



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 ^b, Akbar Danesh, Hamzeh Zakeri

^a Department Name of Organization, Name of Faculty, University, City, Country (first author's affiliation)

^b Department Name of Organization, Name of Faculty, University, City, Country (second author's affiliation)

PAPER INFO

Paper history:

Received:

Revised:

Accepted:

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/>

© 2024 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: [email of corresponding author](#)

How to cite this article:

مدل پیش بینی عدم قطعیت اضمحلال روسازی با استفاده از تئوری خاکستری

مطالعه موردی: مسیر بزرگراهی گرمسار-قم

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

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله:	امروزه پس از آن که شبکه‌ای از راه‌ها شکل می‌گیرد مدیریت ترمیم و به‌سازی راه‌ها در اولویت قرار می‌گیرد. به منظور مدیریت ترمیم و بهینه سازی راه‌ها شاخص‌های ناهمواری، وضعیت روسازی، کیفیت روسازی، مقاومت لغزشی و خدمت دهی راه در مدل سازی اضمحلال نقش اساسی دارند. 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. 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 هر دو شاخص بر سن روسازی، از شاخص IRI برای مدل سازی 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 پیش بینی اضمحلال از مدل‌های پیش بینی خاکستری که قادر به تشخیص وضعیت آتی سیستم‌های غیرقطعی بر پایه دانش موجود می‌باشد استفاده شده است. برای صحت گذاری 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 ۰/۰۱ است.
واژگان کلیدی:	
مدیریت روسازی، تئوری خاکستری، مدل های اضمحلال روسازی، ارزیابی روابط خاکستری، رگرسیون،	

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 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/>)

برعهده دارند. به گونه‌ای که حمل و نقل جاده‌ای دارای

آمار میزان جا به جایی سالانه ۶۰۰ میلیون تن کالا، ۹۰۰

میلیون 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 روسازی راه‌ها با انتخاب

شاخص مناسب در روش نگهداری انجام پذیرد علاوه بر

۱-مقدمه^۱

راه‌ها از مهم‌ترین زیرساخت‌های شبکه حمل و نقل هر

کشور می‌باشند که نقش کلیدی در انتقال کالا و مسافر

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: @...@.

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

کاهش هزینه‌های نگهداری، رضایت کاربران راه را به همراه دارد [۲].

هدف مدل‌های پیش بینی اضمحلال، تعیین رابطه‌ای منطقی میان وضعیت روسازی و سایر عوامل موثر بر آن پس از بهره برداری 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 (PQI) اشاره کرد [۳].

یکی از عواملی تاثیرگذار در مصرف سوخت وسایل نقلیه وضعیت راه‌ها می‌باشد. سیستم مدیریت روسازی نیازمند به پیش بینی 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 هریک 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 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 زمان بندی 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 لاثوب [۱۱]، مدل mechanistic-empirical pavement design (MEPDG) [۱۲]، مدل پروزی و مدنت [۱۳]، مدل بکیت 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 پیش بینی رگرسیون می‌باشد. روش رگرسیون برای ایجاد یک رابطه تجربی بین دو یا چند متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. قاسم زاده [۲۱] برای پیش بینی مدول مرکب برشی و زاویه فازی قیر تحت تاثیر فرسودگی از رگرسیون استفاده کرده است. اما از مشکلات رگرسیون در مدل‌های پیش بینی 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 [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 بهره برداری 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 طبقه بندی 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 پیش بینی اضمحلال روسازی در سال‌های پس از بهره برداری 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 زنجیره 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 پیش بینی 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 شبیه سازی است که نتایج را بر اساس نمونه گیری 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 جمع آوری شده برای متغیرهای مستقل برازش داده 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

قطعیّت 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 تعیین ارزیابی عملکرد روسازی راه‌ها استفاده شده است.

۲- روش تحقیق

سیستم‌های عمرانی معمولاً تحت تأثیر 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 بگیرید. اگر X_{IRI} توالی شاخص ناهمواری بین المللی 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.

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

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

$$\bar{X}_i(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(k) \quad (2)$$

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

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

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

$$\Delta_i(k) = |x_0'(k) - x_i'(k)| \quad (3)$$

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

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

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.

$$\gamma_{0i} = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M} \quad \xi \in (0, 1) \quad i = 0, 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

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

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.

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

- 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	۱۰۰	۸۷/۹	۱۳۲	۶۳/۹	۱۷۲	۳۸	۲۳۲	۲۳۲
۴	۱۰۰	۹۸/۶	۱۳۵	۸۰/۳	۱۶۱	۴۶/۵	۲۳۳	۲۳۳
۱۰	۱۰۰	۱۵۵	۱۶۸	۵۲/۳	۲۰۷	۲۳/۳	۲۴۲	۲۴۲
۱۱	۱۰۰	۱۳۲	۸۸	۵۷/۵	۱۹۸	۲۰/۴	۲/۵۸	۲/۵۸
۱۲	۱۰۰	۱۵۳	۹۸	۵۴/۱	۲۴۴	۲۲/۸	۲	۲
۱۳	۱۰۰	۱۳۶	۸۲/۳	۴۸/۹	۲۰۱	۲۳/۹	۲/۸۹	۲/۸۹
۱۴	۱۰۰	۱۳۰	۹۱/۳	۳۸/۳	۲۱۳	۲۰/۱	۲/۸۲	۲/۸۲
۱۵	۱۰۰	۱۳۹	۸۸/۷	۳۳/۵	۱۹۹	۱۸/۸۶	۳/۴	۳/۴
۱۶	۱۰۰	۱۳۶	۷۹/۷	۴۷/۶	۲۰۹	۱۴/۷	۲/۹۴	۲/۹۴
۱۷	۱۰۰	۱۳۹	۸۷/۵	۵۷/۷	۱۷۷	۲۲/۶	۲/۵۴	۲/۵۴
۱۸	۱۰۰	۱۲۹	۸۷/۹	۷۲/۵	۱۸۶	۲۶/۵	۲/۵۱	۲/۵۱
۱۹	۱۰۰	۱۳۴	۸۶/۳	۱۴۶	۲۸۷	۲۴/۷	۲/۳۸	۲/۳۸
۲۰	۱۰۰	۱۳۳	۸۷/۳	۱۶۸	۳۶۱	۱۳/۲	۳/۰۴	۳/۰۴
۲۱	۱۰۰	۱۵۲	۹۱/۲	۱۹۱	۵۱/۶	۲۲/۹	۳/۴۱	۳/۴۱
۲۲	۱۰۰	۱۳۱	۸۳/۹	۱۳۳	۱۴۰	۴۶/۷	۲/۴۶	۲/۴۶
۲۳	۱۰۰	۱۳۸	۶۸/۳	۱۶۹	۱۷۵	۸/۵	۳/۷۵	۳/۷۵
۲۴	۱۰۰	۱۳۵	۸۱/۶	۱۵۵	۳۶	۳۰/۶	۲/۸۳	۲/۸۳
۲۷	۱۰۰	۱۱۳	۹۶/۳	۱۲۷	۶۴/۷	۲۵	۲/۵۵	۲/۵۵

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.

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

۳- مطالعه موردی

سیستم مدیریت روسازی با تکیه بر اطلاعات جمع آوری شده در بانک‌های اطلاعاتی به تحلیل نتایج می‌پردازد و مدل‌های پیش بینی 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 جمع آوری شده که تعداد ۱۸ قطعه تحت حداقل شرایط نگهداری بوده اند. جدول ۱ اطلاعات آماری مقادیر IRI و PCI مسیر تحت مطالعه را به صورت سالانه در یک دوره ۴ ساله نشان می‌دهد.

همان طور که جدول ۲ نشان می‌دهد ابتدا توالی ها 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 بیش تر 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.

• 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	
	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI	PCI	IRI
۲	۱۰۰	۱/۰۸	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	۱/۲۶	۹۹/۴۶	۱/۲۹	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	۱/۵۵	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	۱/۲۲	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	۱/۵۳	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	۱/۳۶	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	۱/۳۰	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	۱/۲۹	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	۱/۳۶	۹۳/۲۳	۱/۴۲	۸۶/۴۶	۱/۴۸	۷۹/۷	۱/۵۵	۶۳/۶۵	۱/۸۲	۴۷/۶	۲/۰۹	۳۱/۱۵	۲/۵۱	۱۴/۷	۲/۹۴
۱۷	۱۰۰	۱/۲۹	۹۵/۸۳	۱/۳۶	۹۱/۶۶	۱/۴۴	۸۷/۵	۱/۵۲	۷۷/۶	۱/۶۴	۵۷/۷	۱/۷۷	۴۰/۱۵	۲/۱۵	۲۲/۶	۲/۵۴
۱۸	۱۰۰	۱/۲۹	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	۱/۳۴	۹۵/۴۳	۱/۳۱	۹۰/۸۶	۱/۳۸	۸۶/۳	۱/۴۶	۵۷/۵	۱/۷۶	۳۸/۷	۲/۰۶	۲۶/۷	۲/۲۲	۲۴/۷	۲/۳۸
۲۰	۱۰۰	۱/۳۳	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	۱/۵۲	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	۱/۲۱	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	۱/۳۸	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	۱/۳۵	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	۱/۱۲	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	۰/۴۸	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

۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۸
۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲
۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۱۸
۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲
۱/۴۷	۱/۴۷	۱/۴۷	۱/۴۷	۱/۴۷	۱/۴۷	۱/۴۷	۱/۴۷
۱/۷۲	۱/۷۲	۱/۷۲	۱/۷۲	۱/۷۲	۱/۷۲	۱/۷۲	۱/۷۲
۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۲
۲/۳۲	۲/۳۲	۲/۳۲	۲/۳۲	۲/۳۲	۲/۳۲	۲/۳۲	۲/۳۲

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 می‌دهد. مشاهده می‌شود 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 می‌دهد.

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

• 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 و مدل ارائه شده وجود دارد.

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.

مدل سازی فرآیند اضمحلال نیاز به اندازه گیری شاخص-های 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 پیش-بینی اضمحلال روسازی بوده است.

به منظور پیش بینی شاخص IRI قطعه دوم، داده‌های 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 داده‌های توالی $X^{(0)}$ می‌پردازد. 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 داده‌ها برقرار است. توالی داده‌های $X^{(1)}$ را به کمک عملگر میانگین مجاور به $Z^{(1)}$ تبدیل می‌کنیم. 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.

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

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

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

• جدول ۴-نتایج حاصل از مدل سازی تئوری

خاکستری و رگرسیون

خطای رگرسیون	رگرسیون	تئوری خاکستری	پیش بینی	$Z^{(1)}$	$\rho(k) = \frac{x^{(0)}(k)}{x^{(1)}(k-1)}$	$x^{(1)}(i) = \sum_{j=1}^k x^{(0)}(j)$	$x_0^{(1)}(i)$
--------------	---------	---------------	----------	-----------	---	--	----------------

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 Arma و Arima برای پیش‌بینی اضمحلال روسازی و مقایسه با تئوری خاکستری در آینده استفاده شود.

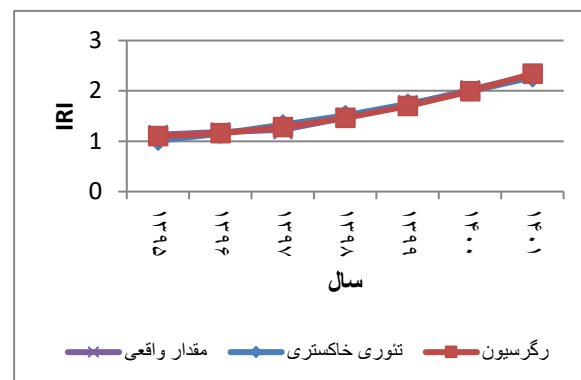
تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت مالی بنیاد Iran National Science Foundation (INSF) و سازمان Iran Road Maintenance and Transportation Organization با شماره طرح ۴۰۱۳۳۳۳ انجام شده است.

تعارض منافع

نویسندگان باید همه تعارض منافع بالقوه را در نسخه خطی افشا کنند، از جمله روابط مالی، مشاور، نهادی و سایر روابط که ممکن است منجر به سوگیری یا تضاد منافع شود. در صورت عدم وجود تضاد منافع باید چنین بیان شود: نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

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

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 و نگهداری برای روسازی در دوره‌های معین اعمال می‌شود [۳۳]. در این مقاله نیز این استراتژی‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور 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.

• 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	$70 < PCI \leq 100$	$55 < PCI \leq 70$	$PCI \leq 55$

۴- نتیجه‌گیری

مراجع

- [۱] گل رو، امیر؛ فانی، امیرحسین؛ ناصری، حامد، "برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر شبکه‌های بزرگ-مقیاس روسازی با در نظر گرفتن مصرف انرژی"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۳(۶)، (۱۴۰۰)، ۲۶۹۵-۲۷۱۲.
- [۲] Robinson, R., Danielson, U. & Snaith, M., "Road maintenance management". First Edition, Macmillan, London, UK., (1998).
- [۳] صولتی فر، نادر، "تحلیل عدم قطعیت فرآیند اضمحلال روسازی آسفالتی مبتنی بر شاخص ناهمواری با استفاده از داده‌های LTPP". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۳(۴)، (۱۴۰۰)، ۱۲۵۹-۱۲۷۴.
- [۴] جعفرنژاد، میلاد، مدل سازی پیش‌بینی عملکرد روسازی آسفالتی (مطالعه موردی: معابر شهر ساری)، پایان نامه کارشناسی ارشد، (۱۳۹۴).
- [۵] Elhadidy, A.A., El-Badawy, S.M. & Elbeltagi, E.E., "A simplified pavement condition index regression model for pavement evaluation", International Journal of Pavement Engineering, 22(5), (2021), 643-652.
- [۶] Hasibuan, R.P. & Surbakti, M.S., "Study of Pavement Condition Index (PCI) relationship with International Roughness Index (IRI) on Flexible Pavement", Paper presented at the MATEC web of conferences, (2019).
- [۷] اکبری، رضا؛ امینی، امیر؛ صفری محمدی، احمد، "بررسی عملکرد مدل های رگرسیون و شبکه عصبی در تخمین رابطه بین شاخص وضعیت روسازی و شاخص ناهمواری بین المللی". فصلنامه علمی حمل و نقل، ۲۰(۲)، (۱۴۰۲)، ۶۳-۷۶.
- [۸] Arhin, S.A., Williams, L.N., Ribbiso, A., & Anderson, M.F., "Predicting pavement condition index using international roughness index in a dense urban area", Journal of Civil Engineering Research, 5(1), (2015), 10-17.
- [۹] Pirayonesi, S.M., & El-Diraby, T.E., "Examining the relationship between two road performance indicators: Pavement condition index and international roughness index", Transportation Geotechnics, 26, (2021), 1-20.
- [۱۰] Tsunokawa, K. & Schofer, J., "Trend Curve Optimal Control Model for Highway Pavement Maintenance: Case Study and Evaluation". Transportation Research, Part A, 28(2), (1994), 151-166.
- [۱۱] Ozbay, K. & Laub, R., "Models for Pavement Deterioration Using LTPP". Report no. FHWA-NJ-1999-030, Federal Highway Administration, Washington, D.C., (2001).
- [۱۲] 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).
- [۱۳] Prozzi, J. & Madanat, S. "Development of Pavement Performance Models by Combining Experimental and Field Data". Journal of Infrastructure Systems, 10(1), (2004), 9-22.
- [۱۴] Bekheet, W., Helali, K., Halim, A. & Springer, J., "A Comprehensive Approach for the Development of Performance Models for Network-Level PMS Using LTPP Data". Proceedings of 84th Annual Meeting of TRB, Washington, D.C., (2005).
- [۱۵] Kargah-Ostadi, N., Stoffels, S. & Tabatabaee, N., "Network-Level Pavement Roughness Prediction Model for Rehabilitation Recommendations". Proceedings of 89th Annual Meeting of TRB, Washington, D.C., (2010).
- [۱۶] Khattak, M.J., Nur, M.A., Bhuyan, M.R.U.-K. & Gaspard, K., "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).
- [۱۷] Mohamed Jaafar, Z.F., Uddin, W. & Najjar, Y., "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).
- [۱۸] Madelin, K., "Highway maintenance management in Shropshire", K. Madelin, MSc, CEng, Paper 10210 Transport Board and Road Panel Transport Planning, (1994).
- [۱۹] Lancashire County Council, Local Transport Plan (LTP). "Strategic Environmental Assessment (SEA)", Amendments Document, (2009).

[۲۰] Hafez, M., Ksaibati, K., & Atadero, R.A., "Optimizing Expert-Based Decision-Making of Pavement Maintenance Using Artificial Neural Networks with Pattern-Recognition Algorithms". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673, (2019), 90-100.

[۲۱] قاسم زاده طهرانی، حسین؛ حسینی، ابوالفضل، "ارائه مدل پیش بینی مدول مرکب بررشی و زاویه فازی قیر تحت تاثیر فرسودگی". *مجله مهندسی حمل و نقل*، (۱۳۸۹)

[۲۲] Abdelaziz, N., Abd El-Hakim, R.T., El-Badawy, S.M. & Afify, H.A., "International roughness index prediction model for flexible pavements". *International Journal Pavement Engineering*, 21(1), (2018), 88-99.

[۲۳] Mazari, M. & Rodriguez, D.D., "Prediction of pavement roughness using a hybrid gene expression programming-neural network technique". *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 3(5), (2016), 448-455.

[۲۴] Hu, Y., Si, W., Kang, X., Xue, Y., Wang, H., Parry, T. & Airey, G.D., "State of the art: multiscale evaluation of bitumen ageing behavior", *Fuel*, 326, (2022).

[۲۵] Hu, Y., Xia, W., Xue, Y., Zhao, P., Wen, X., Si, W., Wang, H., Zhou, L. & Airey, G.D., "Evaluating the ageing degrees of bitumen by rheological and chemical indices", *Road Material & Pavement Design*, (2023), 1-18.

[۲۶] Wu, C., Zhu, X. & Si, W., "Sensitivity analysis of asphalt pavement performance under freeze-thaw cycles by applying reliability method", *Case Studies in Construction Materials*, 19, (2023)

[۲۷] Alimoradi, S., Golroo, A. & Asgharzadeh, S.M., "Development of pavement roughness master curves using Markov Chain", *International Journal of Pavement Engineering*, (2020), 1-11.

[۲۸] بابایی، عبدالله؛ کاووسی، امیر؛ همتی، مجید؛ رضایی، فرید؛ محمدحسین؛ فروزان، محمد، "کاربرد تئوری مارکوف در پیش بینی وضعیت روسازی"، *کنفرانس بین المللی معماری، مهندسی عمران و زیرساخت های شهری، تبریز، ایران*، (۲۰۱۵)

[۲۹] Shokoohi, M., Golroo, A. & Ardeshtir, A., "Optimal Planning of Pavement Maintenance and Rehabilitation Considering Pavement Deterioration Uncertainty", *AUT Journal of Civil Engineering*, 5(3), (2021), 481-494.

[۳۰] Rose, S., Mathew, B.S., Isaac, K.P. & Abhaya, A., "Risk based probabilistic pavement deterioration prediction models for low volume roads", *International Journal of Pavement Engineering*, 19(1), (2018), 88-97.

[۳۱] حسینی، عظیم؛ صباپی، مسعود؛ ساعتجو، امیر؛ فاطمی، سعید؛ ضیایی، علی، "ارائه مدل پیش بینی شاخص وضعیت روسازی با استفاده از مقادیر شاخص بین المللی ناهمواری مطالعه موردی آزادراه های منتخب ایران"، *نشریه مهندسی عمران*، (۴)، (۱۴۰۰)، ۶۹-۸۰

[۳۲] اکبری، رضا؛ امینی، امیر؛ صفری محمدی، احمد، "توسعه ارتباط بین شاخص های وضعیت روسازی و ناهمواری بین المللی با استفاده از مدل های رگرسیون و شبکه عصبی"، *سیزدهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات*، (۱۴۰۰)

[۳۳] Pourgholamali, M.H., Labi, S. & Sinha, K.C., "Multi-objective optimization in highway pavement maintenance and rehabilitation project selection and scheduling: A state-of-the-art review", *Journal of Road Engineering*, 3, (2023), 239-251.

[۳۴] زند، مریم، "اهمیت سیستم مدیریت روسازی راه های برون شهری و استفاده از سیستم اطلاعات مکانی"، *نهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات*، (۱۳۹۶).

[۳۵] صفارزاده، محمود؛ کاووسی، امیر؛ باقری، محمد، "ارائه مدلی برای مدیریت روسازی راه در سطح پروژه به روش تحلیل سلسله مراتبی"، *پژوهشنامه حمل و نقل*، (۲)، (۱۳۸۵)، ۱۰۱-۱۱۰.