



Introducing a New Method for the Pavements' Maintenance and Rehabilitation Planning

H. Behbahani¹, N. Nadimi^{2*}, M. Khaleghi¹

¹ Civil Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

² Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

ABSTRACT: Roads are considered as one of the most extensive civil infrastructures and national capitals of each country. Pavement maintenance and rehabilitation (M&R) management is one of the most important problems, which can help to reduce further costs. Two issues are important in the field of road maintenance and rehabilitation management; the first type of M&R option and then time its application. In this paper, it was attempted to combine prioritization, artificial intelligence, and optimization methods to select the optimal option for the maintenance and rehabilitation of pavement sections at any time interval. For this purpose, the analytical hierarchy process was used to prioritize the branches in the pavement network. In the next step, using a linear programming model, the probability of selecting maintenance and rehabilitation options for pavement sections was maximized considering several specific constraints. A fuzzy inference system was used to determine the probability of selecting each maintenance and rehabilitation option in pavement sections. A case study in Mahan (Kerman) was used to run the proposed model. Based on the results, it can be concluded that the proposed algorithm can consider different parameters and indices for pavement branches and sections. In addition, it offers different scenarios for the selection of M&R options in a year. The model helps to compare various scenarios based on different budgets for each year. In all, the proposed algorithm facilitates the process of selecting M&R options in the different sections of a road network and provides a scientific approach to manage maintenance roads.

Review History:

Received: Dec. 10, 2019

Revised: Feb. 15, 2020

Accepted: Feb. 24, 2020

Available Online: Mar. 10, 2020

Keywords:

Pavement management

Fuzzy

Optimization

Maintenance and rehabilitation

1. INTRODUCTION

Road pavement maintenance and rehabilitation (M&R) is an important and traditional task among highway engineers. Various M&R strategies and procedures have been employed by related organizations to preserve pavement and postpone its deterioration. The type and strategy of choosing M&R options had been the subject of much research over the years [1]. Lack of proper maintenance for a road can cause premature failure. Road crashes also might increase. Road maintenance costs vary from 3% to 10% of the value of roads in Iran. It is essential to be started from the beginning of the operation and continued throughout the life of the road [2].

A detailed systematic and scientific approach is needed to manage pavement rehabilitation and maintenance and simple models cannot be used in this regard. This paper intends to discuss M&R management using several scientific tools including hierarchical analysis process (AHP), linear programming (LP), and fuzzy inference system (FIS) simultaneously. The main innovation of this paper will be to present a new framework based on mathematical decision-making tools to determine the optimal choice for pavement M&R.

*Corresponding author's email: navidnadimi@uk.ac.ir

2. METHODOLOGY

The main purpose of this paper is to present a framework with mathematical modeling and planning to determine the optimal M&R options for asphalt concrete pavement sections at any time interval. In this regard, first by using the AHP model, the branches in the pavement network are prioritized. In the next step, using FIS, the possibility of choosing any M&R option in each pavement section is achieved. Finally, using linear programming, it is tried to determine optimum options with the objective function of maximizing the probabilities and at the same time considering several constraints.

The first step is to prioritize the branches with the AHP model, taking into account the four parameters of functional classification, traffic, access, functional classification, and the tourism-commercial importance of the branch. For this purpose, paired comparisons would be conducted using experts' viewpoints and then the model is run by Expert Choice 11 software.

The output of the FIS is the probability of selecting each M&R option given in the linear programming objective function. Fuzzy means lack of clarity, and this concept is similar to human inference. FIS is used to systematically describe human knowledge and make appropriate inferences



Table 1. An example of a table

Variable	Change interval
PCI	0-100
SN	0-10
IRI	0-16
DV	0-100
DPCI	0-6
BPN	0-100

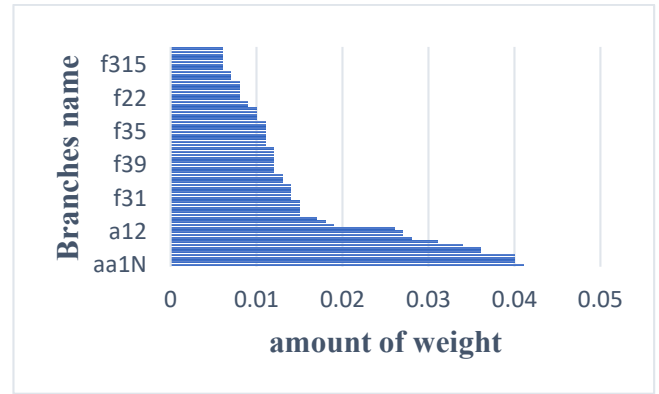


Fig. 1. Weights diagram of pavement network branches

and decisions. The purpose of fuzzy logic is to map from the input space to the output space. An elementary mechanism in this regard is the use of a set of if-then commands called fuzzy rules [3].

By reviewing the research literature on factors and parameters affecting the selection of M&R option, the fuzzy input variables were selected, and using experts' opinions, 6 variables from the total of variables considered for our FIS model. After the selection of input variables (Table 1), their membership functions have been determined as Gaussian.

In this paper, for each M&R option including crack filling, fog seal, slurry seal, chip seal, micro-surfacing, recycling, overlay, and reconstruction FIS rules have been provided. The output of each FIS is the probability of selecting that option based on different combinations of input variables

Finally, linear programming was used to maximize the probability of selecting M&R options in pavement sections. The decision variable in this model is a binary, which indicates the implementation of an option or not. The objective

function of the model is to maximize the probabilities relating to performing a specific option. Several constraints relating to the total budget, ability of the organization in each year, proportionality between functional classification and type of M&R option and among others.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The model was run for a road network as the case study in Mahan (Kerman). The weight of the pavement branches (ω_j) obtained by AHP with Expert Choice 11 software can be seen in Fig. 1. In this Figure, the numbers written on the horizontal axis indicate the amount of weight and the names written on the vertical axis are the names of the pavement network branches.

The probability of selecting the M&R options for pavement sections was calculated by the FIS model. Membership functions for input indices are Gaussian. As an example, the membership function for the PCI input variable is shown in Fig. 2.

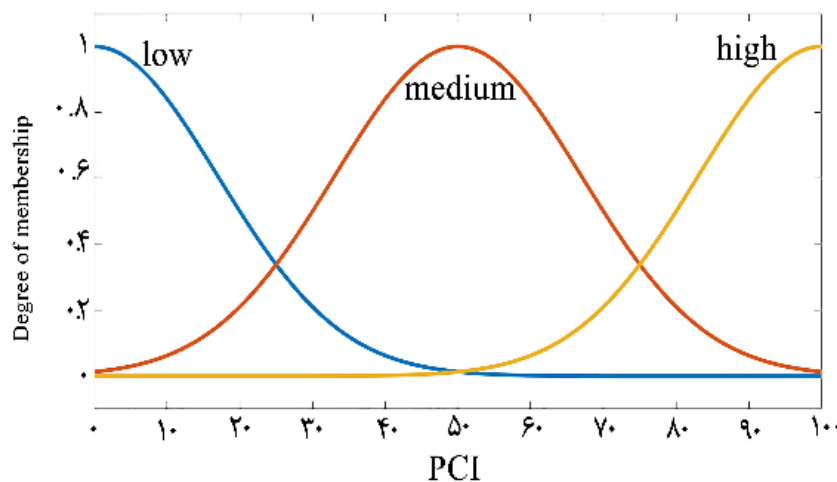


Fig. 2. Input membership function for modeling using fuzzy inference system

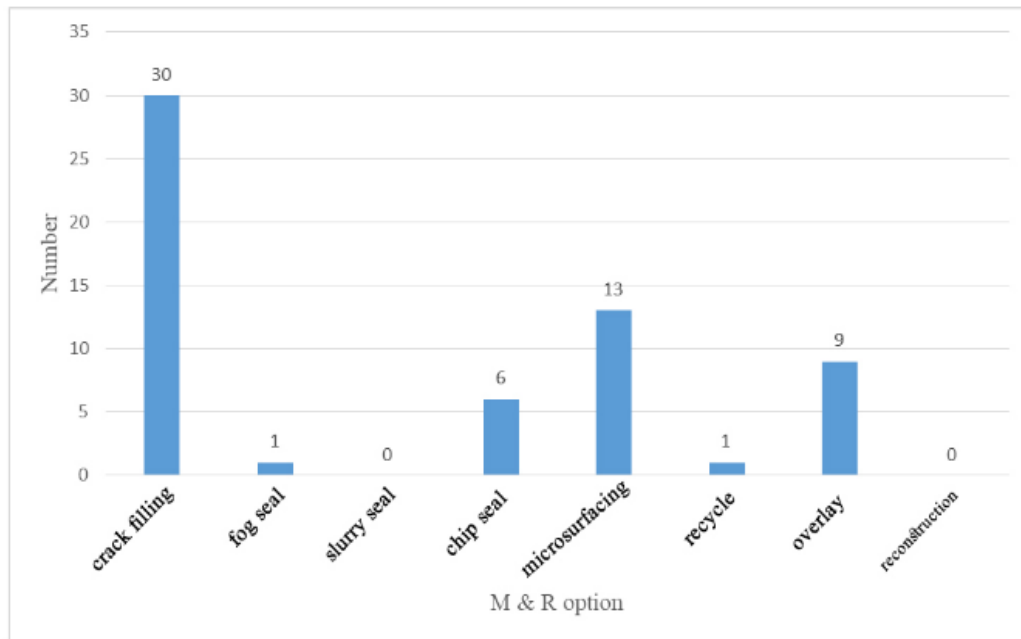


Fig. 3. The number of options selected for each method in the first scenario

Finally, with the help of MATLAB and executing the linear programming model, the results are obtained (Fig. 3). Here, for two different scenarios with an unlimited budget (allocation of 660 billion rials) and with a limited budget allocation (allocation of 300 billion rials), the results have been presented.

Proposed sections in the first scenario for preventive maintenance are mostly micro-surfacing and are in high importance branches. In the second scenario, assuming a budget of 300 billion rials, results indicated that the model uses the maximum ability of the M&R organization but offers less costly options (such as fog seal and chip seal).

4. CONCLUSION

The results of this paper revealed that the functional classification had the greatest effect on the prioritization of the branches as expected and freeways with the weight of 0.04 are the most important roads.

The current model in both budget scenarios proposes options for filling the cracks that are expected to have a high PCI index.

In the first scenario, assuming an unlimited budget, the results indicated that the model, while using the total ability, uses more micro-surfacing from preventive options. However, in the second scenario for the high-priority branches, the model leads to less costly options. In both budget scenarios, the model proposes options for major repairs for the sections that do not have the appropriate structural condition.

REFERENCES

- [1] K.A. Abaza, Deterministic performance prediction model for rehabilitation and management of flexible pavement, *International Journal of Pavement Engineering*, 5(2) (2004) 111-121.
- [2] m. Fakhri, m. Aalaleh, a. Edrisi, introducing the optimal model of pavement maintenance and rehabilitation considering the cost of users for Iran, *journal of transportation engineering*, 7(3) (2016) 523-540.
- [3] W. Gu, Y. Ouyang, S. Madanat, Joint optimization of pavement maintenance and resurfacing planning, *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(4) (2012) 511-519.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Behbahani, N. Nadimi, M. Khaleghi, *Introducing a New Method for the Pavements' Maintenance and Rehabilitation Planning*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(7) (2021) 613-616.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17506.6585](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17506.6585)





ارائه یک روش جدید جهت برنامه ریزی فرآیند تعمیر و نگهداری روسازی راه ها

حمید بهبهانی^۱، نوید ندیمی^{۲*}، مصطفی خالقی^۱

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.
^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:
مدیریت روسازی
فازی
بهینه سازی
ترمیم و نگهداری

خلاصه: راه‌ها از گسترده‌ترین زیرساخت‌های عمرانی و جزء سرمایه‌های ملی هر کشور محسوب می‌شوند. مدیریت ترمیم و نگهداری راه‌ها از مهم‌ترین امور برای حفظ وضعیت راه‌ها در حالت مطلوب بوده و چنانچه این امر به‌طور مناسب انجام نشود، هزینه‌های بیشتری در آینده وارد خواهد شد. دو موضوع تعیین نوع گزینه ترمیم و نگهداری و زمان بکارگیری آن در مبحث مدیریت تعمیر و نگهداری راه‌ها دارای اهمیت فراوان است. در این مقاله سعی شده است تا با ترکیب ابزارهای اولویت‌بندی، هوش مصنوعی و بهینه‌سازی روشی جهت انتخاب گزینه بهینه ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی در هر بازه زمانی ارائه شود. برای این منظور ابتدا برای اولویت‌بندی شاخه‌های شبکه روسازی از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده می‌شود. سپس با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مشخص بهینه می‌شود. برای به دست آوردن احتمال انتخاب هر گزینه ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی از سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده می‌شود. برای اجرای مدل پیشنهادی از یک شبکه روسازی اطراف شهر ماهان (کرمان) استفاده می‌شود. بر اساس نتایج حاصل شده می‌توان گفت که الگوریتم به کار رفته در این مقاله می‌تواند با در نظر گرفتن پارامترها و شاخص‌های مختلف مربوط به شاخه‌ها و قطعات روسازی، سناریوهای مختلفی برای انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در بازه‌های زمانی یک ساله به سازمان متولی راه بدهد و این الگوریتم فرآیند انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات مختلف را تسهیل می‌کند و یک روش علمی و مدون جهت مدیریت تعمیر و نگهداری راه‌ها ارائه می‌دهد.

۱- مقدمه

نگهداری و حفظ این سرمایه سوق داده است. مهندسان حوزه راه از زمانی که روسازی‌های بتن آسفالتی و سیمانی وجود داشته‌اند به نگهداری آن‌ها و اعمال گزینه‌های ترمیم و نگهداری می‌پرداختند. راهبردها و روش‌های ترمیم و نگهداری گوناگونی توسط سازمان‌های متولی راه برای حفظ وضعیت روسازی‌ها و به تأخیر انداختن اضمحلال به کار گرفته شده است نوع و راهبرد انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری موضوع تحقیقات زیادی در سال‌های متمادی بوده است [۱]. عدم نگهداری مناسب یک راه باعث خرابی و زوال زودرس آن می‌شود. همچنین خرابی‌های راه باعث افزایش استهلاك وسایل نقلیه نیز می‌شود. سوانح و اتفاقات پیش‌بینی نشده نیز ممکن است در اثر خرابی‌های راه اتفاق بیفتد. هزینه

شبکه روسازی یک مؤلفه کلیدی از زیرساخت‌های حمل و نقل هستند. این شبکه سرمایه با ارزشی برای هر کشور بوده و باید به‌گونه‌ای اداره شود که در زمانی نسبتاً طولانی در سطح کیفی مناسب باقی بماند. با وجود اینکه کاربران راه‌ها به‌طور فزاینده‌ای تقاضای بهبود کیفیت، راحتی و ایمنی راه را دارند، اما امروزه در بسیاری از کشورها، به دلیل بحران اقتصادی، روند کسری بودجه در سازمان‌های مرتبط با راه در حال افزایش است. اضمحلال راه‌ها و زیرساخت‌های مرتبط، افزایش ترافیک و محدودیت‌های بودجه‌ای، تصمیم‌گیران سازمان‌های متولی راه‌ها را بیش از پیش به استفاده بهینه از منابع موجود برای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: navidnadimi@uk.ac.ir



بخش‌های چهارم و پنجم ارائه می‌گردد. در نهایت بخش ششم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- مرور ادبیات تحقیق

به‌طور کلی سه موضوع اساسی در زمینه روسازی قابل طرح و پیگیری است. این موارد عبارت‌اند از: ساخت روسازی، مدیریت روسازی و تحقیق در زمینه روسازی. در گذشته فقط به نگهداری روسازی‌ها توجه می‌شد و مدیریت روسازی‌ها امری ناآشنا بود. عامل تعیین‌کننده در انتخاب روش ترمیم و نگهداری مناسب، تجربه مهندسين بود. همچنین توجه چندانی به هزینه‌های چرخه عمر و یا به اولویت‌بندی بر اساس ضرورت در سطح شبکه نمی‌شد. در اقتصاد امروزی به همان نسبت که از عمر روسازی‌های موجود می‌گذرد نیاز به یک روش سیستماتیک برای تعیین ضرورت‌ها در امر ترمیم و نگهداری بیشتر احساس می‌گردد. امروزه شبکه روسازی‌ها نیاز به مدیریت دارد و نگهداری به تنهایی دیگر کافی نیست [۳].

مدیریت یک شبکه روسازی به‌صورت دقیق و با جزئیات کاری بسیار پیچیده و دشوار است. پیچیدگی این مسأله ناشی از نیاز به مدل‌های قابل‌اطمینان پیش‌بینی عملکرد روسازی و داده‌های وسیع مربوط به گذشته و حال خرابی‌های روسازی، تاریخچه ترمیم و نگهداری و بارگذاری ترافیکی تعداد زیادی از قطعات روسازی با مشخصات سازه‌ای متفاوت است. برای پیدا کردن راهبردهای بهینه نگهداری روسازی‌ها در سطح سرویس مطلوب در طول دوره زمانی مشخص شده نیاز به برنامه مدیریت روسازی است. این برنامه می‌تواند با استفاده از مدل‌های اولویت‌بندی و بهینه‌سازی طرح‌ریزی شود [۴].

سازمان‌های متولی راه به دلیل محدودیت بودجه همیشه با چالش انتخاب اقتصادی‌ترین راهبردهای ترمیم و نگهداری روسازی که بتواند سطح خدمت را در حالی که استفاده از منابع موجود را بهینه می‌کند در بالاترین حد ممکن نگه دارد، روبرو هستند. این سازمان‌ها همیشه با این سؤال مواجه هستند که چه گزینه‌ای را در چه زمانی به کدام قطعه روسازی اعمال کنند؟ جواب این سؤال به دلیل پیچیدگی ذاتی مسأله باید با روش‌های سیستماتیک داده شود و از مدل‌های ذهنی ساده بهره زیادی نمی‌توان برد؛ بنابراین بعضی از سیستم‌های مدیریت روسازی از روش‌های اولویت‌بندی و بعضی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌کنند. تکنیک‌های بهینه‌سازی و اولویت‌بندی

نگهداری راه‌ها در ایران از ۳ تا ۱۰ درصد ارزش راه‌ها تغییر می‌کند و ضرورت دارد که نگهداری راه از آغاز بهره‌برداری آن شروع شده و عملیات نگهداری به‌طور مستمر و در طول عمر راه انجام شود [۲].

در مدیریت و نگهداری راه‌ها، مدیران بایستی بر اساس ورودی‌های گوناگون مانند اطلاعات مربوط به خرابی روسازی، ناهمواری، مقاومت لغزندگی، افت و خیز لایه‌ها، نرخ اضمحلال روسازی و ... اقدام به انتخاب گزینه ترمیم و نگهداری مناسب در زمان مناسب کنند. مدیران متولی راه در بحث مدیریت ترمیم و نگهداری و راهبرد انتخاب گزینه‌ها باید برای برقراری تعادل بین بهبود عملکرد روسازی‌های مضمحل شده با وضعیت نامناسب سازه‌ای (ترمیم اساسی) و نگهداری سایر روسازی‌ها در وضعیت مناسب (نگهداری پیشگیرانه) تلاش کنند؛ اما نکته‌ای که حائز اهمیت است زیاد بودن و بعضاً پیچیده بودن متغیرهای ورودی در تصمیم‌گیری است. علاوه بر این، مدیریت روسازی معمولاً با طول زیادی از راه‌ها و یا شبکه گسترده‌ای از معابر مواجه است. می‌توان نتیجه گرفت که در بحث مدیریت ترمیم و نگهداری روسازی نیاز به یک روش سیستماتیک و علمی دقیق بوده و در این مقوله از مدل‌های ساده نمی‌توان بهره گرفت. این مقاله در نظر دارد تا با استفاده از چند ابزار علمی شامل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP^۱)، برنامه‌ریزی ریاضی خطی (LP^۲) و سیستم استنتاج فازی (FIS^۳) به بحث مدیریت ترمیم و نگهداری در سطح شبکه و پروژه بپردازد. در اینجا ابتدا با استفاده از AHP شاخه‌های شبکه روسازی اولویت‌بندی می‌شوند. سپس با LP بیشینه نمودن احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری با لحاظ نمودن برخی محدودیت‌های مشخص انجام می‌شود. در مدل LP مورد نظر، احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری با FIS به عنوان یکی از قدرتمندترین روش‌ها در محاسبات نرم تعیین می‌شوند. به واقع نوآوری اصلی این مقاله در ارائه یک چارچوب تازه مبتنی بر ابزارهای تصمیم‌گیری ریاضی به‌طور هم‌زمان، جهت تعیین گزینه بهینه ترمیم و نگهداری روسازی خواهد بود.

مقاله حاضر شش بخش دارد. در بخش دوم مروری بر ادبیات تحقیق مرتبط با موضوع مدیریت و نگهداری راه‌ها، انواع روش‌های متداول در نگهداری راه‌ها و غیره ارائه می‌شود. بخش سوم به تشریح روش تحقیق می‌پردازد. داده‌ها و نتایج تحقیق نیز به ترتیب در

1 Analytical Hierarchy Process

2 Linear Programming

3 Fuzzy Inference System

می‌تواند تعمیرات ضروری را برای مدت کوتاهی به تعویق بیندازد، اما انجام این کار به هیچ وجه مقرون به صرفه نیست. زمانی که سازمان‌های متولی راه با تعدادی روسازی نیازمند تعمیرات اساسی مواجه هستند باید تلاش کنند تا راه‌حلی پیدا کنند که بتوانند تعادلی بین بهبود عملکرد روسازی‌های مضمحل شده و نگهداری سایر روسازی‌ها در وضعیت مناسب برقرار کنند تا روسازی‌هایی که در وضعیت مناسبی بوده‌اند به نقطه‌ای نرسند که دیگر اعمال نگهداری پیشگیرانه مؤثر نباشد [۸].

تجارب نشان می‌دهد اضمحلال روسازی از نقطه‌ای به بعد شتاب می‌گیرد تا به خرابی اساسی برسد. برای کاهش نرخ اضمحلال، گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قالب یک راهبرد مشخص برای حفظ وضعیت روسازی، ایمنی و کیفیت سواری باید به روسازی اعمال شوند تا روسازی با روشی اقتصادی بتواند دوره طرح خود را خدمت‌دهی کند (شکل ۱) [۱].

برای انتخاب گزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز سه روش وجود دارد که عبارت‌اند از: روش‌های مبتنی بر تجربیات قبلی، روش‌های مبتنی بر وضعیت کنونی و روش‌های مبتنی بر هزینه‌های چرخه عمر روسازی. در روش انتخاب بر مبنای وضعیت کنونی روسازی لازم است تا ارزیابی کاملی از وضعیت روسازی صورت پذیرد. برای این منظور خرابی‌ها، ناهمواری، افت و خیز و نیز مقاومت لغزندگی روسازی بایستی ارزیابی شود [۳].

محققان بسیاری تا امروز تلاش کرده‌اند که مدل‌هایی برای نگهداری، ترمیم و تعمیر روسازی آسفالتی راه‌ها ارائه دهند و در این زمینه پژوهش‌های زیادی انجام شده است که در اینجا به چند مورد از این پژوهش‌ها اشاره می‌شود.

در سال ۲۰۱۳، هانتینگتون^۱ و همکاران از درخت تصمیم‌گیری برای شناسایی گزینه ترمیم و نگهداری مناسب برای جاده‌های رویه‌دار وایومینگ^۲ استفاده کردند. در این درخت تصمیم‌گیری، سه متغیر در نظر گرفته شده است: PSI^۳، عرض راه و عمق شیارشدگی [۹]. هلالی و همکاران (۱۹۹۶) یک سیستم مدیریت روسازی در سطح شبکه برای شبکه بزرگراه تورنتو توسعه دادند. این سیستم روسازی شامل ارزیابی وضعیت روسازی، مدل‌های اضمحلال قطعی

نقش مهمی را در تعیین کیفیت و مقرون به صرفه بودن راهبردهای ترمیم و نگهداری ایفا می‌کنند [۴، ۵].

عموماً وضعیت روسازی‌ها در دسته‌بندی‌های کیفی مثل خوب، متوسط و بد بیان می‌شود و همچنین روش‌های ترمیم و نگهداری در دسته‌بندی‌های موضعی (پیشگیرانه و موقتی)، فراگیر پیشگیرانه و اساسی تقسیم‌بندی می‌شوند. هر کدام از دسته‌های روش‌های ترمیم و نگهداری خود شامل تعدادی گزینه است که هزینه واحد و تأثیرات متفاوتی دارند [۶]. ترمیم و نگهداری موضعی موقتی عبارت است از ترمیم و نگهداری موضعی که قابلیت بهره‌برداری روسازی را با رعایت ایمنی حفظ می‌کند. ترمیم و نگهداری موضعی پیشگیرانه به‌عنوان فعالیت‌هایی که هدف اولیه آن‌ها کاهش نرخ اضمحلال است تعریف می‌شود. این فعالیت پر کردن و آب‌بندی ترک‌ها را شامل می‌شود. ترمیم و نگهداری فراگیر پیشگیرانه فعالیت‌هایی هستند که با هدف اولیه کاهش نرخ اضمحلال در سطح گسترده‌ای از قطعات روسازی اعمال می‌شوند. این فعالیت‌ها بکار بردن آسفالت‌های حفاظتی برای روسازی‌های با رویه بتن آسفالتی را در بر می‌گیرند. برای روسازی‌های با رویه آسفالتی سه نوع ترمیم و نگهداری فراگیر پیشگیرانه تعریف شده است. این سه نوع بر اساس نوع خرابی‌های موجود در هر یک از قطعات روسازی اعمال می‌شوند. ترمیم و نگهداری اساسی به فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که منظور از آن‌ها تصحیح یا بهبود شرایط عملکردی یا سازه‌ای موجود در کل قطعه روسازی است [۳].

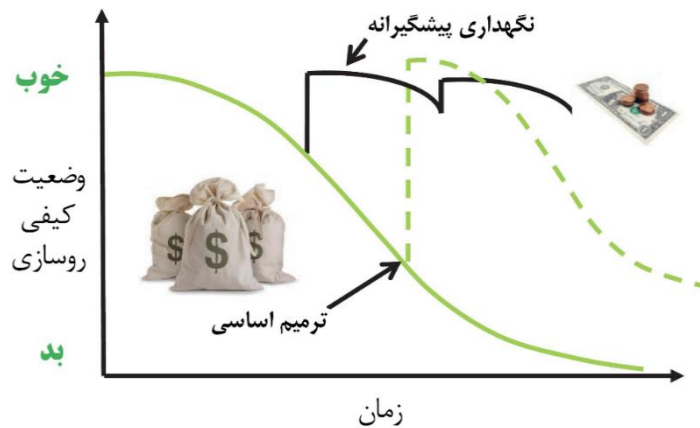
اگر گزینه ترمیم و نگهداری خاص در زمان‌های متفاوتی در طول عمر روسازی اجرا شود نتایج متفاوتی خواهد داشت (یا در یک زمان خاص بر روی روسازی‌هایی با شرایط متفاوت). زمانی که گزینه‌های نگهداری پیشگیرانه در زمان درست بر روی روسازی مناسب اجرا شوند تبدیل به ابزار مقرون به صرفه‌ای برای رسیدن به عمر و عملکرد مطلوب روسازی می‌شوند. گزینه‌هایی که خیلی زود اجرا شوند مزایای کمی خواهند داشت و برعکس گزینه‌هایی که خیلی دیر اجرا شوند بدون فایده خواهند بود و در افزایش عمر روسازی موفقیتی حاصل نمی‌شود؛ بنابراین برای هر روسازی یک زمان یا شرایط بهینه‌ای (یا یک محدوده زمان و شرایط بهینه) وجود دارد که در آن نسبت فایده به هزینه یک روش ترمیم و نگهداری حداکثر می‌شود [۷].

اگرچه اعمال نگهداری پیشگیرانه به روسازی‌های مضمحل شده

1 Huntington

2 Wyoming

3 Pavement Servicibility Index



شکل ۱. نمایش کیفی وضعیت روسازی و تأثیر نگهداری بر آن

Fig. 1. Qualitative display of pavement condition and effect of maintenance on it

در شرایط مختلف با محدودیت‌های بودجه یا اهداف عملکردی؛ به حداقل رساندن بودجه مورد نیاز در طول دوره برنامه‌ریزی برای رفع محدودیت‌ها؛ و به حداقل رساندن بودجه محدود سالانه مورد نیاز برای رفع محدودیت‌ها [۱۳]. وو^۲ و همکارش (۲۰۰۸) یک روش پشتیبانی از تصمیم برای انتخاب پروژه‌های ترمیم و نگهداری بهینه بر اساس ترکیبی از سه روش را پیشنهاد کردند: خوشه‌بندی کی میانگین^۳، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح. از خوشه‌بندی کی میانگین برای دسته‌بندی پروژه‌های ترمیم و نگهداری به گروه‌های همگن مختلف و از AHP برای تعیین اهمیت هر گروه استفاده شد. برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای انتخاب پروژه‌های بهینه با هدف بیشینه‌سازی مزایای ترمیم و نگهداری با وجود محدودیت بودجه استفاده شد [۱۴]. بهدانوویچ^۴ (۲۰۰۸) ساده‌ترین کاربرد منطق فازی در تصمیم‌گیری در مورد ضرورت راه‌حل‌های ترمیم و نگهداری برای قطعات روسازی را ارائه کرد. نرخ اضمحلال و ناهمواری طولی به عنوان ورودی‌های فازی و اعتماد به نیاز به ترمیم و نگهداری به عنوان خروجی فازی در نظر گرفته شد [۱۵]. الحدیدی^۵ و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای برنامه‌ریزی اقدامات ترمیم و نگهداری با استفاده از الگوریتم ژنتیک همراه با مدل اضمحلال مبتنی بر زنجیره مارکوف معرفی کردند. مدل توسعه یافته در شبکه بزرگراه در مصر با در نظر گرفتن حداقل

تجربی، اولویت‌بندی ترمیم و نگهداری و تحلیل اولویت بودجه است. بودجه بهینه و راهبردهای قابل اجرا ترمیم و نگهداری طی برنامه ۱۰ ساله توسط درخت‌های تصمیم‌گیری که ماحصل تجربه مهندسی و تجزیه و تحلیل اقتصادی هزینه‌های چرخه عمر بود، طراحی شد [۱۰]. معظمی و همکاران (۲۰۱۱) یک شاخص اولویت‌بندی ترمیم و نگهداری روسازی برای شبکه راه تهران با استفاده از AHP، با توجه به شاخص وضعیت روسازی، حجم ترافیک و رتبه راه مشخص کردند. مدل‌سازی منطق فازی مربوط به استنتاج انسان به عنوان گام بعدی برای یافتن نتایج دقیق موتور اولویت‌بندی ترمیم و نگهداری به کار گرفته شد [۱۱]. بابایی و نادران (۲۰۱۲) مدل مدیریت سطح شبکه مبتنی بر زنجیره مارکوف را ارائه دادند که می‌توانست پیش‌بینی شرایط روسازی و بهینه کردن منابع را هم‌زمان انجام دهد. برای اطمینان از حداکثر مقدار ممکن شبکه روسازی بالاتر از حداقل قابل قبول، این مدل بر روی توابع چند هدفه با اهداف زیر استفاده شد: به حداقل رساندن نسبت بدترین وضعیت در شبکه و به حداقل رساندن مقدار روسازی از تمام حالت‌ها که آستانه بحرانی را رد کردند به جز بدترین حالت [۱۲]. دلا گارزا^۱ و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل تصمیم‌گیری ساده در سطح شبکه برای بهینه‌سازی ترمیم و نگهداری روسازی را بر اساس برنامه‌ریزی خطی با قیود بودجه سالانه و هدف عملکردی روسازی مورد نظر سازمان متولی راه توسعه دادند. پس از آن این مدل به شبکه روسازی بین ایالتی برای بررسی تعدادی از اهداف واحد ذیل اعمال شد: به حداقل رساندن تعداد قطعات روسازی

2 Wu
3 k-means clustering
4 Bohdanovich
5 Elhadidy

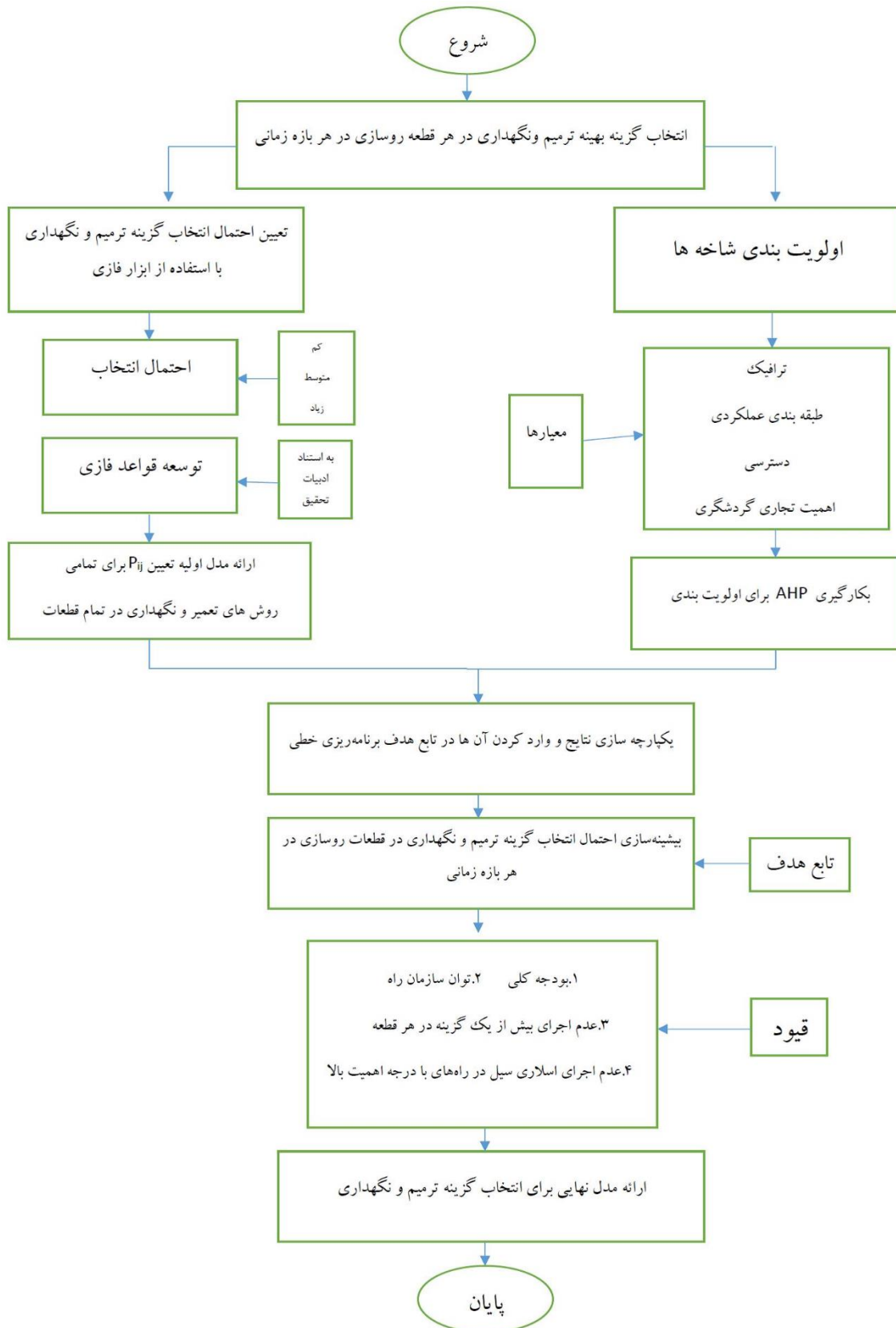
1 De La Garza

شده هزینه‌های ترمیم و نگهداری و حداکثر شدن PCI اجرا شد [۱۶]. ابازا و آشور (۲۰۰۹) به توسعه یک مدل مدیریت روسازی جهت دستیابی به شرایط بهینه روسازی پرداختند. برای این منظور از مدل برنامه ریزی عدد صحیح استفاده و محدودیت‌هایی مرتبط با بودجه و شرایط بهبود لحاظ گردید. نتایج مدل نشان داد که کارایی مدل جهت دستیابی به شرایط بهینه روسازی بسیار بالا بوده است [۱۷]. گو و همکارانش (۲۰۱۲)، برای یک بازه زمانی نامحدود یک مسأله بهینه سازی جهت کمینه کردن هزینه های چرخه عمر شامل هزینه های کاربران و هزینه های نگهداری و بازسازی ارائه کردند. برای این منظور از برنامه ریزی ریاضی غیرخطی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که چنانچه فعالیت های نگهداری به طور بهینه بکار گرفته شود، به شکل معناداری عمر خدمت دهی روسازی افزایش خواهد یافت که این موضوع هزینه های کلی چرخه عمر روسازی را کاهش خواهد داد [۱۸]. مدوری و مدانت (۲۰۱۳)، به ارائه یک مدل برنامه ریزی دینامیک تخمینی برای بهینه سازی فرآیند مدیریت روسازی پرداختند. این روش قادر خواهد بود تا مسائل پیچیده فرموله شده را استفاده از تکنیک های شبیه سازی و کاهش ابعاد تابع حل کند [۱۹]. یو و همکارانش (۲۰۱۵)، یک مدل بهینه سازی چندهدفه برای بهینه سازی برنامه نگهداری روسازی آسفالتی در سطح پروژه استفاده کردند. اجزای تابع هدف شامل عنصر وضعیت روسازی، عنصر هزینه و عنصر محیط اطراف لحاظ شده است. نتایج مطالعه نشان داد که استفاده از این مدل می تواند به کاهش هزینه و تأثیرات محیطی به ترتیب در حد ۸۰/۳ درصد و ۷۷/۸ درصد و افزایش عملکرد روسازی تا ۱۴۶/۶ درصد منتج شود [۲۰]. احمد و همکاران (۲۰۱۸) از مدل بهینه سازی گروه ذرات چند هدفه گسسته با روش آشفته گی برای مدیریت ترمیم و نگهداری روسازی استفاده کردند. هدف اصلی این پژوهش یافتن استراتژی بهینه ترمیم و نگهداری برای روسازی های بتن آسفالتی با حداقل کردن هزینه ترمیم و نگهداری و حداکثر کردن عملکرد روسازی بود [۲۱]. خان و همکاران (۲۰۱۶) شبکه راه کوپینزلند استرالیا را بر اساس معیارهای نوع روسازی، بارگذاری ترافیکی و استقامت روسازی به ۲۷ گروه تقسیم کردند، سپس با بهره گیری از نرم افزار HDM-۴ با اهداف حداقل کردن هزینه ها و حداکثر سازی عملکرد روسازی سعی در پیدا کردن گزینه بهینه از بین ۳۶ راه موجود (۶ استاندارد حداقل بر اساس شاخص

ناهمواری بین المللی تعریف شد و شش گزینه ترمیم و نگهداری) برای هر گروه از ۲۷ گروه تعریف شده، کردند [۲۲]. خاوندی و همکارش (۲۰۱۸) از مدل بهینه سازی چندهدفه قطعی برای مدیریت روسازی های انعطاف پذیر در سطح شبکه با اهداف حداقل کردن هزینه های سازمان، حداقل کردن هزینه های کاربران و حداکثر کردن ارزش باقیمانده روسازی ها در پایان دوره تحلیل استفاده کردند. برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامحدود، برای پیش بینی شرایط روسازی از مدل پیش بینی عملکرد روسازی تگزاس و برای محاسبه هزینه کاربران نیز از مدل موجود در نرم افزار HDM-۴ بهره گرفتند [۲۳]. تورس-ماچی و همکارانش (۲۰۱۸)، به ارزیابی تأثیرات محیطی و محدودیت های بودجه ای به طور توأمان بر تصمیم گیری های مرتبط با نگهداری روسازی پرداختند. با توجه به اینکه به طور سنتی در بحث مدیریت روسازی بر جنبه های اقتصادی و فنی تمرکز می شود، موضوع تأثیرات زیست محیطی تصمیم گیری ها مورد غفلت قرار می گیرد. بر این اساس، این محققین به تحلیل تأثیر جنبه های زیست محیطی و مسائل اقتصادی به طور توأمان بر طراحی راهبردهای تعمیر و نگهداری روسازی راه ها پرداختند. بر اساس نتایج این تحقیق، روکش آسفالتی و میکروسرفیسینگ در زمان وجود محدودیت های بودجه ای در روسازی آسفالتی پیشنهاد شدند [۲۴]. بنابراین، با توجه به مرور ادبیات تحقیق حاضر می توان گفت که تحقیقات متنوعی در راستای ارائه تصمیم بهینه برای مدیریت ترمیم و نگهداری روسازی راه ها انجام شده است. با توجه به رشد ابزارهای ریاضی متنوع مرتبط با بحث تصمیم گیری، استفاده از آن ها در حیطه مدیریت عملیات ترمیم و نگهداری روسازی راه ها نیز مورد بررسی قرار می گیرد. در نتیجه مادامی که این ابزارها در حال گسترش هستند، استفاده از آن ها در موضوع مدیریت ترمیم و نگهداری راه ها نیز مطرح خواهد بود. همچنین بحث استفاده توأمان از دو یا چند ابزار نیز یکی از مقوله هایی است که در مباحث مرتبط با تصمیم گیری برای افزایش کارایی آن ها لحاظ می شود.

۳- روش تحقیق

هدف اصلی این مقاله ارائه چارچوبی با مدل سازی و برنامه ریزی ریاضی، برای تعیین گزینه بهینه ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی بتن آسفالتی در هر بازه زمانی است. در این راستا ابتدا با استفاده از



شکل ۲. فلوجارت روند انجام تحقیق

Fig. 2. Research flowchart

جدول ۱. هزینه اجرای گزینه‌های مختلف

Table 1. Cost of implementation of different options

گزینه ترمیم و نگهداری	هزینه واحد (تومان)	i
پر کردن ترک	۶۹۰۰ (متر طول)	۱
فاگ سیل	۳۶۰۰ (هر مترمربع)	۲
اسلاری سیل	۴۷۰۰۰ (هر مترمربع)	۳
چیپ سیل	۳۵۰۰۰ (هر مترمربع)	۴
میکروسرفیسینگ	۱۰۰۰۰۰ (هر مترمربع)	۵
بازیافت	۳۱۲۰۰ (هر مترمربع به ازای هر ۱ سانتی‌متر)	۶
روکش	۵۱۱۰۰ (هر مترمربع به ازای هر ۱ سانتی‌متر)	۷
بازسازی	۱۰۰۰۰۰۰ (هر مترمربع)	۸

که در آن:

i = بیانگر شماره گزینه ترمیم و نگهداری است که جزئیات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

j = نشان‌دهنده قطعات مختلف روسازی موجود در شبکه مد نظر در مقاله جاری است.

Z = تابع هدف که در اینجا بهینه کردن انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات شبکه روسازی است.

X_{ij} = متغیر تصمیم‌گیری به مفهوم اجرا یا عدم اجرای گزینه ترمیم و نگهداری i در قطعه j است (۰ یا ۱).

P_{ij} = احتمال انتخاب گزینه ترمیم و نگهداری i در قطعه روسازی j که ماحصل سیستم استنتاج فازی است.

ω_j = وزن مربوط به قطعات شاخه‌های شبکه روسازی که از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به دست آمده است.

لازم به ذکر است برای کنترل قید بودجه برنامه‌ریزی خطی نیاز است تا هزینه هر گزینه ترمیم و نگهداری مشخص باشد که هزینه هر یک از گزینه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. برای سهولت کار در صورت انتخاب شدن گزینه بازیافت یا روکش توسط مدل، ضخامت انجام کار به ترتیب ۱۰ و ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای محاسبه هزینه پرکردن ترک در هر قطعه طول همان قطعه مبنای مقدار طول مورد نیاز برای پر کردن ترک فرض شد. کل بودجه موجود نیز در حالت نامحدود مبلغ ۶۶ میلیارد تومان و در حالت محدود ۳۰ میلیارد تومان در نظر گرفته شد.

قید دوم که مربوط به توان سازمان متولی راه است یک قید محلی

مدل تحلیل سلسله مراتبی شاخه‌های موجود در شبکه روسازی مدنظر اولویت‌بندی می‌شوند. در گام بعد با استفاده از سیستم استنتاج فازی احتمال انتخاب هر گزینه ترمیم و نگهداری در هر قطعه روسازی به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از برنامه‌ریزی خطی تابع هدف با لحاظ نمودن تعدادی محدودیت پیشینه می‌شود. فلوچارت زیر روش تحقیق مقاله حاضر را نشان می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد در گام اول برای تمیز دادن قطعات روسازی که شرایط و ویژگی‌های یکسانی دارند ولی در شاخه‌هایی با خصوصیات و درجه اهمیت متفاوت قرار دارند، از مدل تحلیل سلسله مراتبی برای اولویت‌بندی شاخه‌های شبکه روسازی مد نظر استفاده شده است. این کار با در نظر گرفتن چهار پارامتر طبقه‌بندی عملکردی، ترافیک، دسترسی (تعداد راه جایگزین در صورت مسدود شدن راه برای اجرای عملیات ترمیم و نگهداری) و اهمیت تجاری گردشی شاخه‌ها انجام شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از نظر کارشناسان ماتریس مقایسات زوجی معیارها کامل شده و با استفاده از نرم‌افزار ۱۱ Expert Choice اولویت‌بندی شاخه‌ها صورت گرفته است.

سپس با استفاده از برنامه‌ریزی خطی سعی در حداکثرسازی احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی شد. تابع هدف مدل برنامه‌ریزی خطی مد نظر مطابق فرم پایین است و قیود مربوطه در جدول ۲ آورده شده است:

$$MaxZ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_j * P_{ij} * X_{ij} \quad (1)$$

جدول ۲. قیود برنامه‌ریزی خطی
Table 2. Constraints of linear programming

محدودیت	جزئیات	توضیحات
۱	$\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{244} X_{ij} * C_{ij} \leq TotalBudget$	هزینه کل قطعاتی که ترمیم و نگهداری می‌شوند نباید از بودجه بیشتر باشد. C_{ij} هزینه اعمال گزینه i در قطعه j
۲	$\sum_{j=1}^{244} X_{1j} \leq C$ $\sum_{j=1}^{244} X_{ij} \leq D \quad i = 2, 3, 4, 5$ $\sum_{j=1}^{244} X_{ij} \leq E \quad i = 6, 7, 8$	در هر سال سازمان متولی راه، تعداد مشخصی قطعه می‌تواند ترمیم کند (برای پر کردن ترک C ، برای فراگیر پیشگیرانه D و برای ترمیم اساسی مقدار E)
۳	$\sum_{i=1}^8 X_{ij} \leq 1, \forall j$	به هر قطعه روسازی تنها یک گزینه ترمیم و نگهداری می‌تواند اعمال می‌شود.
۴	$\text{if } \alpha_j \leq 4 \text{ then } X_{3j} = 0$	در قطعات با اهمیت بالا اسلاری سیل اجازه اجرا ندارد. α_j از جدول ۶ بدست می‌آید

دانش انسان و انجام استنتاج و اخذ یک تصمیم مناسب کاربرد دارد. مغز انسان اطلاعات غیردقیق و ناکامل فراهم آمده از طریق اندام‌های حسی را تفسیر و عکس‌العمل نشان می‌دهد. در سیستم استنتاج فازی سعی می‌شود بر اساس همین الگو و مطابق مغز انسان، بر اساس یک سری ورودی به خروجی مشخصی دست پیدا کرد. ساختار پایه سیستم‌های استنتاج فازی از سه بخش مفهومی تشکیل می‌شود. بخش اول، قواعد هستند که در قالب یک سری دستور اگر-آنگاه، ترکیبی از ورودی‌ها و خروجی‌ها را بدست می‌دهند. بخش دوم، پایگاه داده است که توابع عضویت مورد استفاده در قواعد فازی در قالب آن تعریف می‌شود. در نهایت بخش سوم، سازوکار استنتاج است که روال استنتاج توسط آن و به کمک قواعد و حقایق موجود، برای رسیدن به یک خروجی معقول انجام می‌پذیرد. لازم به ذکر است که بطور کلی در توسعه قواعد فازی دو رویکرد وجود دارد. در رویکرد اول بر اساس داده‌های واقعی و آنچه که در واقعیت رخ داده قواعد تعیین می‌شود. رویکرد دیگر اما مبتنی بر نظرات متخصصین و افرادی است که نسبت به ویژگی‌های ورودی‌ها و تأثیر ترکیب آن‌ها بر خروجی شناخت دارند.

است و بسته به عواملی همچون نیروی انسانی، تجهیزات و غیره، در هر منطقه متفاوت است. در این مقاله حداکثر توان برای انجام پرکردن ترک، فراگیر پیشگیرانه و اساسی به ترتیب ۳۰، ۲۰ و ۱۰ فرض شده است.

احتمال انتخاب گزینه ترمیم و نگهداری (P_{ij}) که در تابع هدف فوق آورده شده خروجی سیستم استنتاج فازی است. فازی به معنای فقدان وضوح است و این مفهوم فازی به دلیل مدل‌سازی مشابه استنتاج انسانی با یک الگوی پیچیده ریاضی است. سیستم استنتاج فازی از زیرمجموعه‌های محاسبات نرم است. محاسبات نرم روشی ابتکاری در راستای ایجاد سیستم‌های هوشمند است. حل مسائل پیچیده دنیای واقعی نیازمند بکارگیری سیستم‌های هوشمند است. این سیستم‌ها دارای توانایی تطبیق با محیط بوده و یاد می‌گیرند چگونه با تغییرات محیط سازگار شوند و در مقابل تغییرات محیطی تصمیم خاصی را اتخاذ نمایند. محاسبات نرم در واقع، توانایی‌های ذهن انسان را برای استدلال و فراگیری در یک محیط نامعین و نادقیق گرد هم می‌آورد.

سیستم استنتاج فازی یا به اختصار FIS، برای توصیف نظام مند

- مرحله چهارم در سیستم استنتاج فازی اعمال روش دلالت خواهد بود. قبل از اعمال روش دلالت بایستی وزن هر قاعده مشخص شود. هر قاعده دارای وزنی بین ۰ تا ۱ خواهد بود. دو روش مرسوم برای انجام فرآیند دلالت شامل کمینه که مجموعه فازی متغیر خروجی را برش می دهد و ضرب که مجموعه فازی متغیر خروجی را مقیاس می کند، خواهد بود. به ازای هر یک از قواعد فازی یک فرآیند دلالت صورت خواهد گرفت.

- مرحله پنجم تجمیع خروجی هاست. همان طور که گفته شد به ازای هر قاعده فازی یک مرتبه فرآیند دلالت بایستی صورت پذیرد. پس از آنکه این عملیات برای همه قواعد صورت پذیرفت نتایج بایستی تجمیع شود. سه روش مرسوم برای تجمیع عبارتند از: بیشینه، OR احتمالی و محاسبه مجموع.

- نهایتاً مرحله آخر غیرفازی سازی است. در این فرآیند با توجه به نتیجه تجمیع شده از مرحله قبل و استفاده از روش هایی نظیر محاسبه مرکز جرم، نیمساز، میانه بیشینه (میانگین مقادیر بیشینه از مجموعه خروجی)، بزرگترین بیشینه و در نهایت کوچکترین بیشینه عملیات غیر فازی سازی برای تعیین مقدار خروجی انجام می شود. با مرور ادبیات تحقیق در رابطه با عوامل و پارامترهای مؤثر بر انتخاب گزینه ترمیم و نگهداری متغیرهای ورودی فازی انتخاب شدند و با استفاده از نظرات کارشناسان، ۶ متغیر از مجموع متغیرهای مدنظر برای استفاده از سیستم استنتاج فازی در مدل ما جای گرفتند. پس از نهایی شدن متغیرهای ورودی توابع عضویت آنها از نوع گوسی انتخاب گردید. توابع گوسی دارای این ویژگی بوده که تغییرات در تابع هدف را به طور نرم و آهسته برای هر یک از متغیرهای ورودی در نظر می گیرد.

هدف منطبق فازی نگاشت از فضای ورودی به فضای خروجی است. یک ساز و کار ابتدایی در این راستا استفاده از یک مجموعه از دستورهای اگر-آنگاه تحت عنوان قواعد فازی است. این قواعد به طور موازی مورد ارزیابی قرار می گیرند و ترتیب آنها اهمیتی ندارد. برای نگاشت فضای ورودی به فضای خروجی نیاز به تابعی تحت عنوان تابع عضویت خواهد بود. تابع عضویت نموداری است که نحوه نگاشت هر نقطه از فضای ورودی را به یک مقدار عضویت (درجه عضویت) بین ۰ تا ۱ تعریف می کند. تنها شرطی که تابع عضویت باید اجرا کند این است که خروجی آن بین ۰ تا ۱ باشد [۲۵، ۲۶]. برای رسیدن به

در بحث سیستم استنتاج فازی هدف تعیین مقدار خروجی بر اساس تعدادی ورودی خواهد بود که در این میان سازوکارهایی برای بدست آوردن خروجی وجود دارد؛ بنابراین قبل از هر چیز بایستی ورودی ها و خروجی (ها) مورد نظر مشخص شوند. سه نوع معروف از سیستم های استنتاج فازی عبارتند از: ممدانی، سوگنو و تسوکاموتو. در اینجا از مدل فازی ممدانی استفاده می شود و بنابراین توضیحات ارائه شده نیز مربوط به این مدل خواهد بود. فرآیند استنتاج فازی از این مراحل تشکیل شده است:

- تعیین متغیرهای ورودی و خروجی و بازه تغییرات هر یک از آنها

- تبدیل متغیرهای ورودی و خروجی به متغیرهای زبان شناختی (فازی سازی متغیرها). با افزایش پیچیدگی یک سیستم، توانایی ما در اظهار دقیق و مشخص رفتار آن با رسیدن به یک آستانه خاص کاهش می یابد و دقت و وضوح به دو خصوصیت در تقابل با هم تبدیل می شوند. بر همین اساس در سیستم فازی متغیرهای زبان شناختی معرفی شده است. یک متغیر زبان شناختی دارای ۵ رکن خواهد بود. ۱- نام متغیر، ۲- مجموعه مقادیر یا اصطلاحات زبان شناختی، ۳- بازه تغییرات متغیر ۴- قاعده نحوی به عنوان روشی که مقادیر زبان شناختی موجود در مجموعه اصطلاحات بر اساس آن تولید می شود و ۵- قاعده معنایی که میزان عضویت هر یک از مقادیر یک متغیر به هر یک از مجموعه اصطلاحات زبان شناختی را نشان می دهد.

- توسعه قواعد فازی: قواعد فازی نحوه ترکیب متغیرهای ورودی برای دست یابی به مقادیر مختلف متغیرهای خروجی را نشان می دهد. برای این منظور از قواعد اگر-آنگاه برای فرموله کردن دستورات شرطی منطبق فازی استفاده می شود. عملیات تفسیر یک قاعده اگر-آنگاه دارای دو بخش است. بخش اول ارزیابی فرض نام دارد و به فازی سازی ورودی و اعمال عملگرهای فازی می پردازد. بخش دوم اعمال ماحصل بخش اول بر روی قسمت نتیجه است که با نام دلالت شناخته می شود. عملگرهای متنوعی نظیر AND و OR جهت ترکیب نمودن متغیرهای ورودی بر اساس مجموعه اصطلاحات زبان شناختی آنها در فازی وجود دارد. عملگر AND می تواند شامل عملیات کمینه، ضرب یا غیره و عملگر OR می تواند شامل بیشینه، OR احتمالی یا ... باشد.

جدول ۳. بازه تغییرات متغیرهای ورودی سیستم استنتاج فازی
Table 3. Ranges of input variables of Fuzzy Inference System

متغیر	بازه تغییرات
PCI شاخص وضعیت روسازی	۰-۱۰۰
SN عدد سازه‌ای	۰-۱۰
IRI شاخص بین‌المللی ناهمواری	۰-۱۶
DV درصد ضریب کاهندگی ناشی از خرابی سازه‌ای	۰-۱۰۰
DPCI میزان کاهش PCI در یک سال	۰-۶
BPN عدد پاندول بریتانیایی	۰-۱۰۰

جدول ۴. نمونه جدول قواعد فازی
Table 4. A Sample of Fuzzy rules

PCI	SN	IRI	DV	DPCI	BPN	P _{7j}
کم	کم	کم	کم	کم	کم	متوسط
کم	کم	کم	کم	کم	متوسط	متوسط
کم	کم	کم	کم	کم	زیاد	متوسط
کم	کم	کم	کم	متوسط	کم	زیاد
کم	کم	کم	کم	متوسط	متوسط	زیاد
کم	کم	کم	کم	متوسط	زیاد	متوسط
کم	کم	کم	کم	زیاد	کم	زیاد
کم	کم	کم	کم	زیاد	متوسط	زیاد
کم	کم	کم	کم	زیاد	زیاد	زیاد
کم	کم	کم	متوسط	کم	کم	زیاد

لازم به ذکر است در این پژوهش از مدل‌های پیش‌بینی وضعیت روسازی استفاده نشده است و این امر بدین معناست که سازمان متولی راه برای استفاده از مدل ارائه شده می‌بایست هر سال تمامی پارامترها و شاخص‌های مربوط به مدل را برداشت کند که این کار از نظر عملیاتی و اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود. این مسأله به عنوان محدودیت پژوهش جاری است.

۴- داده‌های تحقیق

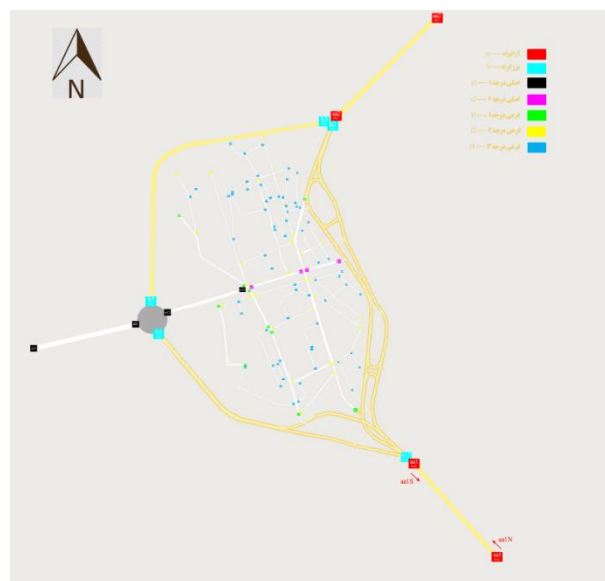
در این تحقیق برای نشان دادن نحوه عملکرد الگوریتم تعریف شده از یک مثال عددی بهره گرفته شده است. مثال عددی که با هدف نمایش نحوه به کارگیری و نتایج مدل جاری است با الگوگیری از شبکه راه‌های شهر ماهان واقع در استان کرمان که در شکل ۳ نشان داده شده، انجام شده است.

لازم به ذکر است شبکه راه مذکور از ۶۶ شاخه و ۲۴۴ قطعه

این هدف در مقاله جاری بر مبنای ادبیات تحقیق برای هشت گزینه ترمیم و نگهداری شامل پر کردن ترک^۱، فاگ سیل^۲، اسلاری سیل^۳، چیپ سیل^۴، میکروسرفیسینگ^۵، بازیافت^۶، روکش^۷ و بازسازی^۸ به صورت مجزا یک جدول قواعد فازی که هر کدام مشتمل بر ۷۲۹ قاعده بود، توسعه داده شد. ده سطر از جدول قاعده مربوط به بازسازی برای نمونه در جدول ۴ آورده شده است. توجه شود که بین هر یک از متغیرهای ورودی در جدول ۴، AND وجود دارد.

لازم به ذکر است که هر دو مرحله فوق (برنامه‌ریزی خطی و سیستم استنتاج فازی) با کدنویسی در متلب انجام شده‌اند.

- 1 Crack Filling
- 2 Fog seal
- 3 Slurry Seal
- 4 Chip Seal
- 5 Microsurfacing
- 6 Recycle
- 7 Overlay
- 8 Reconstruction



شکل ۳. شبکه راه مورد مطالعه
Fig. 3. Case study road network

جدول ۵. نمونه‌ای از مشخصات شاخه‌های شبکه روسازی مورد مطالعه

Table 5. An example of the characteristics of the pavement network branches in the case study

ردیف	نام شاخه	طبقه‌بندی عملکردی	ترافیک (<i>AADT</i>)	اهمیت تجاری گردشگری	دسترسی (تعداد راه جایگزین)	اهمیت (ترافیک + دسترسی)	طول شاخه (کیلومتر)
1	aa1N	آزادراه	6350	1	0	1	8.5
2	aa1S	آزادراه	6830	1	0	1	8.5
3	aa2N	آزادراه	7000	1	0	1	10
4	aa2S	آزادراه	6810	1	0	1	10
5	b1N	بزرگراه	6300	1	1	4	20
6	b1S	بزرگراه	5910	0	1	5	19
7	b2N	بزرگراه	5770	1	1	5	26
8	b2S	بزرگراه	6360	1	1	4	26
9	b3N	بزرگراه	6770	1	0	1	22
10	b3S	بزرگراه	6200	1	0	1	22

پارامتر دسترسی که در ستون ششم آورده شده است به این نکته اشاره دارد که اگر یک قطعه از یک شاخه خاص روسازی برای اعمال گزینه ترمیم و نگهداری انتخاب شود آیا راه جایگزینی برای آن شاخه وجود دارد یا خیر؟ این پارامتر نیز در سه دسته کم (عدم وجود راه جایگزین)، متوسط (وجود یک راه جایگزین) و زیاد (وجود بیش از یک راه جایگزین) دسته‌بندی شده است.

تشکیل شده است. برای نمونه چند سطر از مشخصات شاخه‌ها و قطعات شبکه روسازی شکل ۳ در جداول ۵ و ۷ آورده شده است. پارامتر اهمیت تجاری گردشگری که در ستون پنجم جدول ۵ آورده شده است، در سه دسته کم (عدد ۰)، متوسط (عدد ۱) و زیاد (عدد ۲) دسته‌بندی می‌شود و البته یک پارامتر محلی است و بستگی به نظر کارشناس سازمان متولی راه دارد.

جدول ۶. شاخص عددی تعریف شده برای پارامتر اهمیت شاخه‌های روسازی

Table 6. Numerical index defined as the parameter of pavement branches importance

اهمیت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
دسترسی	کم	کم	کم	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد
ترافیک	زیاد	متوسط	کم	زیاد	متوسط	کم	زیاد	متوسط	کم

جدول ۷. نمونه‌ای از مشخصات قطعات شبکه روسازی مورد مطالعه

Table 7. An example of the characteristics of the pavement network sections in the case study

نام قطعه	PCI	SN	IRI	درصد ضریب کاهندگی ناشی از خرابی سازه‌ای	کاهش PCI در یک سال	BPN	مساحت قطعه (مترمربع)
aa1N-5	57	7.7	1	86	4	55	11200
aa1S-1	47	7.9	3.8	43	5	25	14400
aa1S-2	86	8.9	3.1	30	2	97	16800
aa1S-3	49	8	4.6	84	5	53	12800
aa1S-4	89	6.3	4.1	16	2	90	16000
aa1S-5	54	8.2	3	82	3	90	8000
aa2N-1	78	8.5	3	6	2	78	13600
aa2N-2	69	6.2	4.9	68	3	80	15200
aa2N-3	71	8.8	4.5	67	2	90	16800
aa2N-4	58	6.2	1.6	9	5	43	12800
aa2N-5	72	7.2	1	31	2	24	12000

عددی و با هدف نمایش عملکرد مدل آورده شده‌اند. البته این موضوع لطمه ای به روش تحقیق پیشنهادی نخواهد زد، چرا که فرآیند ارائه شده وابسته به داده خاصی نبوده و با ارائه هر نوع داده ای که این ۶ متغیر را در بر داشته باشد می توان از سیستم استنتاج فازی خروجی دریافت کرد.

۵- نتایج تحقیق

در ابتدا ماتریس‌های مقایسه زوجی (بر اساس نظر خبرگان و کارشناسان برای معیارها و زیرمعیارهای مدنظر) که برای انجام فرآیند تحلیل سلسله مراتبی تشکیل شده‌اند و وزن شاخه‌های روسازی (WJ) که به وسیله AHP با نرم‌افزار ۱۱ Expert Choice به دست آمده است را مشاهده می‌کنید.

در شکل ۴ اعداد نوشته شده در محور افقی نشان‌دهنده مقدار وزن و اسامی نوشته شده در محور عمودی نام شاخه‌های شبکه روسازی است که این اوزان به صورت دقیق در جدول ۱۲ نیز آورده شده است.

پارامتر اهمیت که در ستون هفتم آورده شده ترکیبی از ترافیک و دسترسی است. ترافیک که همان متوسط ترافیک روزانه سالیانه مورد نظر است به سه دسته کم ($AADT^1 \leq 2500$)، متوسط ($AADT$ ۶۰۰۰ - ۲۵۰۰) و زیاد ($AADT \geq 6000$) تقسیم می‌شود. دسترسی هم شامل سه گروه کم (هیچ راه جایگزینی وجود ندارد)، متوسط (یک راه جایگزین وجود دارد) و زیاد (بیش از یک راه جایگزین وجود دارد) است. ترکیب حالات مختلف پارامترهای ترافیک و دسترسی همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است ۹ حالت می‌شود که عدد ۱ نشان‌دهنده اهمیت بالا و عدد ۹ نشان‌دهنده کمترین اهمیت است.

لازم به ذکر است در مجموع شبکه روسازی مد نظر ما از ۲۴۴ قطعه تشکیل شده است که برای نمونه چند سطر از داده‌های قطعات در جدول ۷ نشان داده شده است. اعداد لحاظ شده برای شاخص‌های PCI، SN، IRI، DV، DPCI و BPN صرفاً به عنوان یک مثال

1 Average Annual Daily Traffic

جدول ۸. مقایسه زوجی معیارها
Table 8. Paired comparisons of criteria

	طبقه‌بندی عملکردی	ترافیک	دسترسی	اهمیت تجاری گردش
طبقه‌بندی عملکردی	۱	۲	۴	۵
ترافیک		۱	۲	۳
دسترسی			۱	۳
اهمیت تجاری گردش				۱

جدول ۹. مقایسه زوجی زیرمعیارهای ترافیک و اهمیت تجاری گردش
Table 9. Paired comparisons of traffic and commercial-tourism sub-criteria

	زیاد	متوسط	کم
زیاد	۱	۳	۵
متوسط		۱	۳
کم			۱

جدول ۱۰. مقایسه زوجی زیرمعیارهای دسترسی
Table 10. Paired comparisons of access sub-criteria

	زیاد	متوسط	کم
زیاد	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$
متوسط		1	$\frac{1}{3}$
کم			1

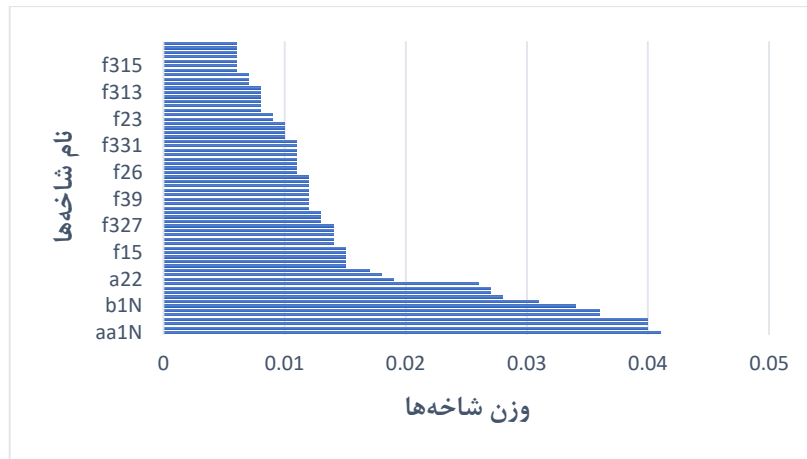
جدول ۱۱. مقایسه زوجی زیرمعیارهای طبقه‌بندی عملکردی
Table 11. Paired comparisons of functional classification sub-criteria

	آزادراه	بزرگراه	اصلی ۱	اصلی ۲	فرعی ۱	فرعی ۲	فرعی ۳
آزادراه	۱	۲	۳	۴	۶	۷	۸
بزرگراه		۱	۲	۳	۵	۶	۷
اصلی ۱			۱	۲	۴	۵	۶
اصلی ۲				۱	۳	۴	۵
فرعی ۱					۱	۳	۴
فرعی ۲						۱	۲
فرعی ۳							۱

۵ نشان داده شده است.

جدول قواعد فازی توسعه داده شده برای گزینه‌های اسلاری سیل، چپ سیل و میکروسرفیسینگ مشابه هم هستند. دلیل این

احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی توسط مدل فازی محاسبه شده است. توابع عضویت برای شاخص‌های ورودی گوسی هستند. توابع عضویت برای متغیرهای ورودی در شکل



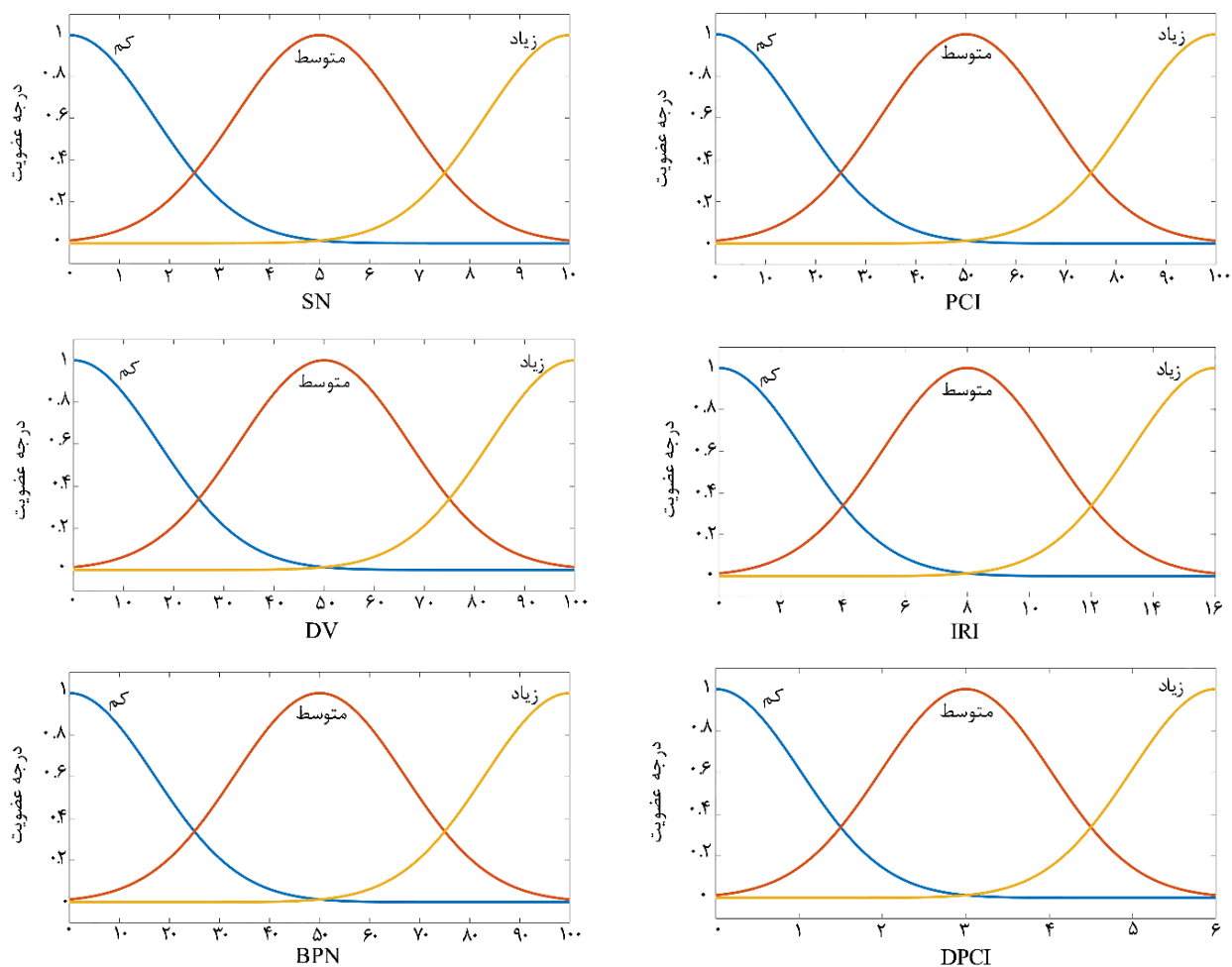
شکل ۴. نمودار اوزان شاخه‌های شبکه روسازی

Fig. 4. Weights diagram of pavement network branches

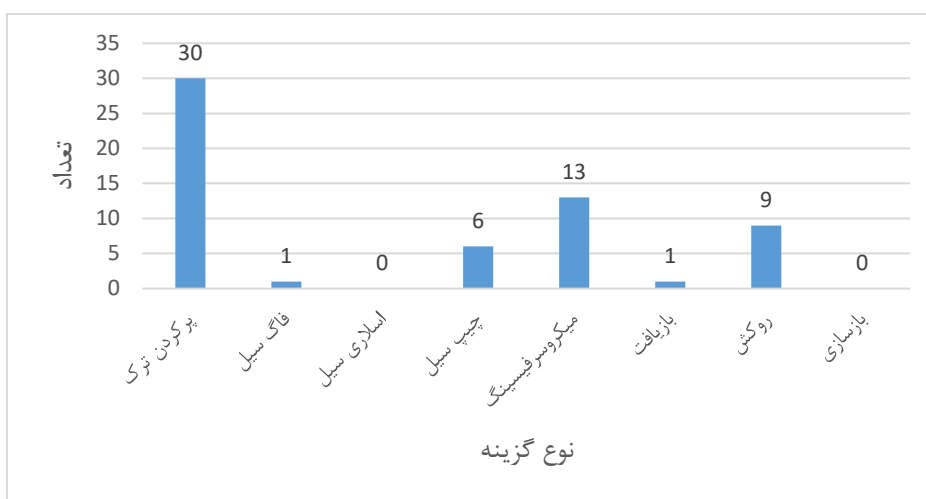
جدول ۱۲. وزن شاخه‌های شبکه روسازی

Table 12. Weight of pavement network branches

وزن	نام شاخه	وزن	نام شاخه	وزن	نام شاخه
0.01	f21	0.014	f311	0.041	aa1N
0.01	f27	0.014	f318	0.04	aa1S
0.01	f324	0.014	f327	0.04	aa2N
0.01	f328	0.013	f24	0.04	aa2S
0.009	f23	0.013	f212	0.036	b3N
0.009	f210	0.013	f214	0.036	b3S
0.008	f22	0.012	f33	0.034	b1N
0.008	f213	0.012	f36	0.031	b2S
0.008	f38	0.012	f39	0.028	b1S
0.008	f310	0.012	f312	0.027	a11
0.008	f313	0.012	f323	0.027	a12
0.008	f330	0.012	f326	0.026	b2N
0.007	f28	0.012	f329	0.019	a22
0.007	f29	0.012	f333	0.018	a21
0.007	f325	0.011	f26	0.017	f14
0.006	f314	0.011	f211	0.015	f11
0.006	f315	0.011	f32	0.015	f12
0.006	f316	0.011	f34	0.015	f13
0.006	f317	0.011	f35	0.015	f15
0.006	f320	0.011	f319	0.015	f25
0.006	f321	0.011	f331	0.014	f31
0.006	f322	0.011	f332	0.014	f37



شکل ۵. توابع عضویت ورودی برای مدل‌سازی با استفاده از سیستم استنتاج فازی
Fig. 5. Input membership functions for modeling by Fuzzy Inference System



شکل ۶. تعداد گزینه‌های انتخاب شده از هر روش
Fig. 6. Frequency of options selected from each method

جدول ۱۳. جزییات قطعات انتخاب شده برای ترمیم و نگهداری و نوع روش انتخاب شده

Table 13. Details of sections selected for maintenance and rehabilitation and type of selected method

نوع ترمیم و نگهداری	شماره قطعه	نوع ترمیم و نگهداری	شماره قطعه	نوع ترمیم و نگهداری	شماره قطعه
5	15	1	54	1	1
5	19	1	57	1	7
5	23	1	58	1	9
5	28	1	61	1	11
5	53	1	63	1	14
5	65	1	69	1	16
5	68	1	76	1	18
5	73	1	79	1	20
5	74	1	81	1	21
5	75	1	83	1	24
6	2	2	91	1	27
7	5	4	36	1	30
7	6	4	37	1	31
7	8	4	49	1	38
7	10	4	59	1	41
7	17	4	60	1	43
7	22	4	62	1	46
7	64	5	3	1	50
7	66	5	4	1	51
7	67	5	13	1	52

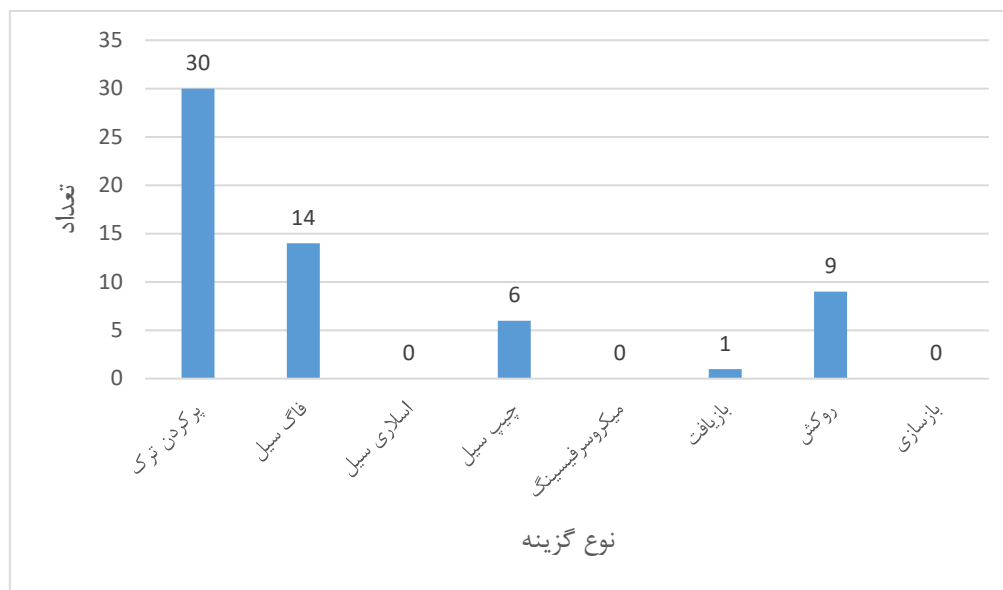
اختصاص ۳۰ میلیارد تومان) به صورت زیر خواهد بود. ملاحظه می‌شود که در مثال حل شده در سناریوی اول به دلیل اینکه مقدار بودجه ۶۶ میلیارد تومان بود (فرض بودجه نامحدود) و کل پول هزینه شده قریب به ۶۰ میلیارد تومان شد، قید توان حاکم شده و مدل به اندازه مجموع توان در نظر گرفته شده برای سازمان متولی راه (مجموعاً ۶۰) قطعه برای ترمیم و نگهداری پیشنهاد کرده است. قطعات پیشنهاد شده برای دسته نگهداری پیشگیرانه اکثراً از نوع میکروسرفیسینگ هستند و در شاخه‌های با اهمیت بالا (شاخص عددی اهمیت کمتر از ۴) قرار دارند. در جدول ۱۳ نتایج مدل برای انتخاب قطعات با جزییات آورده شده است.

مدل برای بار دیگر با تغییر مقدار قید بودجه به ۳۰ میلیارد تومان و ثابت نگه داشتن توان اجرا شد و برای سناریوی جدید نتایج زیر حاصل شد.

بر اساس توان تعریف شده برای اجرای روش‌های ترمیم و

امر هم به ماهیت این روش‌ها و متغیرهای ورودی سیستم استنتاج فازی که در این مقاله در نظر گرفته شدند، برمی‌گردد. این گزینه‌ها بر روستازی‌هایی با شرایط تقریباً یکسان سازه‌ای می‌توانند اعمال شوند؛ چرا که تفاوت اصلی گزینه‌ها بیشتر در بحث هزینه و در ارتباط با ترافیک راه (چیپ سیل برای راه‌های کم تردد، اسلاری سیل برای راه‌های با تردد کم تا متوسط و میکروسرفیسینگ برای راه‌های با تردد متوسط تا زیاد)، اهمیت راه، زمان گیرش و اجرای گزینه است. در نتیجه مدل بدین شکل در نظر گرفته شده است که برای یک قطعه چنانچه راه اهمیت بالایی داشت، به عبارتی شاخص عددی اهمیت آن (پارامتر تعریف شده در جدول ۶) کمتر از ۵ بود مدل گزینه اسلاری سیل را برای این قطعات در نظر نمی‌گیرد.

در نهایت پس از کدنویسی در فضای متلب و اجرای مدل برنامه‌ریزی، نتایج مدل برای دو سناریوی مختلف با فرض بودجه نامحدود (اختصاص ۶۶ میلیارد تومان) و با فرض بودجه محدود



شکل ۷. تعداد گزینه‌های انتخاب شده از هر روش در سناریوی دوم

Fig. 7. Frequency of options selected from each method in the second scenario

جدول ۱۴. جزئیات قطعات انتخاب شده برای ترمیم و نگهداری و نوع روش انتخاب شده

Table 14. Details of sections selected for maintenance and rehabilitation and type of selected method

نوع ترمیم و نگهداری	شماره قطعه	نوع ترمیم و نگهداری	شماره قطعه	نوع ترمیم و نگهداری	شماره قطعه
2	76	1	60	1	1
2	79	1	61	1	3
2	83	1	62	1	11
2	91	1	63	1	14
4	13	1	65	1	16
4	15	1	69	1	18
4	23	1	73	1	20
4	28	1	74	1	21
4	68	1	81	1	27
4	75	1	106	1	31
6	2	2	4	1	37
7	5	2	7	1	38
7	6	2	9	1	40
7	8	2	19	1	41
7	10	2	24	1	43
7	12	2	30	1	46
7	17	2	51	1	50
7	22	2	57	1	52
7	78	2	58	1	53
7	82	2	59	1	54

جدول ۱۵. تعدادی از قطعات انتخاب شده برای پر کردن ترک
Table 15. Some of the selected pieces for filling the crack

شماره قطعه	نام قطعه	PCI	SN	IRI	درصد ضریب کاهندگی ناشی از خرابی سازه‌ای	کاهش PCI در یک سال	BPN
1	aa1N-1	89	7.6	4	7	2	19
11	aa2N-1	78	8.5	3	6	2	78
46	b2N-9	90	8.4	3.2	23	4	68

قرار دارند، از مدل AHP برای اولویت‌بندی شاخه‌های شبکه روسازی مد نظر استفاده شده است. در گام بعد با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی سعی بر آن شد تا به حداکثرسازی احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مشخص مانند بودجه موجود، توان سازمان متولی راه که بیانگر حداکثر تعداد قطعاتی است که سازمان می‌تواند در هر سال ترمیم و نگهداری کند، پرداخته شود. برای به دست آوردن احتمال انتخاب هر گزینه ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی از FIS استفاده شده است، بدین شکل که برای هر یک از گزینه‌های پر کردن ترک، فاگ سیل، اسلاری سیل، چپ سیل، میکروسرفیسینگ، بازیافت، روکش و بازسازی یک جدول قاعده فازی بر اساس ادبیات تحقیق توسعه داده شد. در نهایت پس از کدنویسی در نرم‌افزار متلب مدل برای یک شبکه روسازی در شهر ماهان (کرمان) به کار گرفته شد.

نتایج این مقاله نشان داد که در اولویت‌بندی شاخه‌ها همان‌طور که انتظار می‌رفت طبقه‌بندی عملکردی بیشترین اثرگذاری را داشت و ملاحظه می‌شود که آزادراه‌ها با وزن حدود ۰/۰۴ بیشترین اهمیت را دارند. علاوه بر این ملاحظه می‌شود که بعضی شاخه‌ها با وجود طبقه‌بندی عملکردی مهم‌تر وزن کمتری گرفتند، مانند شاخه b2N که بزرگراه است ولی وزن کمتری نسبت به شاخه‌های a11 و a12 که معرف دو راه اصلی درجه ۱ هستند، دارد. دلیل این امر سطح دسترسی پایین‌تر راه‌های اصلی مذکور نسبت به بزرگراه مدنظر است. البته از این موارد نمونه‌های متعددی در جدول ۱۲ وجود دارد.

مدل جاری در هر دو سناریوی بودجه‌ای گزینه‌هایی برای پر کردن ترک پیشنهاد می‌دهد که مطابق انتظار مقدار شاخص PCI آن‌ها بالاست و درصد ضریب کاهندگی ناشی از خرابی سازه‌ای کمی دارند، در جدول ۱۵ مشخصات تعدادی از این قطعات برای نمونه آورده شده است.

نگهداری که در این مقاله برای پر کردن ترک ۳۰، فراگیر پیشگیرانه ۲۰ و اساسی ۳۰ عدد فرض شد، همان‌طور که ذکر شد مقدار بودجه مورد نیاز برای انتخاب بهینه قریب به ۶۰ میلیارد تومان بود. اکنون در سناریوی دوم که مقدار بودجه ۳۰ میلیارد تومان فرض شده است، ملاحظه می‌شود که مدل از حداکثر توان سازمان استفاده می‌کند، ولی گزینه‌های با هزینه کمتر را پیشنهاد می‌دهد (مانند فاگ سیل و چپ سیل).

۶- نتیجه‌گیری

موضوع مدیریت تعمیر و نگهداری روسازی راه‌ها یکی از موضوعات مهم در زمینه راه و ترابری بوده و هر ساله بودجه‌های زیادی برای این منظور اختصاص داده می‌شود. با توجه به گستردگی شبکه راه‌های ایران و محدودیت‌های بودجه‌ای، لازم است تا در رابطه با تعیین شاخه‌های دارای اولویت ترمیم و نگهداری و نیز گزینه بهینه برای ترمیم هر یک از قطعات شاخه‌های دارای اولویت در یک بازه زمانی مشخص پیش رو (معمولاً یک ساله) اقدام نمود. برای این منظور چنانچه عملیات به‌طور سنتی یا بر اساس سلیقه صورت پذیرد در نهایت شبکه روسازی دچار مشکل خواهد شد و هزینه‌های چرخه عمر روسازی افزایش خواهد یافت. امروزه با رشد ابزارهای ریاضی مرتبط با تصمیم‌گیری، می‌توان به شکل علمی و اصولی برای تعیین شاخه‌های دارای اولویت و نیز تعیین گزینه بهینه ترمیم و نگهداری اقدام نمود. در این مقاله سعی شده تا با ترکیب ابزارهای اولویت‌بندی، هوش مصنوعی و بهینه‌سازی الگوریتمی برای تصمیم‌گیری در رابطه با انتخاب شاخه‌های دارای اولویت و نیز تعیین گزینه بهینه برای ترمیم هر قطعه ارائه شود.

ابتدا برای تمیز دادن قطعات روسازی که شرایط و ویژگی‌های یکسانی دارند ولی در شاخه‌هایی با خصوصیات و درجه اهمیت متفاوت

جدول ۱۶. تعدادی از قطعات انتخاب شده برای ترمیم اساسی
Table 16. Some of the selected pieces for basic healing

BPN	کاهش PCI در یک سال	درصد ضریب کاهندگی ناشی از خرابی سازه‌ای	IRI	SN	PCI	نام قطعه	شماره قطعه
90	3	82	3	8.2	54	aa1S-5	10
52	3	57	4.8	6	45	aa2S-6	22

- [5] W.T. Chan, T. Fwa, K.Z. Hoque, Constraint handling methods in pavement maintenance programming, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 3(9) (2001) 190-175.
- [6] K.A. Abaza, Expected performance of pavement repair works in a global network optimization model, *Journal of infrastructure systems*, 2(13) (2007) 134-124.
- [7] D.G. Peshkin, T.E. Hoerner, K.A. Zimmerman, Optimal timing of pavement preventive maintenance treatment applications, *Transportation Research Board*, 2004.
- [8] AASHTO, *Pavement Management Guide*, AASHTO, 2012.
- [9] G. Huntington, A. Pearce, N. Stroud, J. Jones, K. Ksaibati, Mitigating impacts of oil and gas traffic on southeastern Wyoming county roads, *Cheyenne: Wyoming Department of Transportation*, (2013).
- [10] K. Helali, T. Kazmierowski, A. Bradbury, M. Karan, Application of network-level pavement management system technology to a unique pavement deterioration problem, *Transportation research record*, 1(1524) (1996) 75-67.
- [11] D. Moazami, H. Behbahani, R. Muniandy, Pavement rehabilitation and maintenance prioritization of urban roads using fuzzy logic, *Expert Systems with Applications*, 10(38) (2011) 12879-12869.
- [12] M. Babaei, A. Naderan, Simultaneous Modeling for Pavement Performance Prediction and Optimal Resource Allocation: Goal Programming Approach with an Embedded Markov Decision Process, in: *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*, Washington DC, United States, 2012.
- [13] M. De La Garza, S. Akyildiz, D.R. Bish, D.A. Krueger, Network-level optimization of pavement maintenance

در سناریوی اول با فرض بودجه نامحدود نتایج نشان می‌دهد که مدل ضمن استفاده از مجموع توان تعریف شده در قیود، از بین گزینه‌های پیشگیرانه بیشتر از میکروسرفیسینگ و برای قطعات موجود در شاخه‌های با اهمیت بالا استفاده می‌کند (با شاخص عددی اهمیت کمتر از ۵)، اما در سناریوی دوم با فرض بودجه محدود مدل مجدد از مجموع توان تعریف شده در قیود استفاده می‌کند ولی به سمت گزینه‌های با هزینه کمتر سوق پیدا می‌کند. ملاحظه می‌شود از بین گزینه‌های نگهداری پیشگیرانه تعداد فاگ سیل زیاد می‌شود. مدل در هر دو سناریوی بودجه‌ای گزینه‌هایی را برای ترمیم اساسی پیشنهاد می‌دهد که وضعیت سازه‌ای مناسبی ندارند که اجمالاً مشخصات چند نمونه از این قطعات در جدول ۱۶ آورده شده است. سازوکار به کار رفته در این مقاله یک الگوریتم مدون و علمی با تابع هدف جدید برای انتخاب گزینه بهینه ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی در هر بازه زمانی ارائه می‌دهد و همچنین پارامترهای متعدد مرتبط با شاخه‌ها و قطعات شبکه روسازی در این مدل در نظر گرفته می‌شوند.

مراجع

- [1] K.A. Abaza, Deterministic performance prediction model for rehabilitation and management of flexible pavement, *International Journal of Pavement Engineering*, 2(5) (2004) 121-111.
- [2] m. fakhri, m. aalaleh, a. edrisi, introducing the optimal model of pavement maintenance and rehabilitation considering the cost of users for Iran, *journal of transportation engineering*, 3(7) (2016) 540-523.
- [3] M.Y. Shahin, *Pavement management for airports, roads, and parking lots*, 2005.
- [4] F. Javed, *Integrated prioritization and optimization approach for pavement management*, 2010.

- [20] B. Yu, X. Gu, F. Ni, R. Guo, Multi-objective optimization for asphalt pavement maintenance plans at project level: Integrating performance, cost and environment, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41 (2015) 74-64.
- [21] K. Ahmed, B. Al-Khateeb, M. Mahmood, Application of chaos discrete particle swarm optimization algorithm on pavement maintenance scheduling problem, *Cluster Computing*, 2(22) (2019) 4657-4647.
- [22] M.U. Khan, M. Mesbah, L. Ferreira, D.J. Williams, Development of optimum pavement maintenance strategies for a road network, *Australian Journal of Civil Engineering*, 2(14) (2016) 96-85.
- [23] A. Khavandi Khiavi, H. Mohammadi, Multiobjective optimization in pavement management system using NSGA-II method, *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 2(144) (2018) 04018016.
- [24] C. Torres-Machi, A. Osorio-Lird, A. Chamorro, C. Videla, S.L. Tighe, C. Mourgues, Impact of environmental assessment and budgetary restrictions in pavement maintenance decisions: Application to an urban network, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59 (2018) 204-192.
- [25] L.A. Zadeh, Fuzzy sets, *Information and control*, 3(8) (1965) 353-338.
- [26] F.-T.M. Sandoz, A method to build membership functions application to numerical/symbolic interface building bobrowicz O.-choulet C.-haurat a, (1991). renewal strategies, *Advanced Engineering Informatics*, 4(25) (2011) 712-699.
- [14] Z. Wu, G.W. Flintsch, Optimal Selection of Pavement Maintenance & Rehabilitation Projects, in: 7th International Conference on Managing Pavement Assets. TRB, Calgary Alberta, Canada, 2008.
- [15] S.V. Bohdanovich, Fuzzy Logic in the Development of a Pavement Management System, in: 7th International Conference "Environmental Engineering." Vilnius Gediminas Technical University Publishing House "Technika," Vilnius, Lithuania, Citeseer, 2008, pp. -1114 1118.
- [16] A.A. Elhadidy, E.E. Elbeltagi, M.A. Ammar, Optimum analysis of pavement maintenance using multi-objective genetic algorithms, *HBRC Journal*, 1(11) (2015) 113-107.
- [17] K.A. Abaza, S.A. Ashur, Optimum microscopic pavement management model using constrained integer linear programming, *International Journal of Pavement Engineering*, 3(10) (2009) 160-149.
- [18] W. Gu, Y. Ouyang, S. Madanat, Joint optimization of pavement maintenance and resurfacing planning, *Transportation Research Part B: Methodological*, 4(46) (2012) 519-511.
- [19] Medury, S. Madanat, Incorporating network considerations into pavement management systems: A case for approximate dynamic programming, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 33 (2013) 150-134.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Behbahani, N. Nadimi, M. Khaleghi, *Introducing a New Method for the Pavements' Maintenance and Rehabilitation Planning*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(7) (2021) 2801-2820.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17506.6585](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17506.6585)

