017.
- [13] Y. Shafahi, M. Rasooli, A neuro networks model to predict future track condition, in: 6th International Conference on Civil Engineering, 2001.
- [14] A.R. Andrade, P.F. Teixeira, Statistical modelling of railway track geometry degradation using Hierarchical Bayesian models, Reliability Engineering & System Safety, 183-169 (2015) 142.
- [15] S. Jovanovic, H. Guler, B. Coko, Track degradation analysis in the scope of railway infrastructure maintenance management systems, Gradevinar, 257-247 (2015) (3)67.
- [16] M. Yousefikia, S. Moridpour, S. Setunge, E. Mazloumi, Modeling degradation of tracks for maintenance planning on a tram line, Journal of Traffic and Logistic Engineering, 2014) (2)2).
- [17] A.P. Patra, P. Söderholm, U. Kumar, Uncertainty estimation in railway track life-cycle cost: a case study from Swedish National Rail Administration, Proceedings
- چرا که به عنوان مثال در این مطالعه در مثال موردی همانگونه که مشاهده شد و عنوان گردید کمترین هزینه دوره عمر بالاست در بازه تناژ ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیون تن ناخالص رخ می‌دهد. در این مطالعه با فرض تناژ سالیانه (۱۶ میلیون تن ناخالص) که پیشتر عنوان شد، نتیجه می‌شود که عمر نوسازی بالاست حدوداً ۶ تا ۱۰ سال است. این عدد برای ریل ۵۰۰ تا ۵۴۰ میلیون تن ناخالص است که معادل ۳۰ تا ۳۵ سال است. لازم به ذکر است ذکر این اعداد بنابر فرضیات و شرایط هر محور می‌تواند تغییر نماید و تحلیل هزینه دوره عمر آن منجر به عددی متفاوت گردد. در عین حال در این تحقیق توسط تحلیل دوره عمر ذکر شده، سعی شد کل هزینه دوره عمر بالاست و ریل حداقل گردد و این کار با محوریت تغییر تناژ عملیات زیرکوبی و به تبع آن تناژ نوسازی بالاست صورت پذیرفت و مثال موردی آن ارائه گردید.
- همچنین از آنجایی که صرفاً با پارامترهای هندسی امکان تحلیل جامع هزینه دوره عمر وجود ندارد چرا که شاخص‌های کیفیت و شاخص‌های هندسی به صورت یکپارچه می‌توانند نتیجه ای جامع‌تر و جذاب‌تر بدهند، میتوان از این مورد به عنوان محدودیت این کار اشاره کرد.

## مراجع

- [1] A. Zoeteman, C. Esveld, Evaluating track structures: life cycle cost analysis as a structured approach, in: World Congress on Railway Research, Tokyo, 1999.
- [2] K. Tzanakakis, The railway track and its long term behaviour: a handbook for a railway track of high quality, Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] A. Tjan, D. Pitaloka, Future prediction of pavement condition using Markov probability transition matrix, in: Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Citeseer, 2005, pp. 782-772.
- [4] H. Ghadamnan, s. Ataei, The prediction of rail tracks Irregularity using data mining techniques, in: 13th Conference and 6th International Exhibition of Rail Transport Achievements, Iran, 2007, pp. (In Persian).
- [5] Y.-J. Zhang, M.H. Murray, L. Ferreira, Modelling rail track performance: an integrated approach, Transport Journal, (194-187 (2000).
- [6] I.A. Khouy, H. Schunnesson, U. Juntti, A. Nissen, P.-O.

- Persian).
- [24] S.E. Hashemian, Y. Shafahi, Investigating Effect of sand dunes on the quality of rail lines using data measured for railway tracks (Case Study: Kerman-Bam-Bafgh), in: 10th National Congress on Civil Engineering, Tehran, Iran, 2017.(In Persian).
- [25] J.L. Bogdanoff, F. Kozin, J.L. Bogdanoff, Probabilistic models of cumulative damage, Wiley New York etc., 1985.
- [26] R. Fletcher, M.J. Powell, A rapidly convergent descent method for minimization, The computer journal, (2)6 168-163 (1963).
- [27] J. Zhao, A.H.C. Chan, C. Roberts, A.B. Stirling, Assessing the Economic Life of Rail Using a Stochastic Analysis of Failures, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 111-103 (2006) (2)220.
- [28] A. Zoeteman, Railway design and maintenance from a life-cycle cost perspective: A decision-support approach, 2004.
- of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 293-285 (2009) (3)223.
- [18] M. Fathali, F. Nejad, M. Esmaili, Life cycle cost analysis in railway engineering from maintenance management point of view, Department of technical installations and infrastructure, Islamic Republic of Iran Railways Research and Training Center, 2015.(In Persian).
- [19] A.P. Patra, Maintenance decision support models for railway infrastructure using RAMS & LCC analyses, Luleå tekniska universitet, 2009.
- [20] A. Nissen, Development of life cycle cost model and analyses for railway switches and crossings, Luleå tekniska universitet, 2009.
- [21] p. theurer, <https://www.plassertheurer.com/en/machines-systems/measuring-work.html>, in, 2017.
- [22] Railways of the Islamic Republic of Iran, Statistical Yearbook of Rail Transport, 2015.(In Persian).
- [23] s.m. MahmoudiFard, Providing a quality index for Iran's railways, Sharif University of Technology, 2008.(In

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S.E. Hashemian, Y. YShafahi, F. Moghadas Nejad, Life cycle cost analysis (LCCA) of railway tracks maintenance decisions using the Markov forecast model based on the track recording machine data, Amirkabir J. Civil Eng., 53(2) (2021) 555-574.

DOI: [10.22060/ceej.2020.15952.6122](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.15952.6122)

