Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 703-706
DOI: 10.22060/ceej.2020.17650.6632

Carbon Dioxide Minimization in Large-Scale Pavement Network Maintenance Planning

H. Naseri, E. Safari Ghalekoli, S. Mohamadzade Saliani, F. Moghadas Nejad* , A. Golroo

Civil and Environmental Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Choosing an appropriate strategy to maintain pavements has become a significant concern. Recently, pavement agencies tackle large-scale networks, which makes the problem complicated. To prevail in this complexity, utilizing metaheuristic algorithms can be an ideal approach. By increasing the dimension of the problem, the competency of metaheuristic algorithms is by far enhanced. To this end, the water cycle algorithm is applied to solve the problem. In this investigation, two models, including single objective optimization and multi-objective optimization, are taken into consideration. In the single-objective model, the minimization of the network International Roughness Index (IRI) is considered as the objective function. In multi-objective optimization modeling, minimization of the network International Roughness Index and embodied CO_2 emission are taken into account simultaneously. Furthermore, a new constraint is considered in the model, which leads to restricting the budget fluctuation in different years of the analysis period. A network, including 79 segments, is the case study of this investigation. The results reveal that the water cycle algorithm is highly qualified to solve the pavement maintenance and rehabilitation problem. According to the results, multi-objective optimization reduces the CO_2 emission by 47.2% compared with single-objective modeling. Furthermore, the variation of minimum and maximum costs is less than 20% in the planning horizon.

Review History:

Received: Jan. 02, 2020
Revised: May. 31, 2020
Accepted: Jul. 04, 2020
Available Online: Jul. 13, 2020

Keywords:

Water cycle algorithm
Pavement management system
Large-scale networks
Environment
Optimization

1. INTRODUCTION

Transportation infrastructure plays a pivotal role in the economy, transporting people and goods. Accordingly, enhancing the condition of pavements has been an immense concern. A pavement management system (PMS) is a strategic tool to preserve the mentioned infrastructures. The PMS aims to help the decision-makers to select the appropriate maintenance and rehabilitation activities for pavement sections [1].

Different techniques have been applied to solve the pavement M&R optimization problem. By increasing the number of sections in the network and by consideration of various criteria, the complexity of the M&R optimization problem increases exponentially, and the problem converts to an NP-hard problem. In this regard, the application of metaheuristic algorithms may be the best option [2].

Khavandi Khiavi employed a genetic algorithm (GA) to present an optimal M&R plan for a network, including 17 sections, and the result indicated that GA is highly qualified to find the optimal solutions to M&R optimization problems [3].

Environmental issues cannot be overlooked in these problems. The transportation sector is the second-largest source of greenhouse gas emissions. Approximately 30% of global air pollution and 25% of fossil fuel consumption are contributions to the transportation sector. Therefore, CO_2 emission should be considered in M&R optimization problems.

*Corresponding author's email: moghadas@aut.ac.ir

2. METHODOLOGY

The international roughness index (*IRI*) is considered the performance indicator to analyze the condition of pavements. Two approaches, including multi-objective modeling and single-objective modeling, are taken into account. The multi-objective approach considers pavement conditions and CO_2 emission simultaneously. The single-objective approach considers only the pavement condition.

2.1. Problem modeling

The problem formulation is indicated in Eqs. (1) to (6).

$$minZ = \sum_{i=1}^{n} (IRI_{i,x} - IRI_{ideal})^2 \quad (1)$$

$$minZ = \sum_{i=1}^{n} CO_2 \quad (2)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} IRI_{i,y} \times Area_i}{Area_T} \le Ideal \quad ,\forall y \in \{1,2,\ldots,x\} \quad (3)$$

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. M&R activities, their improvements, costs, and emissions

M&R activity	*IRI* drop (m/km)	Unit cost ($/m^2)	Unit CO_2 emission (kg/m^2)
Do nothing	0	0	0
Crack sealing	0.27	1.06	0.11
Chip seal	0.72	4.9	0.4
Thin hot mill overlay	1.44	23.37	6.91
Milling and 7.5cm hot mill overlay	2.2	47.84	8.5
Milling and 7.5cm hot mill overlay	3	63.79	13.11

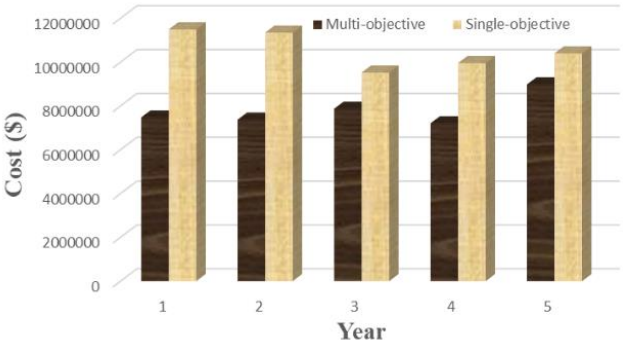


Fig. 1. The cost of single-objective and multi-objective approaches

$$IRI_{i,y} \geq IRI_{min} \; \forall i \in \{1,2,\ldots,n\}, \forall y \in \{1,2,\ldots,x\} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{n} Cost_{i,y} \leq Budget_y \; \forall y \in \{1,2,\ldots,x\} \quad (5)$$

$$MaxCost_y - minCost_y \leq A \times MaxCost_y \; \forall y \in \{1,2,\ldots,x\} \quad (6)$$

Eqs. (1) and (2) are objective functions of the multi-objective approach. Single-objective modeling considers Eq. (1) the objective function of the problem. Eq. (1) improves the condition of pavements and Eq. (2) minimizes the total CO_2 emission generated during the analysis period.

2.2. Algorithm process

As previously mentioned, large-scale multi-objective M&R optimization problems are NP-hard problems. To this end, a robust metaheuristic algorithm called the "water cycle algorithm" is employed to plan the M&R activities for the case study of this investigation.

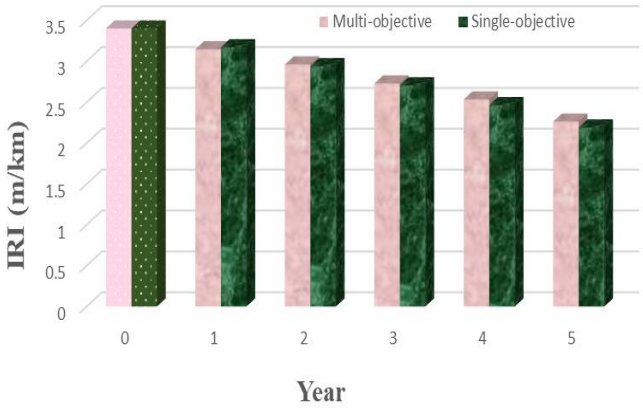


Fig. 2. The network IRI during the time

3. CASE STUDY

The case study of this investigation includes 79 flexible pavement sections with different lengths. The average network IRI should be lower than 3.5 m/km all the time in the analysis period. IRI_{ideal} is considered 2.2 m/km. The *IRI* of sections is ranged from 2.09 m/km to 6.14 m/km. The analysis period is considered five years, and in this period, the annual cost is not allowed to fluctuate more than 20%. The annual budget is 12.2 million dollars. The M&R activities are shown in Table 1 [4–9].

4. RESULTS AND DISCUSSION

The cost of single-objective and multi-objective approaches offered by WCA is indicated in Fig. 1. As can be seen from the results of Fig. 1, the single-objective approach requires 52.7 million dollars and the multi-objective approach needs 38.9 million dollars in the 5-year planning horizon. Hence, it can be theorized that CO_2 consideration reduces the required cost.

The *IRI* of the network in the planning horizon is illustrated in Fig. 2. Based on the results presented in this Fig., the condition of the network in both approaches is approximately the same. However, the condition-based performance of the single-objective approach could be a bit better than that of the multi-objective approach.

Fig. 3 provides information about the content of CO_2 emitted in the analysis period. As can be perceived from the outcomes of this Fig., the single-objective method emits 10.6 million kg CO_2 in the analysis period, while the multi-objective method reduces this value by 5 million kg. That is to say, the multi-objective approach can reduce CO_2 emission by 47.1%, which is significant.

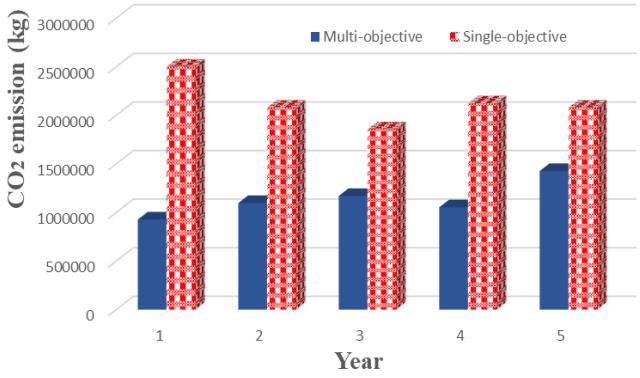


Fig. 3. The CO_2 emission contents in different years by single-objective and multi-objective approaches

5. CONCLUSION

The multi-objective approach outperforms the single-objective model based on the required cost and total CO_2 emission. Nonetheless, the performance of the single-objective model according to pavement condition is a bit better than that of multi-objective modeling.

REFERENCES

[1] M. Hafez, K. Ksaibati, R.A .Atadero, Applying large-scale optimization to evaluate pavement maintenance alternatives for low-volume roads using genetic algorithms, Transportation Research Record, 2672(52) (2018) 205-215

[2] K. Ahmed, B. Al-Khateeb, M. Mahmood, A chaos with discrete multi-objective particle swarm optimization for pavement maintenance, J. Theor. Appl. Inf. Technol, 96(8) (2018) 2317-2326

[3] A. Khavandi Khiavi, H. Mohammadi, Multiobjective optimization in pavement management system using NSGA-II method, Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 144(2) (2018) 04018016

[4] C. Torres-Machí, A. Chamorro, E. Pellicer, V. Yepes, C. Videla, Sustainable pavement management: Integrating economic, technical, and environmental aspects in decision making, Transportation Research Record, 2523(1) (2015) 56-63

[5] P. Lu, D. Tolliver, Pavement treatment short-term effectiveness in IRI change using long-term pavement program data, Journal of transportation engineering, 138(11) (2012) 1297-1302

[6] V. Yepes, C. Torres-Machi, A. Chamorro, E. Pellicer, Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid greedy randomized adaptive search procedure algorithm, Journal of Civil Engineering and Management, 22(4) (2016) 540-550

[7] Y. Li, S. Madanat, A steady-state solution for the optimal pavement resurfacing problem, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 36(6) (2002) 525-535

[8] Y. Ouyang, S. Madanat, Optimal scheduling of rehabilitation activities for multiple pavement facilities: exact and approximate solutions, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 38(5) (2004) 347-365

[9] J. Chehovits, L. Galehouse, Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete pavements, in: Proceedings on the 1st International Conference of Pavement Preservation, 2010, pp. 27-42

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Naseri, E. Safari Ghalekoli, S. Mohamadzade Saliani, F. Moghadas Nejad, A. Golroo, Carbon Dioxide Minimization in Large-Scale Pavement Network Maintenance Planning, Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 703-706.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17650.6632

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۸، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۱۸۷ تا ۳۲۰۰
DOI: 10.22060/ceej.2020.17650.6632

کمینه کردن انتشار گاز دی اکسید کربن در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری شبکه بزرگ‌مقیاس رویه‌های راه

حامد ناصری، الهه صفری قلعه کلی، سینا محمدزاده سالیانی، فریدون مقدس نژاد*، امیر گل‌رو

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

خلاصه: انتخاب استراتژی درست تعمیر و نگهداری راه ها با در نظر گرفتن ترافیک، شرایط و نوع عملکرد راه ها، یک موضوع مهم برای همه ی بزرگراه ها می باشد. امروزه، مراکز راهداری برای تعمیر و نگهداری بزرگراه ها با شبکه های بزرگ‌مقیاس روبه رو گردیده اند. مدیریت شبکه با مقیاس بزرگ، پیچیدگی های مخصوص به خود را دارد که یکی از راهکارها برای حل مدل های بهینه سازی، الگوریتم های فراابتکاری می‌باشد. هرچه ابعاد مسأله بزرگ‌تر گردد، عملکرد الگوریتم های فراابتکاری ارتقا می یابد. یکی از الگوریتم هایی که به تازگی توسعه داده شده است، الگوریتم چرخه آب می باشد که برای یافتن روش‌های تعمیر و نگهداری بهینه در این مقاله استفاده گردیده است. در این مقاله، مسأله به دو روش بهینه سازی تک‌تابع‌هدفه و چندتابع‌هدفه حل شده است. در حل مسأله به روش تک‌تابع‌هدفه، هدف نزدیک کردن مقدار شاخص ناهمواری بین المللی قطعات به مقدار ایده آل و در روش چندتابع‌هدفه، هدف علاوه بر نزدیک کردن مقدار شاخص ناهمواری بین المللی به سطح ایده آل، کمینه کردن مقدار دی‌اکسید کربن آزاد شده نیز می باشد. در این مدل بهینه سازی، علاوه بر شرایط عملکردی معمول و محدودیت‌های بودجه ها، یک محدودیت مهم دیگر نیز لحاظ شده است که در آن تغییرات هزینه های کل تعمیر و نگهداری سالانه نباید از یک محدوده از پیش تعیین شده تجاوز کند. مطالعه ی موردی این مقاله، یک شبکه واقعی راه شامل ۷۹ قطعه می باشد. نتایج حاکی از آن است که الگوریتم چرخه آب، در یافتن روش تعمیر و نگهداری بهینه، عملکرد خوبی را از خود نشان داده است. به عنوان نتیجه، مدل چندتابع‌هدفه ٪۴۷/۲ میزان انتشار گاز دی اکسید کربن را کاهش می دهد. همچنین واریانس مقدار کمینه و بیشینه بودجه در دوره ی تحلیل کمتر از ٪۲۰ می باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت:۱۳۹۸/۱۰/۱۲
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۱۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:
الگوریتم چرخه آب
سیستم مدیریت روسازی
شبکه بزرگ‌مقیاس
محیط زیست

۱- مقدمه

در جوامع پیشرفته، زیرساخت های حمل و نقلی یک نقش اساسی را در اقتصاد و جابه‌جایی انسان و کالا بازی می‌کنند [۱]. روند رو به افزایش و توسعه شبکه های راه، منجر به افزایش مسئولیت در برابر نگهداری این زیرساخت‌ها می‌شود [۲]. سیستم مدیریت روسازی[1] (PMS) یک روند استراتژیک و سیستماتیک برای نگهداری و بهبود بخشیدن به وضعیت شبکه راه‌ها می‌باشد [۳]. هدف اصلی سیستم مدیریت روسازی، کمک کردن به مسئولان و تصمیم گیران جهت تصمیم گیری درباره نوع روش تعمیر و نگهداری در زمان مناسب می‌باشد [۴].

هرچه تعداد وسایل نقلیه در راه‌ها بیشتر می‌شود، افزایش جریان ترافیک در شبکه بزرگراه ها، باعث ایجاد نرخ زوال سریع روسازی می‌گردد [۵]. بعد از ساخت یک سیستم روسازی، خرابی به دلیل بارگذاری های ترافیکی و شرایط آب و هوایی و افزایش ناهمواری سطح راه و غیره اتفاق می‌افتد [۶]. بودجه موجود برای نگهداری روسازی اغلب محدود است که منجر به خرابی سریع شبکه راه

1 Pavement Management System

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

می‌شود. روش های تعمیر و نگهداری روسازی راه ها به سه دسته نقسیم می‌شوند: روش های نگهداری پیشگیرانه، نگهداری و بهسازی [۷].

الگوریتم ژنتیک به طور گسترده برای حل برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری راه در مقیاس بزرگ استفاده شده است. حافظ و همکاران (۲۰۱۸) درباره شرایط راه های با حجم پایین تحقیق کردند. با کمک الگوریتم ژنتیک، رویکرد نگهداری راه برای یک شبکه در مقیاس بزرگ شامل ۸۵ قطعه طراحی شده است. در این پژوهش، تئوری ارائه شده این است که الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسأله بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ عملکرد مناسبی دارد [۸].

خاوندی خیاوی و محمدی (۲۰۱۸) یک مدل مسأله بهینه‌سازی جبری برای سیستم مدیریت روسازی راه در سطح شبکه، شامل ۱۷ قطعه معرفی کردند. هدف این پژوهش کاهش هزینه های عملیات های تعمیر و نگهداری، هزینه های تحمیل شده به استفاده کنندگان راه و افزایش ارزش باقی مانده روسازی‌ها در سال آخر دوره طراحی می‌باشد. الگوریتم NSGAII (الگوریتم ژنتیک مبتنی بر بهینه‌سازی چندهدفه) برای یافتن راه حل بهینه مدل استفاده شده و نتیجه‌ها حاکی از آن است که این الگوریتم توانایی حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی پیچیده را دارد [۹].

همچنین الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب بهینه مسائل چندتابع‌هدفه شامل حداکثر کردن کیفیت روسازی و حداقل کردن هزینه‌های عملیات های تعمیر و نگهداری به طور همزمان استفاده شده است. این مسأله برای دست‌یابی به این اهداف در سطح شبکه طراحی شده است که شامل ۱۰ قطعه می‌شود. با تحلیل نتایج این مسأله می‌توان تأیید کرد که الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم فراابتکاری قادر به یافتن جواب مناسب برای مسائل بهینه‌سازی می‌باشد. جواب های این پژوهش شامل یک مجموعه از جبهه جواب می‌باشد که هیچ یک از آن‌ها توسط جواب دیگر مغلوب نمی‌گردد [۱۰]. ترکیب سیستم مدیریت روسازی و سیستم مدیریت ایمنی ترافیک می‌تواند در الگوریتم ژنتیک لحاظ شود. ساها و سبیاتی (۲۰۱۸) از الگوریتم ژنتیک برای ارتقای شرایط راه های روسازی شده در شبکه و کاهش نرخ ترافیک در این روسازی‌ها استفاده کردند [۱۱].

مقایسه ی عملکرد الگوریتم های مختلف ابتکاری و فراابتکاری نیز در پژوهش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲, ۱۳]. به عنوان مثال، الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات[1] (pso) جواب های بهتری از الگوریتم ژنتیک ارائه می‌دهد [۱۲]. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات از لحاظ سرعت همگرایی و حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد [۱۲, ۱۳].

احمد و همکاران (۲۰۱۸) یک الگوریتم جدید فراابتکاری را توسعه دادند که الگوریتم تراکم ذرات چندتابع‌هدفه‌ی احتمالاتی نامیده می‌شود و یک نسخه جدید الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات می‌باشد. در این تحقیق، طرح بهینه نگهداری و بازسازی روسازی‌های انعطاف پذیر تعیین می‌کند که کدام یک هزینه نگهداری و اهداف شرایط روسازی را ارضا می‌کند. مسأله مورد مطالعه شامل ۵ قطعه می‌باشد و نتیجه‌ها نشان دادند که الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات یک الگوریتم سریع است که می‌تواند به جواب‌های برجسته‌ای برسد [۱۴].

بهینه‌سازی بازسازی روسازی یک نوع دیگر از مسائل می‌باشد که می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری حل شود. الگوریتم کلونی زنبورهای عسل مصنوعی یک الگوریتم فراابتکاری است که برای تعیین ضخامت روکش در مسأله بهینه‌سازی بازسازی رویه با ملاحظه محدودیت‌های اقتصادی، دسترسی منابع و ملاحظات مهندسی استفاده شده است. نتایج حاصله از این الگوریتم با نتایج تحقیقات سایر محققین که در مقالات دیگر منتشر شده بودند، مقایسه گردید و این مقایسه نشان می‌دهد که الگوریتم کلونی زنبورهای عسل مصنوعی به عنوان یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی روسازی راه جواب‌های خوبی ارائه می‌دهد [۱۵].

اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی نیز روی نگهداری سالیانه روسازی قابل اغماض نیستند [۱۶]. بخش حمل و نقل دومین منبع بزرگ انتشار گازهای گلخانه‌ای است [۷]. تقریباً ۳۰٪ از آلاینده‌های جهانی هوا و ۲۵٪ مصرف سوخت فسیلی در دنیا مربوط به صنایع حمل و نقل و روسازی می‌باشد [۱۷]. از این رو تحلیل آلاینده‌های زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری شبکه‌های راه از اهمیت بسزایی برخوردارند.

1 ۲ Particle Swarm Optimization

در مقاله تورس ماکی و همکاران (۲۰۱۸)، هدف اصلی، تحلیل اثرات زیست‌محیطی و بودجه در دسترس در طراحی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری می‌باشند. در ابتدا، این مقاله مروری بر روش‌های تعمیر و نگهداری موجود دارد. سپس عملیات تعمیر و نگهداری با ملاحظه سطوح ظرفیت بودجه و ارزیابی تکنیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی بهینه‌سازی می‌شود. مطالعه موردی روی شبکه روسازی شهری در چایل[1] انجام گردید. نتیجه نشان داده است که افزایش ۲ درصدی در مقدار بودجه نگهداری روسازی راه، باعث اتخاذ تصمیم‌های عاقلانه تری در زمینه کاهش آلایندگی‌های محیط زیست شده است. مانند بازیافت سرد درجا و تعمیر تمام عمق دال‌ها که انتشار گازهای گلخانه‌ای در آن‌ها کمتر از راهکارهای دیگر می‌باشد [۱۸].

در مقاله چان و همکاران (۲۰۱۱)، از راهکارهای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه روسازی راه‌ها کمک گرفته شده است. در این پژوهش، عملکرد روسازی با مقایسه‌ی مصرف انرژی و آزاد شدن گازهای گلخانه‌ای برای رویکردهای مختلف پیشگیرانه در مقایسه با روش‌های بهسازی و بازسازی کمی‌سازی شده‌اند. این مقاله فواید روش‌های پیشگیرانه نگهداری روسازی را با ملاحظه عمر خدمت دهی و محاسبه مصرف انرژی هر کدام از راهکارها و مقدار گاز گلخانه‌ای آزاد شده برای هر سال خدمت رسانی را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که رویکردهای پیشگیرانه روسازی یک کاهش عمده را در استفاده از انرژی و گازهای گلخانه‌ای آزاد شده در مقایسه با رویکردهای بازسازی و بهسازی دارد [۱۹].

در مقاله گیوستوزی و همکاران (۲۰۱۲)، یک روش ابتکاری برای ارزیابی اثر زیست‌محیطی روش‌های نگهداری پیشگیرانه را توضیح می‌دهد. این مقاله، این فعالیت‌ها را به عملکرد و هزینه در طول عمر خدمت دهی روسازی از طریق یک "هزینه‌ی چرخه‌ی عمر، عملکرد و تحلیل زیست‌محیطی" چند مشخصه‌ای مربوط می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که چگونه این روش می‌تواند باعث ارتقای روش مدیریت روسازی با اجرای روش‌های مؤثر بر انرژی باشد [۲۰].

با توجه به مقالات ذکر شده در بالا، در زمینه سیستم مدیریت روسازی کارهای خوبی انجام گردیده، اما حل یک شبکه حاوی قطعات زیاد (بزرگ مقیاس) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در حل بیشتر شبکه‌های روسازی، از الگوریتم‌های قدیمی‌تر استفاده شده است و فقدان استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید در حوزه مدیریت روسازی ملموس می‌باشد. همچنین اثرات مخرب زیست‌محیطی شامل گازهای گلخانه‌ای که یکی از پارامترهای مهم در توسعه پایدار می‌باشد به شکل گسترده مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفته است. در این مقاله، به حل یک شبکه بزرگ‌مقیاس حاوی ۷۹ قطعه، با استفاده از الگوریتم چرخه‌آب که یک الگوریتم فراابتکاری جدید و قدرتمند می‌باشد، پرداخته می‌شود. همچنین برای حل این شبکه مسائل زیست‌محیطی نیز در نظر گرفته شده و مقدار دی‌اکسید کربن آزاد شده برای هر رویکرد ذکر گردیده است. در نهایت، برای سنجش عملکرد معرفی شده، نتایج حاصله از این روش با روش سنتی برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری راه مقایسه می‌گردد. به علاوه، در مسأله بهینه‌سازی، با ارائه و معرفی یک محدودیت جدید قابلیت پیاده‌سازی برنامه تعمیر و نگهداری افزایش می‌یابد. بر اساس این محدودیت، اختلاف هزینه تعمیر و نگهداری شبکه در دوره تحلیل باید کمتر از یک سطح مشخص باشد.

۲- متدولوژی

در این پژوهش، هدف تعیین روش‌های تعمیر و نگهداری مناسب برای یک شبکه راه با مقیاس بزرگ است. در ابتدا تعدادی از عملیات‌های تعمیر و نگهداری مناسب تعیین‌شده و سپس برای هر قطعه با توجه به اهداف پیش رو انتخاب می‌گردند. برای تخصیص هر عملیات تعمیر و نگهداری به هر قطعه، دو هدف کمینه بودن اثرات زیست‌محیطی در انجام عملیات و مقدار کاهش در شاخص ناهمواری بین‌المللی با کمترین هزینه ممکن معیار در نظر گرفته می شوند. برای دستیابی به این اهداف از الگوریتم چرخه‌آب استفاده شده است که یک الگوریتم فراابتکاری قوی می‌باشد. در این بخش، ابتدا شاخص ناهمواری بین المللی (IRI) به عنوان شاخص عملکردی این پژوهش انتخاب می شود. همچنین، محدودیت‌هایی در جهت کاهش شاخص ناهمواری بین المللی و محدود کردن هزینه های تعمیر و نگهداری، برای مدل ذکر گردیده است. سپس مدل بهینه سازی، براساس روش های تک تابع هدفه و چندتابع هدفه انجام شده و مدل‌سازی ریاضیاتی توضیح داده شده و در نهایت الگوریتم استفاده شده در این پژوهش معرفی گردیده است.

۲-۱- شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI)

1 [1] Chile

ناهمواری روسازی یک ویژگی مهم روسازی است، زیرا نه تنها روی کیفیت حرکت، بلکه روی هزینه‌های نگهداری و هزینه‌های استفاده‌کنندگان اثر می‌گذارد. امروزه ناهمواری با استفاده از میزان عملکردی حاضر (PSR)، ضریب عملکردی حاضر (PSI) و عدد ناهمواری سطح یا شاخص ناهمواری بین‌المللی سنجیده می‌شود [۲۱]. شاخص ناهمواری بین‌المللی به طور گسترده برای تعیین هموار بودن روسازی استفاده می‌شود [۶].

شاخص ناهمواری بین‌المللی یک شاخص عملکردی است که به ناهمواری راه‌ها مربوط می‌شود. همچنین یک مدل ریاضی برای ارزیابی کیفیت جاده‌ها و پروفیل راه هاست [۲۲]. ثابت شده است که یک ارتباط خوب بین شاخص ناهمواری بین‌المللی و خرابی‌های روسازی وجود دارد [۲۳].

مقدار زیاد شاخص ناهمواری بین‌المللی منجر به ناراحتی استفاده کننده از راه، هزینه‌های بیشتر وسیله نقلیه و افزایش زمان سفر می‌شود [۲۴]. بنابراین شاخص ناهمواری بین‌المللی یک شاخص عملکردی با ارزش برای ارزیابی خرابی‌های شبکه و برای پیش‌بینی روش‌های تعمیر و نگهداری قطعات روسازی راه است.

۲-۲- مدل ریاضی مسأله

این مسأله با دو نوع تابع هدف متفاوت شامل بهینه‌سازی تک‌هدفه (کمینه کردن شاخص ناهمواری بین‌المللی) و بهینه‌سازی چند هدفه (کمینه کردن شاخص ناهمواری بین‌المللی و اثرات مخرب زیست‌محیطی) حل و سپس مقایسه می‌گردند. در بهینه‌سازی تک‌تابع‌هدفه، هدف بهبود شرایط راه تحت بودجه‌ای مشخص در نظر گرفته شده است. در این مسأله هدف این است که در سال آخر شاخص ناهمواری بین‌المللی هر یک از قطعات به یک سطح ایده‌آل نزدیک گردند. از این رو، تابع هدف مطابق رابطه (۱) تنظیم گردید. در این رابطه، شاخص ناهمواری بین‌المللی هر یک از قطعات در آخرین سال دوره‌ی تحلیل از سطح ایده‌آل کم شده و به توان دو می‌رسند. توان دو در این رابطه سبب تمایل بیشتر مدل به کاهش فاصله تا سطح ایده‌آل می‌گردد.

$$\min\ Z=\sum_{i=1}^{n}(IRI_{i,x}-IRI_{ideal})^2 \qquad (۱)$$

در این فرمول، $IRI_{i,y}$ بیانگر شاخص ناهمواری بین‌المللی قطعه i در زمان x است. n تعداد کل قطعات و IRI_{ideal} سطح ایده‌آل شاخص ناهمواری بین‌المللی می‌باشد که توسط سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای تنظیم شده است [۲۵].

سپس مسأله با استفاده از بهینه‌سازی دو هدفه حل شد. در این روش، هدف کاهش همزمان مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی و آلایندگی‌های گاز دی‌اکسیدکربن می‌باشد. در این روش، از رابطه (۱) و (۲) به صورت توامان به عنوان توابع هدف استفاده گردید.

$$\min\ Z=\sum_{i=1}^{n}CO_2 \qquad (۲)$$

یکی از اهداف سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، کاهش مقدار میانگین شاخص ناهمواری بین‌المللی در سطح شبکه می‌باشد [۲۵]. برای اعمال این محدودیت، رابطه (۳) به صورت زیر تعریف شده است:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}IRI_{i,y}\times Area_i}{Area_T}\le Ideal,\quad \forall y\in\{1,2,...,x\} \qquad (۳)$$

که در آن $IRI_{i,y}$ نشانه‌ی ناهمواری در قطعه i و زمان y می‌باشد. $Area_i$ و $Area_T$ مساحت قطعه و مساحت کل شبکه می‌باشند.

یکی دیگر از محدودیت‌های مهم در بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری قطعات راه ها، محدود کردن پارامترها به بازه قابل قبول آن‌ها می‌باشد. بر اساس نتایج قبلی، مقدار کمینه شاخص ناهمواری بین‌المللی به دست می‌آید و در نتیجه مقدار IRI هر قطعه باید بزرگ‌تر از این مقدار باشد.

$$IRI_{i,y}\ge IRI_{\min},\quad \forall y\in\{1,2,...,x\},\forall i\in\{1,2,...,n\} \qquad (۴)$$

همچنین مقدار هزینه تعمیر و نگهداری شبکه در هر سال باید از بودجه آن در همان سال کمتر باشد.

$$\sum_{i=1}^{n}Cost_{i,y}\le Budget_y,\quad \forall y\in\{1,2,...,x\} \qquad (۵)$$

در این فرمول، $Budget_y$ بودجه اختصاص یافته برای تعمیر و نگهداری شبکه‌ی راه در سال y و $Cost_{i,y}$ هزینه‌ی تعمیر و نگهداری شبکه راه‌ها در قطعه i و سال y می‌باشد.

با توجه به نزدیک بودن مقادیر بودجه در سال‌های متمادی، اگر

مقدار بیشینه و کمینه هزینه‌های تعمیر و نگهداری در یک دوره ۵ ساله با هم تفاوت زیادی داشته باشد، نشان‌دهنده منطقی نبودن مدل است. در این مقاله، محدودیتی برای حل این مسأله تعیین شده است که این مشکل را برطرف می‌کند. محدودیت اعمالی این است که تفاضل هزینه بیشینه و کمینه تعمیر و نگهداری در دوره ۵ ساله در شبکه، باید کمتر از A٪ هزینه بیشینه تعمیر و نگهداری باشد.

$$maxCost_y - \min Cost_y \le A \times maxCost_y, \quad \forall y \in \{1,2,...,x\} \qquad (۶)$$

در این فرمول، $MaxCost_y$ و $minCost_y$ مقدار بیشینه و کمینه بودجه سالانه در دوره تحلیل می‌باشد. در این فرمول، مقدار A برابر ۲۰٪ می‌باشد. نتیجه‌ی به دست آمده با استفاده از این محدودیت به منطقی تر شدن مدل کمک شایانی کرده است و قابلیت پیاده‌سازی دارد.

۳-۲- الگوریتم مورد استفاده

مسائل بهینه‌سازی گسسته (عدد صحیح) با تعداد گزینه‌های انتخابی زیاد و متغیرهای تصمیم فراوان، زیر مجموعه‌ی مسائل ان-پی سخت می‌باشند و با استفاده از روش‌های ریاضیاتی قطعی، شامل روش‌های عددی و تحلیلی قابل حل نمی‌باشند [۲۶]. از این رو، مسأله برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری راه‌ها در شبکه‌های بزرگ مقیاس، یک مسأله ان-پی سخت می‌باشد؛ زیرا انواع مختلفی از عملیات‌های ترمیمی برای هر قطعه در هر سال می‌تواند انتخاب شوند. همچنین، تعداد قطعات در سطح شبکه‌های بزرگ‌مقیاس بسیار زیاد می‌باشند. در این پژوهش، هدف معرفی یک سری راهکار برای شبکه‌ی راه‌های کشور ایران در یک دوره‌ی زمانی طولانی می‌باشد و به دلیل پیچیدگی این مسأله، الگوریتم چرخه‌ی آب[1] (WCA) برای یافتن جواب این مسأله استفاده می‌شود. الگوریتم‌های فرابتکاری، الگوریتم‌های بسیار مفید و قدرتمند می‌باشند که برای حل مسائل عدد صحیح با پیچیدگی محاسباتی بالا طراحی شده‌اند و در حل مسائل مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گرفته اند. بررسی مقالات در حوزه‌های مختلف مهندسی عمران نشان از عملکرد بسیار خوب این الگوریتم‌ها دارد.

الگوریتم چرخه‌آب، یک الگوریتم فرابتکاری است که به طور هوشمند در ناحیه شدنی، به دنبال بهترین جواب می‌گردد [۲۷]. هدف این الگوریتم، تعیین جواب بهینه یا نزدیک به بهینه برای مسأله می‌باشد. الگوریتم چرخه‌آب از چرخه‌آب در طبیعت و جریان رودخانه‌ها و پیوستن آن‌ها به دریا الهام می‌گیرد [۲۸] و توسط هادی اسکندر طراحی شده است [۲۹]. این الگوریتم، همه‌ی داده‌ها را به عنوان قطرات آب در نظر می‌گیرد. سپس، داده‌ها بر اساس مقدار صلاحیت بر اساس تابع هدف مسأله طبقه بندی می‌شوند. سپس بهترین داده از لحاظ مقدار تابع هدف به عنوان دریا در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر آن، داده‌های بعدی از لحاظ عملکرد (داده‌های خوب) به رودخانه‌ها و داده‌های دیگر به نهرها اختصاص داده می‌شوند. در هر تکرار الگوریتم، نهرها به سمت رودخانه‌ها و از آنجا به سمت دریا جاری می‌شوند. به عبارت دیگر، نهرها و رودخانه‌ها به سمت مناطقی می‌روند که به دریا نزدیک ترند؛ در واقع هدف یافتن مناطقی بهتر در ناحیه شدنی می‌باشد [۳۰]. در هر تکرار، منطقه دریا و رودخانه‌ها به روزرسانی می‌شود و زمانی که فاصله‌ی رودخانه‌ها و نهرها یا رودخانه‌ها و دریا کمتر از مقدار مشخصی شود، پدیده تبخیر رخ می‌دهد و باران می‌بارد. سپس بارش (داده)های جدید باران و داده‌های قدیمی بر اساس تابع هدف مقایسه شده، بدترین داده‌ها حذف گردیده و بهترین داده‌ها از لحاظ عملکرد باقی خواهند ماند [۳۱]. در این تحقیق، الگوریتم چرخه‌آب در نرم‌افزار مطلب نسخه‌ی ۲۰۱۹-الف کد نویسی گردید [۳۰] و برای تعیین مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم عملیات کالیبراسیون انجام گردید.

۳- مطالعه موردی

برای تحلیل شرایط شبکه راه ها، از راه‌های شریانی که شامل آزادراه‌ها و بزرگراه‌های استان تهران می‌باشد، استفاده شده است. داده‌های این مسأله شامل ۷۹ قطعه با طول و مساحت متفاوت از شبکه راه‌ها می‌باشد و هدف کاهش میزان شاخص ناهمواری بین‌المللی و آلاینده گاز دی‌اکسیدکربن می‌باشد. طبق اهداف سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، شاخص ناهمواری بین‌المللی میانگین شبکه در همه سال‌ها نباید از ۳/۵ کمتر باشد [۲۵]. به علاوه، هدف اصلی سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کاهش شاخص ناهمواری بین‌المللی قطعات و رساندن آن‌ها به مقدار ۲/۲ می‌باشد [۲۵]. لذا، سطح ایده‌آل شاخص ناهمواری بین‌المللی برای قطعات راه ۲/۲ در

1 [1] Water Cycle Algorithm

جدول ۱. انواع عملیات تعمیر و نگهداری راه‌ها و مقادیر کاهش در مقدار شاخص ناهمواری، هزینه عملیات و مقدار دی‌اکسید کربن آزاد شده در هر مترمربع

Table 1. M&R activities and their corresponding IRI drop, unit cost, and unit CO_2 emission.

عملیات تعمیر و نگهداری	کاهش در مقدار شاخص ناهمواری (متر/کیلومتر)	مرجع	هزینه در هر مترمربع سطح (دلار/مترمربع)	مرجع	مقدار دی‌اکسید کربن آزاد شده در هر مترمربع (کیلوگرم/مترمربع)	مرجع
هیچ اقدامی	۰	[۳۳]	۰	[۳۳]	۰	[۳۳]
آب‌بندی ترک	۰/۲۷	[۲۱]	۱/۰۶	[۱۶]	۰/۱۱	[۱۶]
تراشه آسفالتی	۰/۷۲	[۲۱]	۴/۹	[۱۶]	۰/۴	[۱۶]
روکش و آسیاب داغ	۱/۴۴	[۲۱]	۲۳/۳۷	[۱۶]	۶/۹۱	[۱۶]
مخلوط آسفالتی داغ و آسیاب شده به ضخامت ۷/۵ سانتی‌متر	۲/۲	[۳۴, ۳۵]	۴۷/۸۴	[۱۶, ۳۶]	۸/۵	[۳۶]
مخلوط آسفالتی داغ و آسیاب شده به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر	۳ سانتی متر	[۳۴, ۳۵]	۶۳/۷۹	[۱۶]	۱۳/۱۱	[۱۶]

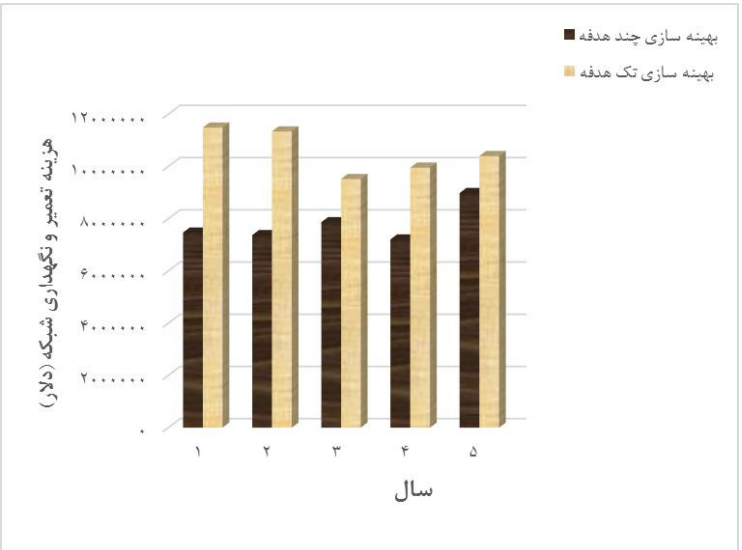
نظر گرفته شد. همچنین، با بررسی داده‌های گذشته مشخص گردید شاخص ناهمواری بین‌المللی حداقلی در راه‌های قدیمی به ندرت کمتر از ۱/۵ می‌باشد. لذا شاخص ناهمواری بین‌المللی قطعات در مدل باید بزرگ‌تر از ۱/۵ باشد و این محدودیت در این مدل لحاظ شده است. شاخص ناهمواری بین‌المللی این ۷۹ قطعه در شبکه مورد بررسی در بازه ۰۹/ ۲و ۶/۱۴ گزارش شده است.

نگهداری روسازی و تعمیر آن در بیشتر موارد اکثر بودجه سازمان‌های راهداری را به خود اختصاص می‌دهد [۳۲]. بر اساس عملیات‌های تعمیر نگهداری گزارش شده در سال‌های گذشته بر روی قطعات موجود در این شبکه و قیمت هر یک از عملیات‌های تعمیر و نگهداری مذکور در مقالات معتبر بین‌المللی، بودجه سالیانه تعمیر و نگهداری و بازسازی این راه‌ها حدود ۱۲ میلیون و ۲۰۰ هزار دلار تخمین زده شده است. دوره تحلیل ۵ سال و در این مدت زمان، تغییرات قابل قبول بودجه حداکثر می‌تواند ۲۰٪ باشد. به عبارت دیگر مقدار کمینه بودجه در دوره تحلیل نباید از ۰/۸ بیشینه مقدار بودجه در این بازه‌ی زمانی کمتر باشد. بر اساس نتایج تحقیقات پیشین، نرخ زوال ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.

۱-۳- عملیات‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها

برای حل این مسأله، ۶ مورد عملیات تعمیر و نگهداری مرسوم که برای تعمیر و نگهداری راه‌های شریانی مورد استفاده قرار می‌گیرد مورد استفاده قرار گرفت که در جدول ۱ نشان داده شده است. در مورد بعضی از قطعات راه ها، به دلیل شرایط قابل قبول قطعه، نیازی به هیچ یک از اقدامات زیر نمی‌باشد. به همین دلیل یکی از راهکارهای تعمیر و نگهداری که در جدول ۱ ذکر شده است، "هیچ اقدامی انجام نشود" است. با انتخاب این راهکار، هیچ هزینه‌ای پرداخت نمی‌شود و همچنین هیچ تغییری در مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی مشاهده نخواهد شد. به علاوه، در صورت انتخاب این گزینه مقدار انتشار گاز دی‌اکسید کربن صفر می‌باشد. در جدول زیر، انواع عملیات‌های تعمیر و نگهداری، کاهش در مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی، هزینه اجرا و همچنین مقدار دی‌اکسید کربن منتشر شده نشان داده شده است.

هر کدام از عملیات‌های تعمیر و نگهداری موجب کاهش مقدار مشخص در شاخص ناهمواری بین‌المللی می‌گردد. این مقدار کاهش در عملیات‌های تعمیر و نگهداری گوناگون متفاوت اند. در جدول ۱، مقدار کاهش در مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی در اثر راهکارهای مختلف تعمیر و نگهداری، بیان شده است. با توجه به اینکه تعمیر و نگهداری روسازی در بیشتر موارد اکثر بودجه سازمان‌های راهداری را مصرف می‌کند، هزینه هر کدام از راهکارهای تعمیر و نگهداری یکی از عوامل مهم در انتخاب آن‌ها می‌باشد [۳۲]. در این جدول هزینه راهکارها بر اساس دلار در هر متر مربع بیان شده است. هزینه‌های سالیانه راهکارها، مجموع هزینه‌های واحد راهکارها در هر سال بر اساس مساحت قطعات تعمیر شده در هر سال محاسبه می‌گردد.



شکل ۱. هزینه تعمیر و نگهداری شبکه در سالهای مختلف دوره تحلیل با دو روش بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه

Fig. 1. Pavement M&R costs in the analysis period presented by multi-objective and single-objective approaches

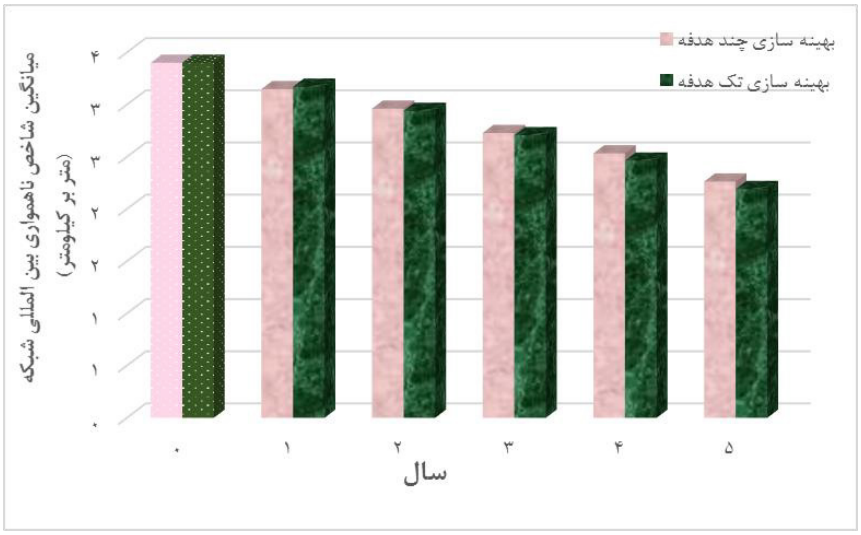
واضح است که هزینه‌های سالیانه راهکارها باید از بودجه اختصاص یافته در سال کمتر باشد. همچنین در جدول زیر، اثرات منفی زیست‌محیطی در قالب مقدار کیلوگرم گاز دی‌اکسید کربن آزاد شده در هر متر مربع بیان شده است.

۴- نتایج و بحث

همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، الگوریتم استفاده شده در این مسأله الگوریتم چرخه‌ی آب می‌باشد. این الگوریتم برای ارتقای شرایط شبکه و هر قطعه از راه استفاده شده است. برای دست‌یابی به این اهداف، ابتدا مدل بهینه‌سازی طراحی شده و سپس در نرم‌افزار مطلب نسخه ۲۰۱۹-الف اجرا گردید. بعد از انتخاب پارامترهای الگوریتم و عملیات کالیبراسیون، هر مدل (تابع هدف) ۵ بار اجرا شد و در هر بار اجرا ۵۰۰۰ بار تکرار گردید.

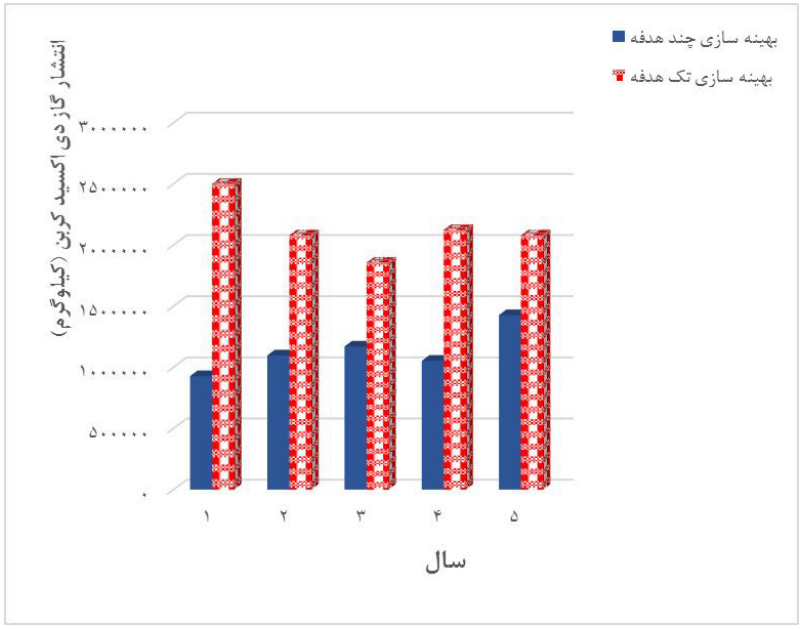
زمان اجرای الگوریتم نیز یکی از فاکتورهای مهم برای ارزیابی عملکرد الگوریتم می‌باشد. زیرا بر روی همگرایی جواب‌ها تأثیر می‌گذارد. مرتبه همگرایی یکی از پارامترهای مهم برای مسائل بهینه‌سازی می‌باشد که در این مسأله زمان اجرا به عنوان مرتبه همگرایی در نظر گرفته شد. نتایج این الگوریتم نشان‌دهنده سریع بودن آن است که می‌تواند مسأله ان-پی سخت را برای بهینه‌سازی تک‌هدفه در ۶۱۸/۶۷ ثانیه و برای بهینه‌سازی چندهدفه در ۶۶۸/۶۳ ثانیه حل کند. بیشتر بودن زمان اجرا در بهینه‌سازی چندهدفه، احتمالاً به دلیل پیچیدگی‌های محاسباتی در این مدل نسبت به بهینه‌سازی تک‌هدفه می‌باشد. برای محاسبه سرعت اجرای الگوریتم چرخه‌آب، زمان متوسط اجرا در یک سیستم core i7-6700 HQ با ۱۶ گیگابیت رم و سی پی یو ۲/۴ گیگاهرتز محاسبه گردیده است.

همان‌گونه که قبلاً اشاره گردید، مسأله ۲ بار با توابع هدف مختلف حل شده است. در شکل ۱ هزینه تعمیر و نگهداری شبکه بر حسب دلار در ۵ سال نشان داده شده و با هم مقایسه می‌گردند. در مسأله با ۲ تابع هدف، هزینه به مراتب کمتری مشاهده می‌شود. در روش بهینه‌سازی تک‌تابع‌هدفه، هزینه در دوره ۵ ساله تحلیل ۵۲/۷ میلیون دلار و در روش بهینه‌سازی چندهدفه، ۳۸/۹ میلیون دلار برآورد گردیده‌اند. مقدار هزینه در دوره ۵ ساله تحلیل، با استفاده از روش تک‌تابع‌هدفه، ۱/۵ برابر هزینه با استفاده از روش چندتابع‌هدفه می‌باشد. همچنین از نتایج حاصله می‌توان دریافت که در روش تک‌هدفه حدود ۱۵٪ و در روش چندهدفه ۴۰٪ از بودجه اختصاص یافته در ۵ سال را می‌توان ذخیره نمود. با توجه به شکل ۱، در روش بهینه‌سازی تک‌هدفه هزینه‌های تعمیر و نگهداری در ۵ سال، تقریباً حالت نزولی دارد. اما در روش بهینه‌سازی چندهدفه، هزینه‌ها در ۴ سال اول نزدیک به هم بوده و در سال پنجم، مقداری بیشتر دارد. با توجه به محدودیت ذکر شده در بالا، قابل مشاهده است که در هر دو مدل، هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری شبکه کمتر از بودجه سالیانه آن می‌باشد (۱۲ میلیون و ۲۰۰ هزار دلار).



شکل ۲. میانگین شاخص ناهمواری بینالمللی شبکه در سالهای مختلف دوره تحلیل با دو روش بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه

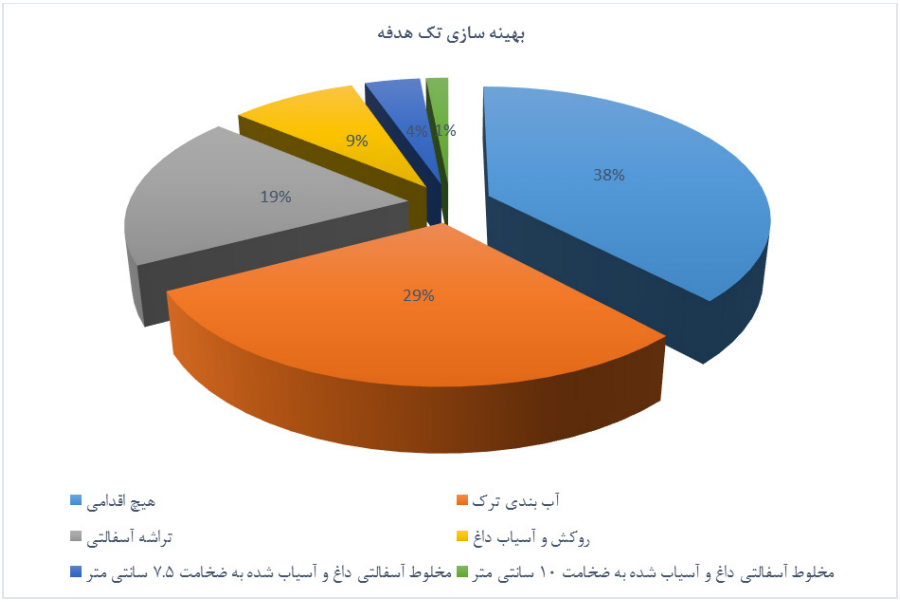
Fig. 2. The network's IRI in the analysis period presented by multi-objective and single-objective approaches



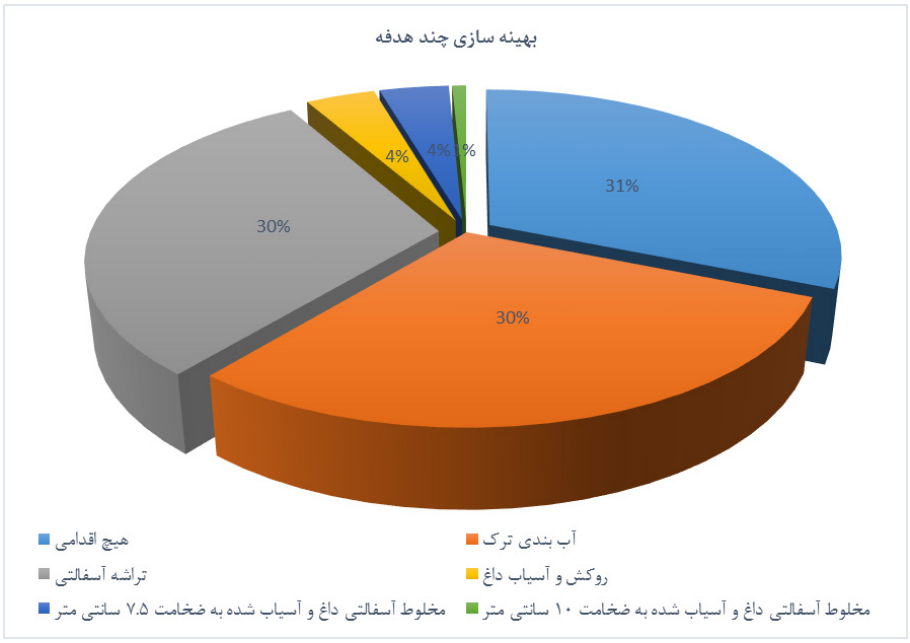
شکل ۳. گاز دی‌اکسید کربن منتشر شده در سالهای مختلف دوره تحلیل با دو روش بهینهسازی تکهدفه و چندهدفه

Fig. 3. Total CO_2 emission in the analysis period presented by multi-objective and single-objective approaches

یکی دیگر از اهداف مهم در حل این مسأله، کمینه کردن مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی میانگین شبکه می‌باشد. همان‌طور که در محدودیت‌ها ذکر گردید، حداکثر مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی در کشور ما می‌تواند ۳/۵ باشد. با توجه به شکل ۲، در هر دو مدل این محدودیت رعایت گردیده و جواب‌های حاصله مطابق اهداف سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای می‌باشد. همچنین در این شکل، مقدار میانگین شاخص ناهمواری بین‌المللی میانگین شبکه به مدت ۵ سال حاصل از دو مدل نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، میانگین شاخص ناهمواری بین‌المللی در دوره‌ی ۵ ساله تحلیل، حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. همچنین، در مقایسه بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه، مشخص است که بهینه‌سازی تک‌هدفه شاخص ناهمواری بین‌المللی بهتری را از خود به نمایش



(الف)



(ب)

شکل ۴. مقدار استفاده شده از هر کدام از عملیات‌های تعمیر نگهداری با دو روش بهینه‌سازی؛ الف) تک‌هدفه و ب) چند هدفه

Fig. 4. The percentage of each M&R activities selected by a) single-objective modeling b) multi-objective modeling

گذاشته است، اما این اختلاف عملکرد بسیار اندک می‌باشد. در این شکل مشخص است که اگر برای برنامه‌ریزی شبکه بزرگ‌مقیاس از مدل بهینه‌سازی استفاده گردد، مقدار میانگین شاخص ناهمواری بین‌المللی به طور یکنواخت کاهش پیدا می‌کند.

امروزه مسائل زیست‌محیطی به یکی از مهم ترین دغدغه‌های جوامع بشری تبدیل شده است. در نتیجه یکی از مهم ترین عوامل در حل این مسأله، انتشار گاز دی‌اکسید کربن در اثر هر یک از عملیات‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد. در شکل ۳، مقدار انتشار گاز دی‌اکسید کربن بر حسب کیلوگرم در دوره ۵ ساله تحلیل، با استفاده از ۲ تابع هدف مختلف تک‌هدفه و چندهدفه مشخص شده است. همان‌گونه که پیشتر ذکر شد، هدف کمینه کردن مقدار گاز دی‌اکسید کربن منتشر شده می‌باشد. با توجه به شکل مشخص

است که در بهینه‌سازی چندهدفه مقدار گاز دی‌اکسید کربن آزاد شده به مراتب کمتر از بهینه‌سازی تک‌هدفه می‌باشد. در بهینه‌سازی تک‌هدفه، در مجموع ۵ سال دوره تحلیل، حدود ۱۰/۶ میلیون کیلوگرم دی‌اکسید کربن آزاد می‌کند. در حالی که در بهینه‌سازی چندهدفه، این مقدار به ۵/۶ میلیون کیلوگرم می‌رسد. همچنین در تمام دوره ۵ ساله تحلیل، گاز دی‌اکسید کربن منتشر شده با استفاده از روش بهینه‌سازی تک‌هدفه به مراتب کمتر از مقدار گاز دی‌اکسید کربن منتشر شده با استفاده از روش چندهدفه می‌باشد. همچنین در شکل ۳ مشخص است که مقادیر دی‌اکسید کربن آزاد شده در روش تک‌هدفه روند خاصی را طی نمی‌کند ولی در روش چندهدفه تقریباً سیر صعودی دارد. همچنین، بیشترین مقدار گاز دی‌اکسید کربن در روش تک‌هدفه در سال اول و در روش چندهدفه در سال پنجم دوره تحلیل منتشر می‌گردند.

برای مقایسه نهایی دو مدل، تعداد تکرار هر کدام از عملیات‌های تعمیر و نگهداری در هر سال محاسبه گردید و سپس درصد هر کدام از راهکارها در سال‌های مختلف محاسبه گردیده است. همان‌گونه که مشهود است، در هر دو روش بهینه‌سازی تک‌هدفه، بیشتر مقاطع نیازی به اقدام خاصی برای تعمیر و نگهداری ندارند. در روش تک‌هدفه ۳۸٪ و در روش چندهدفه ۳۱٪ مقاطع بدون تعمیر و نگهداری در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به شکل ۴، رویکرد "آب‌بندی ترک" پس از رویکرد "هیچ اقدامی انجام ندهید" بیشترین تعداد را در بین گزینه‌ها دارد و در هر دو روش حدود ۳۰٪ از مقاطع با استفاده از عملیات "آب بندی ترک" تعمیر شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، هرچه هزینه عملیات تعمیر نگهداری بالاتر می‌رود، درصد استفاده از راهکارها کمتر شده است؛ چنان‌که "مخلوط آسفالتی داغ آسیاب شده به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر" در هر دو روش بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه، ۱٪ کل عملیات تعمیر نگهداری را شامل می‌شود. بیشترین اختلاف بین مقادیر رویکردها در دو روش بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه، در مقدار استفاده از "تراشه آسفالتی" می‌باشد. مقدار استفاده از تراشه آسفالتی در بهینه‌سازی چندهدفه ۳۰٪ می‌باشد، در حالی که در روش تک‌هدفه مقدار ۱۹٪ از کل تعمیر نگهداری را شامل می‌شود. در نهایت، می‌توان به این نتیجه دست یافت که عملیات تعمیر نگهداری با هزینه‌های کمتر، بیشتر از تعمیر و نگهداری‌های سنگین باعث بهبود شرایط روسازی می‌شوند. نتایج به دست آمده با نتایج به دست آمده توسط سایر محققین نیز یکسان می‌باشد [۲۲, ۳۷].

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی تعمیر نگهداری روسازی معرفی می‌کند که به وسیله یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری نوین برای یافتن جواب حل شده است. الگوریتم مورد استفاده در اینجا، الگوریتم چرخه‌آب می‌باشد. به دلیل اینکه، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری راه، یک مسأله ان-پی سخت است، حل با استفاده از روش‌های دقیق برای شبکه‌های با مقیاس بزرگ امکان پذیر نمی‌باشد. نتایج دست یافته بر روی این شبکه راه‌ها (شامل ۷۹ قطعه) نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی برای برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری روسازی بزرگ‌مقیاس عملکرد ایده‌آلی دارد. نتایج زیر از این مقاله برداشت می‌گردد:

- با در نظر گرفتن مقدار بودجه‌ی اختصاص یافته برای تعمیر و نگهداری هر سال، نوسانات بودجه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده و اختلاف مقدار بیشینه و کمینه بودجه اختصاص یافته کمتر از ۲۰٪ شده است، که باعث ایجاد منطقی تر شدن مدل می‌شود و نتایج قابلیت اجرایی پیدا می‌کند. همچنین بودجه‌ی اختصاص داده شده برای تعمیر و نگهداری این شبکه در طی ۵ سال ۶۱ میلیون دلار تخمین زده شده است که در برنامه‌ریزی تک‌هدفه به طور تقریبی ۱۵٪ و در دوهدفه ۴۰٪ از بودجه ذخیره گردیده است.
- میانگین شاخص ناهمواری بین‌المللی در شبکه در سال اول ۳/۴ می‌باشد. این مقدار به طور یکنواخت کاهش پیدا می‌کند و در ۵ سال آینده در بهینه‌سازی تک‌هدفه به ترتیب به ۳/۱۷، ۲/۹، ۲/۷، ۲/۵، ۲/۲ و در دو هدفه به ترتیب به ۳/۱۴، ۲/۹۶، ۲/۷۲، ۲/۵ و ۲/۲۶ کاهش پیدا می‌کند. لذا می‌توان گفت که میانگین شاخص ناهمواری بین‌المللی در دوره‌ی ۵ ساله حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد.
- در بهینه‌سازی تک‌هدفه، مقادیر دی‌اکسید کربن منتشر شده در سال‌های اول تا پنجم به ترتیب ۲/۵، ۲/۰۷، ۱/۸۶، ۲/۱، ۲/۰۸ میلیون کیلوگرم و در بهینه‌سازی چندهدفه ۰/۹۲، ۱/۰۹، ۱/۱۷، ۱/۰۵، ۱/۴ میلیون کیلوگرم می‌باشد. در بهینه‌سازی تک‌هدفه، در مجموع ۵ سال دوره تحلیل، حدود ۱۰/۶ میلیون کیلوگرم دی‌اکسید کربن آزاد می‌کند. در حالی که در بهینه‌سازی چندهدفه، این مقدار به ۵/۶ میلیون کیلوگرم می‌رسد. در نتیجه، مقدار دی‌اکسید کربن آزاد

شده با استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه ۲ برابر بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه، در حفظ محیط زیست به نتایج بسیار بهتری دست یافته‌ایم.

- در بررسی نتایج ناشی از نوسان هزینه ها، در جواب بهینه ارائه شده توسط ساها و سیبتی (۲۰۱۵) تقریباً ٪۶۳/۲ می باشد [۱۱]. میزان تغییرات هزینه در مقاله حافظ و همکاران (۲۰۱۸) در رویکرد اول و دوم به ترتیب ٪۸۵/۳ و ٪۱۸۹ می باشد [۸]. همچنین، این مقدار در تحقیق پیس و همکاران (۲۰۱۶) بیش از ٪۵۰ می باشد که مقدار قابل توجهی می باشد [۳۳]. در مقاله وو و همکاران (۲۰۱۷) مقدار کمینه و بیشینه هزینه در دوره تحلیل ۰ و ۵/۵ میلیون دلار معرفی شده است [۲۴]. لذا در این پژوهش، برای منطقی تر شدن نتیجه بدست آمده از پارامتری به نام A با مقدار ٪۲۰ جهت محدود کردن نوسان هزینه ها استفاده شده است که می‌توان آن را یکی از مؤثرترین محدودیت های در نظر گرفته شده در مدل نامید.

مراجع

[1] France-Mensah, W.J. O'Brien, Budget allocation models for pavement maintenance and rehabilitation: Comparative case study, Journal of Management in Engineering, 2(34) (2018) 05018002.

[2] R. Spielhofer, A. Weninger-Vycudil, M. Oldfield, G. Mladenović, P. Lepert, J. Pohu, H. Litzka, Cross-asset risk assessment on network level, Transport Research Arena Tra2016, 14 (2016) 41-32.

[3] P. Saha, K. Ksaibati, A risk-based optimization methodology for managing county paved roads, in: The 94th Transportation Research Board Annual Meeting 2015, Citeseer, 2015.

[4] A. Osorio, A. Chamorro, S. Tighe, C. Videla, Calibration and validation of condition indicator for managing urban pavement networks, Transportation Research Record, 1(2455) (2014) 36-28.

[5] S. Woo, H. Yeo, Optimization of pavement inspection schedule with traffic demand prediction, Procedia-Social and Behavioral Sciences, 218 (2016) 103-95.

[6] S. Islam, W.G. Buttlar, Effect of pavement roughness on user costs, Transportation research record, 5(1)228 (2012) -47 55.

[7] C. Torres-Machi, E. Pellicer, V. Yepes, A. Chamorro, Towards a sustainable optimization of pavement maintenance programs under budgetary restrictions, Journal of cleaner production, 148 (2017) 102-90.

[8] M. Hafez, K. Ksaibati, R.A .Atadero, Applying large-scale optimization to evaluate pavement maintenance alternatives for low-volume roads using genetic algorithms, Transportation Research Record, 52(2672) (2018) 215-205.

[9] 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.

[10] A.V. Moreira, T.F. Fwa, J.R. Oliveira, L. Costa, Coordination of user and agency costs using two-level approach for pavement management optimization, Transportation Research Record, 1(2639) (2017) 118-110.

[11] P. Saha, K. Ksaibati, Optimization model to determine critical budgets for managing pavement and safety: Case study on statewide county roads, Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2)145) (2019) 04018088.

[12] N.R. Tayebi, F.M. Nejad, M. Mola, Comparison between GA and PSO in analyzing pavement management activities, Journal of Transportation Engineering, 1(140) (2014) 104-99.

[13] A.G. Matin, R.V. Nezafat, A. Golroo, A comparative study on using meta-heuristic algorithms for road maintenance planning: Insights from field study in a developing country, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 5(4) (2017) 486-477.

[14] K. Ahmed, B. Al-Khateeb, M. Mahmood, A chaos with discrete multi-objective particle swarm optimization for pavement maintenance, J. Theor. Appl. Inf. Technol, 8(96) (2018) 2326-2317.

[15] T.R. Panda, A.K. Swamy, An improved artificial bee colony algorithm for pavement resurfacing problem, International Journal of Pavement Research and Technology, 5(11) (2018) 516-509.

[16] C. Torres-Machí, A. Chamorro, E. Pellicer, V. Yepes, C. Videla, Sustainable pavement management: Integrating economic, technical, and environmental aspects in decision making, Transportation Research Record, 1(2523) (2015) 63-56.

[17] R.B. Mallick, A. Veeraragavan, Sustainable pavements in India-the time to start is now, New Building Materials and Construction World (NBM&CW) Magazine, 3(16) (2010) 140-128.

[18] 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.

[19] S. Chan, B. Lane, T. Kazmierowski, W. Lee, Pavement preservation: A solution for sustainability, Transportation research record, 1)2235) (2011) 42-36.

[20] F. Giustozzi, M. Crispino ,G. Flintsch, Multi-attribute life cycle assessment of preventive maintenance treatments on road pavements for achieving environmental sustainability, The International Journal of Life Cycle Assessment, 4(17) (2012) 419-409.

[21] P. Lu, D. Tolliver, Pavement treatment short-term effectiveness in IRI change using long-term pavement program data, Journal of transportation engineering, 11(138) (2012) 1302-1297.

[22] M.Y. Shahin, Pavement management for airports, roads, and parking lots, Springer New York, 20.

[23] A. Osorio-Lird, A. Chamorro, C. Videla, S. Tighe, C. Torres-Machi, Application of Markov chains and Monte Carlo simulations for developing pavement performance models for urban network management, Structure and Infrastructure Engineering, 14.

[24] D. Wu, C. Yuan, H. Liu, A risk-based optimization for pavement preventative maintenance with probabilistic LCCA: a Chinese case, International Journal of Pavement Engineering, 1(18) (2017) 25-11.

[25] Iran's Road Maintenance and Transportation Organization." http://www.rmto.ir , Access on: Nov, 2018.

[26] C.H. Papadimitriou, On the complexity of integer programming, Journal of the ACM (JACM), 4(28) (1981) 768-765.

[27] A. Sadollah, H. Eskandar, A. Bahreininejad, J.H. Kim, Water cycle algorithm for solving multi-objective optimization problems, Soft Computing, 9(19) (2015) 2603-2587.

[28] Sadollah, H. Eskandar, J.H. Kim, Water cycle algorithm for solving constrained multi-objective optimization problems, Applied Soft Computing, 27 (2015) 298-279.

[29] H. Eskandar, A. Sadollah, A. Bahreininejad, M. Hamdi, Water cycle algorithm–A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems, Computers & Structures, 110 (2012) 166-151.

[30] A. Sadollah, H. Eskandar, H.M. Lee, J.H. Kim, Water cycle algorithm: a detailed standard code, Software X, 5 (2016) 43-37.

[31] Sadollah, H. Eskandar, A. Bahreininejad, J.H. Kim, Water cycle algorithm with evaporation rate for solving constrained and unconstrained optimization problems, Applied Soft Computing, 30 (2015) 71-58.

[32] Q. Dong, B. Huang, Evaluation of effectiveness and cost-effectiveness of asphalt pavement rehabilitations utilizing LTPP data, Journal of Transportation Engineering, 6)138).

[33] V. Yepes, C. Torres-Machi, A. Chamorro, E. Pellicer, Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid greedy randomized adaptive search procedure algorithm, Journal of Civil Engineering and Management, 4(22) (2016) 550-540.

[34] Y. Li, S. Madanat, A steady-state solution for the optimal pavement resurfacing problem, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 6(36) (2002) 535-525.

[35] Y. Ouyang, S. Madanat, Optimal scheduling of rehabilitation activities for multiple pavement facilities: exact and approximate solutions, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 5(38) (2004) 365-347.

[36] J. Chehovits, L. Galehouse, Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete pavements, in: Proceedings on the 1st International Conference of Pavement Preservation, 2010,

optimization for arterial roads in the city of Chattanooga, Frontiers of Structural and Civil Engineering, 3(12) (2018) 299-291.

pp. 42-27.

[37] M. Onyango, S.A. Merabti, J. Owino, I. Fomunung, W. Wu, Analysis of cost effective pavement treatment and budget

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Naseri, E. Safari Ghalekoli, S. Mohamadzade Saliani, F. Moghadas Nejad, A. Golroo, Carbon Dioxide Minimization in Large-Scale Pavement Network Maintenance Planning, Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3187-3200.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17650.6632

این صفحه عمداً خالی است