



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

An Uncertain Prediction Model of Pavement Deterioration Using Grey System Theory (Case Study: Garmsar-Qom Highway Route)

Hamed Maleki^{a,*}, Mohammad Bagher Fakhrazad^a, Akbar Danesh^b, Hamzeh Zakeri^c

^a Industrial Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran

^b School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

^c Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-01-27

Revised: 2025-01-03

Accepted: 2025-01-15

Keywords:

Pavement management;
Grey theory;
Pavement deterioration
models;
Evaluation of grey
relationships;
Regression.

ABSTRACT

Nowadays, the management of road repair and improvement is prioritized when a network of road is established. Roughness indices, pavement condition, pavement quality, skid resistance and road serviceability play an essential role in deterioration model to manage and optimize the roads. The main goal of this paper is to evaluate the necessary indices of pavement condition for modeling the deterioration process on one hand, and to consider the uncertainty of the pavement deterioration process through grey theory modelling on the other hand. Extracting all the indices is a time-consuming and costly process. Initially, the roughness indices and the pavement condition were examined by using the evaluation of grey relationships. The results showed that both indices have the same effect on the age of the pavement approximately. The IRI index was selected for grey modeling considering the same effect of two indices on pavement age. One of the reasons was the high correlation between this index and the comfort of road users for choosing the index to analyze the uncertainty of pavement deterioration in the paper. Furthermore, grey prediction model which is able to detect the future state of uncertain systems based on existing knowledge has been used in order to take into account the uncertainty in the deterioration forecasting processes. A comparison was made between this method and regression to validate the model. The results showed the average of error difference is very small between two methods and equal to 0.01.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.33102.2610>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: h.maleki@stu.yazd.ac.ir

How to cite this article:

H. Maleki, M. B. Fakhrazad, A. Danesh and H. Zakeri, "An uncertain prediction model of pavement deterioration using grey system theory (case study: Garmsar-Qom Highway Route)," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 37-49, doi: 10.22075/jme.2025.33102.2610

مدل پیش بینی عدم قطعیت اضمحلال روسازی با استفاده از تئوری خاکستری مطالعه موردی: مسیر بزرگراهی گرمسار-قم

حامد ملکی^{۱*}، محمدباقر فخرزاد^۱، اکبر دانش^۲، حمزه ذاکری^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶	امروزه پس از آن که شبکه‌ای از راه‌ها شکل می‌گیرد مدیریت ترمیم و به‌سازی راه‌ها در اولویت قرار می‌گیرد. به منظور مدیریت ترمیم و بهینه‌سازی راه‌ها شاخص‌های ناهمواری، وضعیت روسازی، کیفیت روسازی، مقاومت لغزشی و خدمت‌دهی راه در مدل‌سازی اضمحلال نقش اساسی دارند. از این رو هدف اصلی این مقاله از یک سو ارزیابی شاخص‌های موردنیاز وضعیت روسازی به منظور مدل‌سازی فرایند اضمحلال است و از سوی دیگر در نظر گرفتن عدم قطعیت فرایند اضمحلال روسازی از طریق مدل‌سازی خاکستری می‌باشد. استخراج کلیه شاخص‌ها فرایندی زمان‌بر و هزینه‌بر می‌باشد. به همین منظور، ابتدا با استفاده از ارزیابی روابط خاکستری، شاخص‌های ناهمواری و وضعیت روسازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد هر دو شاخص تاثیر تقریباً یکسانی بر سن روسازی دارند. با توجه به تاثیر یکسان دو شاخص بر سن روسازی، از شاخص IRI برای مدل‌سازی خاکستری بهره گرفته شده است. همبستگی بالا بین این شاخص و راحتی کاربران راه و نیز تاثیر روند تغییرات آن بر وضعیت عملکردی روسازی، از دلایل انتخاب این شاخص جهت تحلیل عدم قطعیت اضمحلال روسازی در مقاله حاضر بوده است. در ادامه به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در فرایندهای پیش‌بینی اضمحلال از مدل‌های پیش‌بینی خاکستری که قادر به تشخیص وضعیت آتی سیستم‌های غیرقطعی بر پایه دانش موجود می‌باشد استفاده شده است. برای صحت‌گذاری مدل پیشنهادی مقایسه‌ای بین این روش و رگرسیون صورت گرفت. نتایج مقایسه نشان داد که اختلاف متوسط خطای نسبی در دو روش بسیار ناچیز و برابر ۰/۱ است.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.33102.2610>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

مسافر و ۱۰ میلیون تن ترانزیت کالا می‌باشد. روسازی راه‌ها جز لاینفک این شبکه بوده و هر ساله بخش قابل ملاحظه‌ای از بودجه هر کشور صرف نگهداری و تعمیرات روسازی راه‌ها می‌گردد [۱]. با توجه به محدود بودن منابع مالی و افزایش هزینه‌های نگهداری راه‌ها، هنگامی که عملیات نگهداری

راه‌ها از مهم‌ترین زیرساخت‌های شبکه حمل و نقل هر کشور می‌باشند که نقش کلیدی در انتقال کالا و مسافر برعهده دارند. به گونه‌ای که حمل و نقل جاده‌ای دارای آمار میزان جا به جایی سالیانه ۶۰۰ میلیون تن کالا، ۹۰۰ میلیون

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.maleki@stu.yazd.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

استناد به این مقاله:

حامد ملکی، محمدباقر فخرزاد، اکبر دانش و حمزه ذاکری، "مدل پیش‌بینی عدم قطعیت اضمحلال روسازی با استفاده از تئوری خاکستری (مطالعه موردی: مسیر بزرگراهی گرمسار-قم)"، مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (۱۴۰۴): ۳۷-۴۹، doi: 10.22075/jme.2025.33102.2610

رانندگی نیز می‌شود. شاخص ناهمواری بین المللی از نسبت مقدار پستی و بلندی‌های موجود در یک مسیر معین به فاصله طی شده به دست می‌آید [۷]. با وجود مزایای این روش از منظر ایمنی و راحتی کاربران راه، به بررسی تاثیر این شاخص بر سن روسازی می‌پردازیم که دغدغه پژوهشگران در عدم توانایی فراهم نمودن زمان‌بندی مناسب است [۸ و ۹].

با این حال با توجه به اهمیت ناهمواری روسازی، بسیاری از محققان از این شاخص در مدل‌های اضمحلال روسازی استفاده نمودند. مهم‌ترین این مدل‌ها شامل مدل سانوکاوا و شوfer [۱۰]، مدل ازبی و لائوب [۱۱]، مدل mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG) [۱۲]، مدل پروزی و مدنت [۱۳]، مدل بکهیت و همکاران [۱۴]، مدل کارگاه استادی و همکاران [۱۵]، مدل خطاک و همکاران [۱۶] و مدل محمدجعفر و همکاران [۱۷] می‌باشد. با این حال مشکل بسیاری از این مدل‌ها نیاز به داشتن اطلاعات بسیار وسیع درباره وضعیت راه‌ها می‌باشد که در کشورهای در حال توسعه نظیر ایران میسر نمی‌باشد [۱۸ و ۱۹]. از این رو در این مقاله از تئوری سیستم‌های خاکستری استفاده شده که به مطالعه نمونه‌های کوچک و سیستم‌های دارای اطلاعات ضعیف می‌پردازد.

طی دهه‌های گذشته الگوریتم‌های مختلفی برای نگهداری روسازی از جمله مدل زنجیره مارکوف، شبکه‌های عصبی مصنوعی [۲۰] و نرم افزار HDM-4 پیشنهاد شده است. رایج‌ترین و ساده‌ترین روش پیش‌بینی رگرسیون می‌باشد. روش رگرسیون برای ایجاد یک رابطه تجربی بین دو یا چند متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. قاسم زاده [۲۱] برای پیش‌بینی مدول مرکب برشی و زاویه فازی قیر تحت تاثیر فرسودگی از رگرسیون استفاده کرده است. اما از مشکلات رگرسیون در مدل‌های پیش‌بینی می‌توان به پراکندگی زیاد مشخصات خرابی‌ها اشاره کرد؛ در نتیجه رابطه حاصل از رگرسیون دارای ضریب همبستگی پایینی خواهد بود.

عبدالعزیز و همکاران [۲۲] طی مطالعه‌ای در پی یافتن مدل پیش‌بینی دقیقی برای شاخص بین‌المللی ناهمواری بودند که از هر دو روش رگرسیون خطی چندمتغیره و شبکه عصبی استفاده کردند. تعداد داده‌های مشاهداتی این مطالعه ۲۴۳۹ ردیف داده بوده است و مدل‌های ارائه شده از دقت قابل قبولی برخوردار نیستند. مزاری و رودریگز

روسازی راه‌ها با انتخاب شاخص مناسب در روش نگهداری انجام پذیرد، علاوه بر کاهش هزینه‌های نگهداری، رضایت کاربران راه را به همراه دارد [۲].

هدف مدل‌های پیش‌بینی اضمحلال، تعیین رابطه‌ای منطقی میان وضعیت روسازی و سایر عوامل موثر بر آن پس از بهره‌برداری می‌باشد. به منظور ارزیابی این عوامل شاخص‌های مختلفی توسعه یافته که می‌توان به شاخص‌های ناهمواری بین المللی International Roughness Index (IRI)، عدد لغزشی Skid number (SN)، شاخص وضعیت روسازی Pavement Condition Index (PCI) و شاخص کیفیت روسازی Pavement Quality Index (PQI) اشاره کرد [۳].

یکی از عواملی تاثیرگذار در مصرف سوخت وسایل نقلیه وضعیت راه‌ها می‌باشد. سیستم مدیریت روسازی نیازمند به پیش‌بینی وضعیت روسازی راه‌ها می‌باشد. یکی از روش‌های تعیین وضعیت روسازی شاخص وضعیت روسازی PCI است. مقدار PCI از طیف صفر برای یک روسازی غیرقابل استفاده تا صد برای یک روسازی کاملاً بی عیب و نقص تشکیل شده است. مقدار PCI براساس ۱۹ نوع خرابی، میزان شدت (کم، متوسط، زیاد) و میزان خرابی تعیین می‌شود. به دلیل تعداد زیاد حالت‌های ممکن به دست آوردن مقداری که هر سه عامل را به طور هم زمان شامل شود بسیار مشکل است. برای از بین بردن این مشکل از ضریب کاهندگی که نوعی ضریب وزنی است و میزان تاثیر هر یک از حالت‌های ممکن را نشان می‌دهد استفاده می‌شود [۴].

با توجه به این که در این شاخص سطح وسیعی از خرابی‌ها منظور می‌شود، از نظر کاربرد بسیار مقبول بوده و توسط کارگزاران بسیاری به عنوان روش استاندارد رسماً پذیرفته شده است [۵]. با این وجود به دلیل این که PCI در اصل برای توصیف شرایط ساختاری روسازی و جاده توسعه یافته است، تاثیر آسیب‌های روسازی بر امنیت روسازی را نادیده گرفته است. همچنین حجم عملیات برداشت و تحلیل آنالیز داده‌ها در این روش بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است [۶].

با توجه به مشکلات روش تعیین PCI، در سال‌های اخیر شاخص‌های دیگری با هدف کاهش هزینه و افزایش سرعت و دقت ارزیابی روسازی مطرح شده است. یکی از این شاخص‌های مهم دیگر که راحتی و ایمنی راه را همراه دارد، ناهمواری می‌باشد. روسازی با ناهمواری زیاد علاوه بر این که ناراحتی کاربران را به همراه دارد باعث بروز حوادث

[۲۳] با استفاده از داده‌های برنامه بلندمدت روسازی، مدل‌هایی به دو روش الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی ارائه کردند که برازندگی مدل‌های به‌دست آمده در این مطالعه نسبت به مطالعات دیگر کم‌تر بود. اگر چه مدل‌های به‌دست آمده با روش‌های یادگیری ماشین قابل اعتمادتر از روش‌های رگرسیون می‌باشند، اما اکثر این روش‌ها رابطه ریاضی بین متغیرهای ورودی و خروجی را ارائه نمی‌دهند و می‌تواند نقطه ضعف آن‌ها در قیاس با مدل‌های رگرسیون باشد.

روسازی‌ها با گذشت زمان و با توجه به شرایط ترافیکی و آب و هوایی به تدریج فرسوده شده و خرابی در آنها به وجود می‌آید. این خرابی‌ها شامل ترک خوردگی، چاله‌ها، شیار شدن و خستگی می‌باشد [۲۴]. میزان شدت خرابی‌ها رابطه مستقیمی با نحوه نگهداری روسازی راه‌ها دارد که پس از بهره‌برداری باید به طور مداوم انجام شود.

در حالی که عواملی که باعث آسیب روسازی می‌شوند چند وجهی هستند، تعیین یک علت واحد چالش برانگیز است، زیرا عناصر متعدد اغلب در هر مشکل خاصی نقش دارند [۲۵]. متغیرهای متعددی که بر ساختار و دوام روسازی تأثیر می‌گذارند، پیچیدگی و عدم اطمینان را در طول عمر روسازی می‌افزایند. عدم قطعیت را می‌توان بر اساس مکانیسم‌های مختلف و معنای فیزیکی ذاتی آن، از جمله تصادفی، فازی و عدم قطعیت عمومی طبقه‌بندی کرد [۲۶]. عدم قطعیت‌های مربوط به مواد و سازه‌ها را می‌توان به طور قابل توجهی از طریق کنترل کیفیت دقیق کاهش داد. با این حال، برخی از عدم قطعیت‌ها ذاتاً غیرقابل کنترل باقی می‌مانند. در واقع عدم قطعیت در رفتار روسازی‌ها تحت شرایط محیطی و بارگذاری ترافیکی را می‌توان در مدل‌های پیش‌بینی اضمحلال روسازی در سال‌های پس از بهره‌برداری لحاظ کرد. عدم در نظر گرفتن این تغییرات می‌تواند منجر به خرابی زودرس روسازی شود و متعاقباً افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری کند. از سوی دیگر، برآوردهای بیش از حد ممکن است روسازی بیش از حد محتاطانه‌ای را به همراه داشته باشد که منجر به هزینه‌های غیرموجه و ناکارآمدی شود. هدف تعیین دقیق عدم قطعیت‌های مرتبط با این پارامترها است.

برای پوشاندن این معایب یک راه جایگزین استفاده از مدل‌های احتمالاتی مارکوف می‌باشد که قادر است عدم قطعیت را در نظر گیرد. علیمردی و همکاران [۲۷] از

زنجره مارکوف برای پیش‌بینی ناهمواری روسازی با توجه به مقدار اولیه آن استفاده کرد. این روش احتمال انتقال از وضعیت فعلی روسازی به حالت دیگر (یا ماندن در همان حالت) را در یک بازه زمانی که مرحله نامیده می‌شود، برای پیش‌بینی وضعیت آتی روسازی اعمال می‌کند. مدل‌های مارکوفی فرمت مسئله زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات را از برنامه‌نویسی عدد صحیح به خطی تغییر می‌دهند. علاوه بر این، مدل‌های مارکوف دو نقص عمده دارند. نقص اول این است که فرایندهای احتمالی باید مستقل از زمان در نظر گرفته شود در حالی که اضمحلال روسازی وابسته به زمان است. نقص دوم شامل محدود بودن و قابل شمارش بودن حالت فضایی فرایندهای احتمالی مارکوف است در صورتی که حالت فضایی در اضمحلال روسازی نامحدود است [۲۸]. بنابراین، مدل‌های مارکوف به اندازه کافی برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات احتمالی واجد شرایط نیستند [۲۹].

یکی از روش‌های مناسب برای در نظر گرفتن عدم قطعیت، استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) است که توجه ناکافی را در زمینه زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات به خود جلب کرده است. MCS نوعی شبیه‌سازی است که نتایج را بر اساس نمونه‌گیری تصادفی تکراری و ارزیابی آماری محاسبه می‌کند. این شبیه‌سازی یک ابزار احتمالی مفید برای ارزیابی و مدل‌سازی مشکلات دنیای واقعی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت و تحلیل کمی ریسک‌ها است. به عنوان مثال، رز و همکاران [۳۰] از MCS برای تبدیل مدل‌های قطعی به مدل‌های احتمالی استفاده کرد. نویسندگان در ابتدا مدل‌های پیش‌بینی قطعی قابل اعتمادی را برای پیشرفت چاله‌ها، شکست لبه‌ها و پیشروی درهم و برهم انتخاب کردند. سپس توابع توزیع احتمال مناسب (PDF) و توابع جرم احتمال (PMF) به داده‌های جمع‌آوری شده برای متغیرهای مستقل برازش شدند. پس از آن، مدل‌های پیش‌بینی احتمالی با استفاده از MCS توسعه یافتند. از معایب این روش دانستن نوع توزیع احتمال می‌باشد.

از این رو هدف اصلی این مقاله از یک سو ارزیابی شاخص‌های موردنیاز وضعیت روسازی به منظور مدل سازی فرایند اضمحلال است و از سوی دیگر در نظر گرفتن عدم قطعیت فرایند اضمحلال روسازی از طریق مدل سازی خاکستری می‌باشد. در این مقاله از دو شاخص وضعیت روسازی (PCI) و شاخص ناهمواری بین المللی (IRI) در

$$\Delta_i = (\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(n)) \quad (4)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, m$$

در مرحله سوم حداکثر مقدار تفاضل و حداقل مقدار تفاضل را با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌کنیم.

$$M = \max_i \max_k \Delta_i(k) \quad (5)$$

$$m = \min_i \min_k \Delta_i(k)$$

در مرحله بعدی مقدار همبستگی را مانند رابطه ۶ به دست می‌آوریم.

$$\gamma_{0i} = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M} \quad (6)$$

$$\xi \in (0, 1) \quad i = 0, 1, 2, \dots, m$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

و در آخر با استفاده از رابطه ۷ اندازه رابطه خاکستری را تعیین می‌کنیم.

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_{0i}(k) \quad (7)$$

عبارت $\gamma(X_0, X_i)$ اندازه رابطه خاکستری بین X_0 و X_i را نشان می‌دهد. مقدار γ ضریب تمایز می‌باشد و هر اندازه منحنی توالی X_0 و X_i به هم نزدیک‌تر باشند مقدار γ_{0i} بیش‌تر بوده و می‌توان گفت همبستگی بین عامل‌های آن دو توالی بیش‌تر است. پس از مشخص شدن توالی با همبستگی بیش‌تر، مدل خاکستری ایجاد می‌شود. رابطه ۸ یک توالی از داده‌های خام می‌باشد.

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) \quad (8)$$

آنگاه توالی حاصل از اعمال تجمعی بر روی $X^{(0)}$ به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود.

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (9)$$

بنابراین با استفاده از روابط ۸ و ۹ یک معادله دیفرانسیل خاکستری مانند رابطه ۱۰ تعریف می‌گردد.

$$x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b \quad (10)$$

تعیین ارزیابی عملکرد روسازی راه‌ها استفاده شده است.

۲- روش تحقیق

سیستم‌های عمرانی معمولاً تحت تاثیر انواع بسیار متفاوتی از عوامل هستند. نتیجه تعاملات این عوامل است که رفتار سیستم را تعیین کرده و جلوگیری سیستم از زوال را ممکن می‌سازد. در تحلیل این سیستم‌ها معمولاً می‌خواهیم بدانیم که از بین عوامل، کدام اولیه و کدام ثانویه هستند. کدام یک از عوامل اثر غالب در زوال سیستم را داشته و کدام یک اثر کمتری بر روی آن دارند. افزایش سن روسازی هدفی مطلوب در راه‌سازی به‌شمار می‌رود. به منظور دستیابی به این هدف به تحلیل شاخص وضعیت روسازی می‌پردازیم.

X_0 توالی رفتاری سن روسازی قطعه‌ای از راه که به صورت افزایشی بوده و X_i توالی رفتاری شاخص نام در نظر بگیرد. اگر X_{IRI} توالی شاخص ناهمواری بین‌المللی باشد که افزایشی است آنگاه X_{IRI} و X_0 رابطه مستقیم دارند. اگر X_{PCI} توالی شاخص وضعیت روسازی باشد که کاهش‌ی است آنگاه X_{PCI} و X_0 رابطه معکوس با هم دارند. ابتدا رابطه معکوس را با استفاده از عملگرهای معکوس به رابطه مستقیم تبدیل می‌کنیم. برای محاسبه اندازه رابطه خاکستری به صورت زیر عمل می‌کنیم. در مرحله اول با توجه به نوع توالی رفتاری، تصویر ابتدایی یا تصویر میانگین هریک از توالی‌ها را با استفاده از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آوریم.

$$X_i' = \frac{X_i}{x_i(1)} = (x_i'(1), x_i'(2), \dots, x_i'(n)) \quad (11)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, m$$

$$\bar{X}_i(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(k) \quad (12)$$

$$X_i' = \frac{x_i(k)}{\bar{X}_i} = (x_i'(1), x_i'(2), \dots, x_i'(n))$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, m$$

در مرحله دوم تفاضل توالی‌ها را با استفاده از روابط ۳ و ۴ تعیین می‌کنیم.

$$\Delta_i(k) = |x_0'(k) - x_i'(k)| \quad (13)$$

۳- مطالعه موردی

جدول ۱- اطلاعات آماری IRI و PCI مسیر تحت مطالعه پیش از متناظر کردن فواصل زمانی

سال قطعه	۱۳۹۴		۱۳۹۷		۱۳۹۹		۱۴۰۱	
	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI
۲	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۴	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۱	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۲	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۳	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۴	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۵	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۶	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۷	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۸	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۹	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۲۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۲۱	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۲۲	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۲۳	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۲۴	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۲۷	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰

سیستم مدیریت روسازی با تکیه بر اطلاعات جمع‌آوری شده در بانک‌های اطلاعاتی به تحلیل نتایج می‌پردازد و مدل‌های پیش‌بینی ابزار تحلیل اطلاعات می‌باشند. در این مقاله برای ارزیابی نتایج از داده‌های سازمان راه‌داری استفاده شده است. داده‌های انتخاب شده مربوط به یک مسیر اصلی بزرگراهی (گرمسار-قم) به شماره ۲ و طول ۱۵۰ کیلومتر که شرقی-غربی بوده و در مرکز ایران در ۲۶ اسفندماه سال ۱۳۹۳ افتتاح شده است. انتهای شمالی این مسیر در غرب به بزرگراه تهران-قم و انتهای جنوبی آن به بزرگراه قم-کاشان ختم می‌شود. داده‌های موجود برای شاخص وضعیت مسیر طی ۴ سال، ۳۰ داده از نمونه‌های ۱۰۰ متری برای قطعاتی به طول ۵ کیلومتر در هر سال جمع‌آوری شده که تعداد ۱۸ قطعه تحت حداقل شرایط نگهداری بوده‌اند. جدول ۱ اطلاعات آماری مقادیر IRI و PCI مسیر تحت مطالعه را به صورت سالانه در یک دوره ۴ ساله نشان می‌دهد.

همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد، ابتدا توالی‌ها را با استفاده از رابطه ۲ به فواصل زمانی مشابه تبدیل می‌کنیم. در سال‌هایی که داده‌های IRI و PCI وجود ندارد به کمک عملگر میانگین داده‌های آن سال‌ها تخمین زده شده است. هرچقدر که اندازه رابطه خاکستری (رابطه ۷) بزرگ‌تر باشد نشان می‌دهد که همبستگی بین آن شاخص و سن روسازی بیش‌تر است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد در برخی قطعات مقدار اختلاف همبستگی شاخص PCI نسبت به شاخص IRI ناچیز است که دلالت بر آن دارد که تاثیر دو شاخص IRI و PCI بر سن روسازی تقریباً یکسان است.

برخلاف بسیاری از مقالات که به تعیین ارتباط بین شاخص‌های IRI و PCI از طریق چندجمله‌ای پرداخته شده [۳۱ و ۳۲] در این مقاله بررسی وضعیت این شاخص‌ها با سن روسازی ارائه شده است.

مدل‌سازی فرآیند اضمحلال نیاز به اندازه‌گیری شاخص‌های وضعیت روسازی دارد که در این مقاله با توجه به تاثیر یکسان دو شاخص بر سن روسازی، از شاخص IRI بهره گرفته شده است. همبستگی بالا بین این شاخص و راحتی کاربران راه از یک سو و نیز تاثیر روند تغییرات آن بر وضعیت عملکردی روسازی از سوی دیگر، از دلایل انتخاب این شاخص جهت تحلیل عدم قطعیت در پیش‌بینی اضمحلال روسازی بوده است.

جدول ۲- اطلاعات آماری IRI و PCI مسیر تحت مطالعه پس از متناظر کردن فواصل زمانی

سال قطعه	۱۳۹۴		۱۳۹۵		۱۳۹۶		۱۳۹۷		۱۳۹۸		۱۳۹۹		۱۴۰۰		۱۴۰۱	
	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI
۲	۱۰۰	۱۰۸	۹۵/۹۶	۱/۱۳	۹۱/۹۳	۱/۱۸	۸۷/۹	۱/۲۳	۷۵/۹	۱/۴۷	۶۳/۹	۱/۷۲	۵۰/۹۵	۲/۰۲	۳۸	۲/۳۲
۴	۱۰۰	۱۴۶	۹۹/۴۶	۱/۴۹	۹۸/۹۳	۱/۳۲	۹۸/۴	۱/۳۵	۸۹/۳۵	۱/۴۸	۸۰/۳	۱/۶۱	۶۳/۴	۱/۹۷	۴۶/۵	۲/۳۳
۱۰	۱۰۰	۱۵۵	۹۷/۴۶	۱/۵۹	۹۴/۹۳	۱/۶۳	۹۲/۴	۱/۶۸	۷۲/۳	۱/۸۷	۵۲/۲	۲/۰۷	۳۷/۷	۲/۲۴	۲۳/۲	۲/۴۲
۱۱	۱۰۰	۱۲۲	۹۶	۱/۲۷	۹۲	۱/۳۲	۸۸	۱/۳۸	۷۲/۷۵	۱/۶۸	۵۷/۵	۱/۹۸	۳۸/۹۵	۲/۲۸	۲۰/۴	۲/۵۸
۱۲	۱۰۰	۱۵۳	۹۹/۳۳	۱/۶۱	۹۸/۶۶	۱/۶۹	۹۸	۱/۷۸	۷۶/۰۵	۲/۱۱	۵۴/۱	۲/۴۴	۳۸/۴۵	۲/۷۲	۲۲/۸	۳
۱۳	۱۰۰	۱۳۶	۹۴/۰۶	۱/۴۳	۸۸/۱۳	۱/۵۰	۸۲/۲	۱/۵۸	۶۵/۵۵	۱/۷۹	۴۸/۹	۲/۰۱	۳۶/۴	۲/۴۵	۲۳/۹	۲/۸۹
۱۴	۱۰۰	۱۳۰	۹۷/۱	۱/۳۹	۹۴/۲	۱/۴۸	۹۱/۳	۱/۵۷	۶۴/۸	۱/۸۵	۳۸/۳	۲/۱۳	۲۹/۲	۲/۴۷	۲۰/۱	۲/۸۲
۱۵	۱۰۰	۱۲۹	۹۶/۲۳	۱/۴۴	۹۲/۴۶	۱/۵۹	۸۸/۷	۱/۷۵	۶۱/۱	۱/۸۷	۳۳/۵	۱/۹۹	۲۶/۱۸	۲/۶۹	۱۸/۸۶	۳/۴
۱۶	۱۰۰	۱۳۶	۹۳/۲۳	۱/۴۲	۸۶/۴۶	۱/۴۸	۷۹/۷	۱/۵۵	۶۲/۶۵	۱/۸۲	۴۷/۶	۲/۰۹	۳۱/۱۵	۲/۵۱	۱۴/۷	۲/۹۴
۱۷	۱۰۰	۱۲۹	۹۵/۸۳	۱/۳۶	۹۱/۶۶	۱/۴۴	۸۷/۵	۱/۵۲	۷۲/۶	۱/۶۴	۵۷/۷	۱/۷۷	۴۰/۱۵	۲/۱۵	۲۲/۶	۲/۵۴
۱۸	۱۰۰	۱۳۹	۹۵/۹۶	۱/۳۶	۹۱/۹۳	۱/۴۳	۸۷/۹	۱/۵۱	۸۰/۲	۱/۶۸	۷۲/۵	۱/۸۶	۴۹/۵	۲/۱۸	۲۶/۵	۲/۵۱
۱۹	۱۰۰	۱۴۴	۹۵/۴۳	۱/۳۱	۹۰/۸۶	۱/۳۸	۸۶/۳	۱/۴۶	۵۷/۵	۱/۷۶	۲۸/۷	۲/۰۶	۲۶/۷	۲/۲۲	۲۴/۷	۲/۳۸
۲۰	۱۰۰	۱۳۳	۹۵/۷۶	۱/۴۴	۹۱/۵۳	۱/۵۶	۸۷/۳	۱/۶۸	۶۱/۷	۱/۷۱	۳۶/۱	۱/۷۴	۲۴/۶۵	۲/۳۹	۱۳/۲	۳/۰۴
۲۱	۱۰۰	۱۵۲	۹۷/۰۶	۱/۶۵	۹۴/۱۳	۱/۷۸	۹۱/۲	۱/۹۱	۷۱/۴	۲	۵۱/۶	۲/۱۰	۳۷/۲۵	۲/۷۵	۲۲/۹	۳/۴۱
۲۲	۱۰۰	۱۲۱	۹۴/۶۳	۱/۲۱	۸۹/۲۶	۱/۲۲	۸۳/۹	۱/۲۳	۶۹/۲	۱/۳۱	۵۴/۵	۱/۴۰	۵۰/۶	۱/۹۳	۴۶/۷	۲/۴۶
۲۳	۱۰۰	۱۳۸	۸۹/۴۳	۱/۴۸	۷۸/۸۶	۱/۵۸	۶۸/۳	۱/۶۹	۵۷/۲	۱/۷۲	۴۶/۱	۱/۷۵	۲۷/۳	۲/۷۵	۸/۵	۳/۷۵
۲۴	۱۰۰	۱۴۵	۹۳/۸۶	۱/۳۴	۸۷/۷۳	۱/۴۴	۸۱/۶	۱/۵۵	۵۸/۸	۱/۷۷	۳۶	۱/۹۹	۳۳/۳	۲/۴۱	۳۰/۶	۲/۸۳
۲۷	۱۰۰	۱۱۳	۹۸/۷۶	۱/۱۷	۹۷/۵۳	۱/۲۲	۹۶/۳	۱/۲۷	۸۰/۵	۱/۳۴	۶۴/۷	۱/۴۱	۴۴/۸۵	۱/۹۸	۲۵	۲/۵۵

جدول ۳- اندازه رابطه خاکستری هریک از شاخص‌های PCI و IRI

قطعه	شاخص	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	γ_{0i}
۲	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۵۵
	IRI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۵
۴	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۴	۰/۵۵
	IRI	۱	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۵
۱۰	PCI	۱	۰/۷۶	۰/۶۲	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۵۸
	IRI	۱	۰/۷۶	۰/۶۲	۰/۵۲	۰/۴۵	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۶
۱۱	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۴۰	۰/۳۹	۰/۴۸	۰/۵۷
	IRI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۵
۱۲	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۷
	IRI	۱	۰/۷۶	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۵
۱۳	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۴۳	۰/۵۷
	IRI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۵
۱۴	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۴۴	۰/۴۹	۰/۵۸
	IRI	۱	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۴	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۵
۱۵	PCI	۱	۰/۷۳	۰/۵۸	۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۴۹	۰/۵۸
	IRI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۳	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۵۴
۱۶	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۷۰	۰/۶۱
	IRI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۴
۱۷	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۷
	IRI	۱	۰/۷۶	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۵
۱۸	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۵۶
	IRI	۱	۰/۷۶	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۵
۱۹	PCI	۱	۰/۷۶	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۶۰
	IRI	۱	۰/۷۶	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۵
۲۰	PCI	۱	۰/۷۴	۰/۵۹	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۸۷	۰/۶۴
	IRI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۱	۰/۴۳	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۵۴
۲۱	PCI	۱	۰/۷۴	۰/۵۹	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۴۴	۰/۵۶
	IRI	۱	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۵۴
۲۲	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۵۵
	IRI	۱	۰/۷۴	۰/۵۹	۰/۵۰	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۵۴
۲۳	PCI	۱	۰/۷۴	۰/۶۰	۰/۵۱	۰/۴۴	۰/۴۰	۰/۴۴	۰/۴۱	۰/۵۷
	IRI	۱	۰/۷۴	۰/۵۸	۰/۴۸	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۵۳
۲۴	PCI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۵۷
	IRI	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۵۵
۲۷	PCI	۱	۰/۷۴	۰/۵۹	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۵۵
	IRI	۱	۰/۷۴	۰/۵۹	۰/۴۹	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۵۴

جدول ۴- نتایج حاصل از مدل سازی تئوری خاکستری و رگرسیون

خطای رگرسیون	رگرسیون	تئوری خاکستری	پیش بینی $\hat{x}^{(0)}$	$Z^{(1)}$	$\rho(k) = \frac{x^{(0)}(k)}{x^{(1)}(k-1)}$	$x^{(1)}(i) = \sum_{j=1}^k x^{(0)}(j)$	$x^{(0)}(i)$
---	---	---	---	---	---	۱/۰۸	۱/۰۸
۰/۰۳	۱/۱۰	۰/۱۲	۱/۰۱	۱/۶۴	۱/۰۴	۲/۳۱	۱/۱۳
۰/۰۲	۱/۱۶	۰/۰۳	۱/۱۵	۲/۱۸	۰/۵۳	۳/۳۹	۱/۱۸
۰/۰۶	۱/۲۹	۰/۰۹	۱/۳۲	۴	۰/۳۶	۴/۶۲	۱/۲۳
۰/۰۱	۱/۴۶	۰/۰۴	۱/۵۱	۵/۳۵	۰/۳۱	۶/۰۹	۱/۴۷
۰/۰۲	۱/۷۰	۰/۰۱	۱/۷۳	۶/۹۵	۰/۲۸	۷/۸۱	۱/۷۲
۰/۰۳	۱/۹۹	۰/۰۳	۱/۹۹	۸/۸۲	۰/۲۵	۹/۸۳	۲/۰۲
۰/۰۲	۲/۳۴	۰/۰۵	۲/۲۷	۱/۹۹	۰/۲۳	۱۱/۱۵	۲/۳۲

$$\hat{x}^{(1)}(k) = (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a} \quad (11)$$

$$= (1.08 + \frac{0.7977}{0.1353})e^{+0.1353(k-1)} - \frac{0.7977}{0.1353}$$

با استفاده از روش رگرسیون و نرم افزار Mini-Tab می توان مدل ریاضی پیش بینی IRI را بر حسب سال ارائه نمود. جدول ۵ آنالیز واریانس میان متغیرهای IRI و سال را نشان می دهد. مشاهده می شود که با ۹۹/۶ درصد همبستگی مناسبی بین متغیرها وجود دارد و سطوح معناداری کمتر از ۰/۰۵ بوده که بیان گر ارائه مدل رگرسیونی معنادار است. بر این اساس رابطه ریاضی مدل رگرسیونی به صورت رابطه (۱۲) است. ستون هفتم جدول ۴ نیز مقدار پیش بینی براساس روش رگرسیون را نشان می دهد.

$$IRI = 1.140 - 0.07601year + 0.02827year^2 \quad (12)$$

به منظور پیش بینی شاخص IRI قطعه دوم، داده های مربوط به آن در ستون اول و اعمال عملگر تجمعی بر روی توالی داده ها به ترتیب در ستون دوم جدول ۴ آمده است. ستون سوم جدول ۴ به بررسی هموار بودن داده های توالی $X^{(0)}$ می پردازد. حاصل مقدار $\rho(K)$ باید کمتر از ۰/۵ باشد تا مدل سازی GM(1,1) از دقت بالایی برخوردار باشد. بنابراین برای $K > 3$ هموار بودن تقریبی داده ها برقرار است. توالی داده های $X^{(1)}$ را به کمک عملگر میانگین مجاور به $Z^{(1)}$ تبدیل می کنیم. $Z^{(1)}$ حاصل میانگین هر مشاهده و مشاهده ماقبل در توالی $X^{(1)}$ است که در ستون چهارم جدول ۴ آمده است. مدل نهایی سری زمانی به صورت رابطه ۱۱ خواهد بود.

مقدار پیش بینی با استفاده از روش تئوری خاکستری در ستون پنجم جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این که توالی داده ها برای $K > 3$ هموار می باشد سه مقدار اول پیش بینی دارای دقت لازم برای تخمین IRI نمی باشد.

و نگهداری برای روسازی در دوره‌ای معین اعمال می‌شود [۳۳]. در این مقاله نیز این استراتژی‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌کنید هنگامی که وضعیت شاخص IRI برابر یا بیش‌تر از ۴ باشد نیازمند عملیات ترمیم است که انتظار می‌رود در سال ۱۴۰۵ که مقدار $x^0(10) \cong 4$ (در هر دو مدل خاکستری و رگرسیونی) باشد این امر صورت گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مطالعه مدل‌های اضمحلال روسازی پرداخته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مدل‌های ارائه شده به پایگاه‌های اطلاعاتی وابسته می‌باشند. از این رو مدلی با عنوان تئوری خاکستری پیشنهاد شد تا عدم قطعیت موجود در سیستم را در نظر بگیرد. مزیت این روش نسبت به روش‌های احتمالاتی عدم نیاز به دانستن توزیع‌های احتمال می‌باشد. در سنجش ارزیابی عملکرد روسازی راه‌ها دو شاخص PCI و IRI در نظر گرفته شد که تاثیر به سزایی بر مدیریت بودجه تعمیر و نگهداری راه‌ها دارند اما با وجود این، جامع و کامل نمی‌باشند. بنابراین در تحقیقات آینده لازم است سایر شاخص‌ها در نظر گرفته شود. برای بررسی مدل ارائه شده یک مسیر اصلی بزرگراهی (گرمسار-قم) انتخاب شد و نتایج نشان داد هر دو شاخص تقریباً IRI و PCI تاثیر یکسانی بر سن روسازی دارند. لذا از شاخص ناهمواری به علت هزینه کم برداشت، همبستگی بالا با راحتی و هزینه کاربران راه و نیز بهترین ابزار اندازه‌گیری رفتار عملکردی بلندمدت روسازی در این مدل استفاده شد. برای صحت‌گذاری مدل پیشنهادی مقایسه‌ای بین این روش و رگرسیون صورت گرفت. نتایج مقایسه نشان داد که مقدار اختلاف متوسط خطای نسبی در دو مدل ۰/۰۱ می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد از روش‌های Arima و Arma برای پیش‌بینی اضمحلال روسازی و مقایسه با تئوری خاکستری در آینده استفاده شود.

تقدیر و تشکر

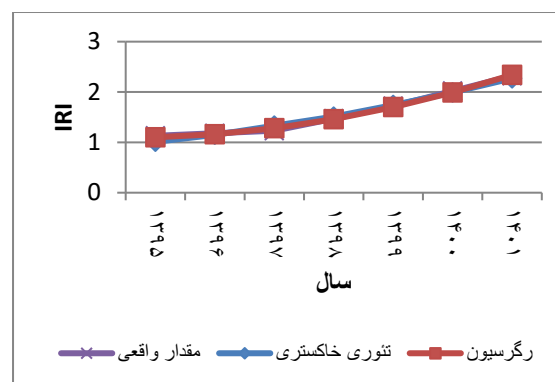
این مقاله با حمایت مالی بنیاد Iran National Science Foundation (INSF) و سازمان Iran Road Maintenance and Transportation Organization شماره طرح ۴۰۱۳۳۳۳۳ انجام شده است.

تعارض منافع

جدول ۵- آنالیز واریانس متغیر IRI برحسب سال

R Square	Adjusted R Square	Sum of Square	Mean Square	F	P-value
۹۹٪/۶	۹۹٪/۴	۱/۴۷۱۸	۰/۷۳۵۹	۶۰۴/۵۵	۰/۰۰۰

شکل (۱) مقایسه‌ای را بین روش رگرسیون و تئوری خاکستری ارائه می‌دهد. همان طور که پارامترهای ارائه شده جدول ۵ نشان می‌دهد تطابق بسیار خوبی بین مقادیر واقعی IRI واقعی و مدل ارائه شده وجود دارد. مقدار خطای نسبی در مدل خاکستری برابر ۰/۰۲۷ (ستون ششم جدول ۴) و در مدل رگرسیونی برابر ۰/۰۱۷ (ستون هشتم جدول ۴) می‌باشد که اختلاف آن ۰/۰۱ است.



شکل ۱- مقایسه مقادیر IRI حاصل از رگرسیون و تئوری خاکستری برای قطعه دوم

جدول ۶- تعیین استراتژی تعمیر و نگهداری براساس وضعیت شاخص [۳۴ و ۳۵]

گزینه ترمیم و نگهداری	نگهداری پیشگیرانه	ترمیم	بازسازی
وضعیت	خوب	متوسط	ضعیف
شاخص IRI (m/km)	$IR < 4$	$4 \leq IR \leq 8$	$IR > 8$
شاخص PCI	$70 < PCI \leq 100$	$55 < PCI \leq 70$	$PCI \leq 55$

در شکل (۱) مقدار IRI با گذشت زمان در حال افزایش است. در بسیاری از مقالات تعمیرات و نگهداری روسازی، فرض می‌کنند که مجموعه محدودی از استراتژی‌های تعمیر

نویسندگان اعلام می کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد میشوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

مشارکت های نویسندگان

حامد ملکی: ایده اصلی این طرح پس از مرور ادبیات توسط فرد مذکور ایجاد شده است.

محمدباقر فخرزاد: معرفی و بررسی روش حل مساله به

عنوان استاد راهنما بر عهده فرد مذکور بوده است.
اکبر دانش: جمع آوری، استخراج و بروزآوری داده ها با این فرد بوده است.

حمزه ذاکری: معرفی شاخص ها و بررسی چگونگی جمع آوری هریک از این شاخص ها به عنوان مشاور فنی بر عهده شخص مذکور بوده است.

منابع مالی

طرح مذکور با حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران و سازمان راهداری انجام شده است.

مراجع

- [1] Golroo, Amir, Amirhosein Fani, and Hamed Naseri. "Pavement maintenance planning of large-scale transportation networks considering energy consumption." *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 53, no. 6 (2021): 2695-2712. (in Persian)
- [2] Robinson, Richard, Uno Danielson, and Martin Snaith. "Road maintenance management." First Edition, Macmillan, London, UK, 1998.
- [3] Solatifar, Nader. "Analysis of Uncertainties in Deterioration Process of Asphalt Pavements based on Roughness Index Using LTPP Data." *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 53, no. 4 (2021): 1259-1274. (in Persian)
- [4] Jafarnejad, Milad. "Modeling of asphalt pavement performance prediction (Case Study: Sari Street)." Msc Thesis, Shahrood University of Technology, 2016.
- [5] Elhadidy, Amr A., Sherif M. El-Badawy, and Emad E. Elbeltagi. "A simplified pavement condition index regression model for pavement evaluation." *International Journal of Pavement Engineering* 22, no. 5 (2021): 643-652.
- [6] Hasibuan, Rijal Psalmen, and Medis Sejahtera Surbakti. "Study of Pavement Condition Index (PCI) relationship with International Roughness Index (IRI) on Flexible Pavement." In *MATEC web of conferences*, vol. 258, p. 03019. EDP Sciences, 2019.
- [7] Akbari, Reza, Amir Amini, , and Ahmad Safari Mohammadi. "Evaluation of the performance of regression and neural network models in estimating the relationship between pavement status index (PCI) and international roughness index (IRI)." *Journal of Transportation Research* 20, no. 2 (2023): 63-76. (in Persian)
- [8] Arhin, Stephen A., Lakeasha N. Williams, Asteway Ribbiso, and Melissa F. Anderson. "Predicting pavement condition index using international roughness index in a dense urban area." *Journal of Civil Engineering Research* 5, no. 1 (2015): 10-17.
- [9] Piryonesi, S. Madeh, and Tamer E. El-Diraby. "Examining the relationship between two road performance indicators: Pavement condition index and international roughness index." *Transportation Geotechnics* 26 (2021): 100441.
- [10] Tsunokawa, Koji, and Joseph L. Schofer. "Trend curve optimal control model for highway pavement maintenance: Case study and evaluation." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 28, no. 2 (1994): 151-166.
- [11] Ozbay, Kaan, and Ryan Laub. "Models for pavement deterioration using LTPP." (2001).
- [12] ARA. "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures." NCHRP 1-37A, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2004.
- [13] Prozzi, J. A., and S. M. Madanat. "Development of pavement performance models by combining experimental and field data." *Journal of Infrastructure Systems* 10, no. 1 (2004): 9-22.

- [14] Bekheet, W., K. Helali, A. Halim, and J. Springer. "A Comprehensive Approach for the Development of Performance Models for Network-Level PMS Using LTPP Data." In Proceedings of 84th Annual Meeting of TRB, Washington, DC. 2005.
- [15] Kargah-Ostadi, Nima, Shelley M. Stoffels, and Nader Tabatabaee. "Network-level pavement roughness prediction model for rehabilitation recommendations." *Transportation Research Record* 2155, no. 1 (2010): 124-133.
- [16] Khattak, Mohammad Jamal, Mohammad Abdullah Nur, Mohammad Reza-Ul-Karim Bhuyan, and Kevin Gaspard. "International Roughness Index Models for HMA Overlay Treatment of Flexible and Composite Pavements for Louisiana." Proceedings of 92nd Annual Meeting of TRB, Washington, D.C., 2013.
- [17] Mohamed Jaafar, Zul Fahmi Bin, Waheed Uddin, and Yacoub Najjar. "Asphalt Pavement Roughness Modeling Using the Artificial Neural Network and Linear Regression Approaches for LTPP Southern U.S. States." Proceedings of 95th Annual Meeting of TRB, Washington, D.C., 2016.
- [18] Madelin, K. "Highway maintenance management in Shropshire." K. Madelin, MSc, CEng, Paper 10210 Transport Board and Road Panel Transport Planning, 1994.
- [19] Lancashire County Council, Local Transport Plan (LTP). "Strategic Environmental Assessment (SEA)." Amendments Document, 2009.
- [20] Hafez, Marwan, Khaled Ksaibati, and Rebecca A. Atadero. "Optimizing expert-based decision-making of pavement maintenance using artificial neural networks with pattern-recognition algorithms." *Transportation Research Record* 2673, no. 11 (2019): 90-100.
- [21] Ghasemzadeh, Hosein, and Abolfazl Hasani. "Model Development for Predicting Bitumen Complex Shear Modulus (G^*) and Phase Angle (δ) Due to Aging." *Journal of Transportation Engineering* 1, no. 3 (2010): 81-91. (in Persian)
- [22] Abdelaziz, Nader, Ragaa T. Abd El-Hakim, Sherif M. El-Badawy, and Hafez A. Afify. "International Roughness Index prediction model for flexible pavements." *International Journal of Pavement Engineering* 21, no. 1 (2020): 88-99.
- [23] Mazari, Mehran, and Daniel D. Rodriguez. "Prediction of pavement roughness using a hybrid gene expression programming-neural network technique." *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 3, no. 5 (2016): 448-455.
- [24] Hu, Yongping, Wei Si, Xingxiang Kang, Yu Xue, Haopeng Wang, Tony Parry, and Gordon Dan Airey. "State of the art: multiscale evaluation of bitumen ageing behavior." *Fuel* 326 (2022): 1-15.
- [25] Hu, Yongping, Wei Xia, Yu Xue, Pinxue Zhao, Xuanye Wen, Wei Si, Haopeng Wang, Lu Zhou, and Gordon Dan Airey. "Evaluating the ageing degrees of bitumen by rheological and chemical indices." *Road Material & Pavement Design* 24, no. 1 (2023): 1-18.
- [26] Wu, Chengbin, Xingzhou Zhu, and Wei Si. "Sensitivity analysis of asphalt pavement performance under freeze-thaw cycles by applying reliability method." *Case Studies in Construction Materials* 19 (2023): 1-14.
- [27] Alimoradi, Saeid, Amir Golroo, and Seyed Mohammad Asgharzadeh. "Development of pavement roughness master curves using Markov Chain." *International Journal of Pavement Engineering* 23, no. 2 (2020): 1-11.
- [28] Babaei, A, A Kavousi, M Hemati, M.H Rezaeifar, and M. Forouzan. "Application of Markov theory in pavement condition prediction." *International Conference on Civil Engineering, Architecture and urban infrastructure*, Tabriz, Iran, 2015. (in Persian)
- [29] Shokoohi, Mohammad, Amir Golroo, and Abdollah Ardeshtir. "Optimal planning of pavement maintenance and rehabilitation considering pavement deterioration uncertainty." *AUT Journal of Civil Engineering* 5, no. 3 (2021): 481-494.
- [30] Rose, Susan, Binu Sara Mathew, Kuncheria P. Isaac, and A. S. Abhaya. "Risk based probabilistic pavement deterioration prediction models for low volume roads." *International Journal of Pavement Engineering* 19, no. 1 (2018): 88-97.
- [31] Hosseini, Seyed Azim, Masoud Sabae, Seyed Amir Saadatjoo, Saeed Fatemi, and Seyed Ali Ziaee. "Presenting a pavement condition index prediction model using the international roughness index values: a case study of selected Iranian highways." *Journal of Civil Engineering* 34, no. 4 (2021): 69-80. (in Persian)

- [32] Akbari, Reza, Amir Amini, and Ahmad Safari. "Developing the relationship between international pavement condition and roughness indices using regression and neural network models." 13th National Conference and Exhibition of Bitumen, Asphalt and Machinery, 2021. (in Persian)
- [33] Pourgholamali, Mohammadhosein, Samuel Labi, and Kumares C. Sinha. "Multi-objective optimization in highway pavement maintenance and rehabilitation project selection and scheduling: A state-of-the-art review." *Journal of Road Engineering* 3, no. 3 (2023): 239-251.
- [34] Dashtizand, Maryam. "The importance of the PMS pavement management system for suburban roads and the use of spatial information systems." 9th Conference on Asphalt and Asphalt Mixes, 2018. (in Persian)
- [35] Saffarzadeh, Mahmoud , Amir Kavousi, and Mohammad Bagheri Sari. "Development of a Pavement Management Model at the Project Level by Analytical Hierarchy Process (AHP)." *Journal of Transportation Research* 3, no. 2 (2006): 101-111. (in Persian)