Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 591-594
DOI: 10.22060/ceej.2020.17500.6582

Extended Abstract Template for Amirkabir Journal of Science and Research

A. Golroo* , A. H. Fani, H. Naseri

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

ABSTRACT: Pavement management system (PMS), Maintenance and rehabilitation scheduling optimization are some of the most critical parts of the pavement management system. Pavement agencies usually face large-scale pavement networks. The complexity of network management is exponentially increased in the circumstances that the dimension of the network is extended. Hence, meta-heuristic algorithms and decomposition techniques are usually applied to solve these problems. In this investigation, energy consumption optimization is taken into account as an essential environmental criterion. Furthermore, a recently developed meta-heuristic algorithm called the Soccer league competition algorithm is utilized to solve the problem. This robust algorithm is inspired by the competitions of players and teams in soccer leagues. A real network containing 84 segments is the case study of this investigation. According to the results, the Soccer league competition algorithm is competent to solve a large-scale network problem in a short time. Moreover, the comparison of different strategies outcomes indicates that considering energy consumption as the second objective function reduces the energy consumption and total cost 13% and 10%, respectively, and increases the

Review History:

Received: Dec. 08, 2019
Revised: Jan. 30, 2020
Accepted: Feb. 01, 2020
Available Online: Mar. 01, 2020

Keywords:

Pavement management system (PMS)
Maintenance and rehabilitation planning
Soccer league competition algorithm (SLC)
Energy consumption.

1- Introduction

Due to the importance of sustainable development, environmental issues have become an immense concern for travel agencies. To this end, energy consumption, as one of the most critical environmental criteria, ought to be scrutinized in pavements maintenance and rehabilitation planning [1]. Robinette et al. [2] declared that the environmental effects of pavements maintenance strategies should be considered in life cycle cost analysis. Faghih-Imani et al. [3] expressed that the condition of roads, the financial issues, and the environmental parameters such as energy consumption should be taken into account in pavements maintenance simultaneously. Accordingly, in this investigation, the energy consumption is taken into consideration in the optimization problem, and the outcomes of this problem are compared with a performance-based model.

2- Methodology

In this section, the pavement performance indicator selection and the performance model is described. Afterward, the problem modeling of two strategies is explained. Ultimately, the algorithm applied to solve the optimization problem is introduced.

2- 1- 2.1. Performance indicator selection

Performance indicators pave the way for detecting the optimal maintenance and rehabilitation treatments applied to enhance the condition of the pavement network. In this study, the International Roughness Index (IRI) is utilized to make the model. Because increasing the value of IRI leads to increasing the travel time, used cost, and driver's complaint [4]. Meanwhile, the performance model introduced by Tsunokawa and Schofer [5] is considered to estimate the pavement's deterioration rate. The mentioned model is presented in Eq. (1).

$$IR_{it^*} = IR_{it^0} \exp\left(\beta\left(t^* - t^0\right)\right) \quad (1)$$

2- 2- Problem modeling

Two models are considered in this study, including single-objective and two objective optimization models. In single-objective modeling, the condition of pavements is the objective function of the model. In the two-objective problem, the energy consumption and condition of pavements are set as the objective function simultaneously. The objective function of single-objective optimization is presented in Eq.

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

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.

(2). The two-objective optimization model considers Eq. (2) and (3) simultaneously as the objective functions. The constraints of these two optimization problems are equally, and they indicate in Eq. (4) to (11).

$$Minimize \sum_{i=1}^{I} \left(\left| IR_{iT} - IR_i^* \right| \right) \quad (2)$$

$$Minimize \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{K} \sum_{t=1}^{T} A_i EN_{ikt} x_{ikt} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{K} A_i C_{ikt} x_{ikt} \le B_t \qquad \forall t \in T \quad (4)$$

$$IR_{it} = IR_{i0} \exp(\beta t) + \sum_{j=1}^{t} \sum_{k=1}^{K-1} x_{ikt} e_{ik} \exp(\beta (t-j)) \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$IR_{it} \ge IR_{min} \qquad \forall t \in T \quad (6)$$

$$IR_{it} \le IR_{max} \qquad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\overline{IR}_t = \frac{\sum_{i=1}^{I} IR_{it} A_i}{\sum_{i=1}^{I} A_i} \qquad \forall t \in T \quad (8)$$

$$\overline{IR}_t \le IR_t^{network} \qquad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{K} X_{ikt} = 1 \qquad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (10)$$

$$X_{ikt} \in \{0,1\}, IR_{it} \ge 0 \quad (11)$$

Where IR_{i0}, IR_{it}, IR_{min}, IR_{max}, IR_i^*, $\overline{IR}_t$, $IR_t^{network}$, A_i, β, B_t, C_{ikt}, and e_{ik} are the IRI of section i at the initial year, the IRI of section i at the time of t, the lower bound of acceptable IRI, the maximum allowed value of IRI, the ideal level of IRI at the end of the analysis period, the average value of sections IRI at the year of t, the required the average value of sections IRI at the year of t, the section area, the deterioration rate, available budget at the year of t, unit price of the treatment k for section i at the time of t, and the improvement of IRI of section i owing to implementing treatment k, respectively.

2- 3- Optimization algorithm

In this investigation, the soccer league competition algorithm is applied to find the optimal solutions to the problem. This algorithm is a recently developed meta-heuristic algorithm, which is inspired by professional soccer league competitions. This algorithm is coded based on the details provided by Moosavian and Kasaee Roodsari [6].

3- Case study

A network including 84 sections with a total length of 251 km is the case study of this study. The average length of sections is equal to 2.99 km. Furthermore, the annual budget is considered 17 billion Toman (Iran currency) based on the report of road maintenance and transportation organization. The analysis period is 5 years, and the deterioration rate is taken into account 0.05 according to the authentic international publications [7-9].

4- Results and discussions

The average value of the section's IRI is illustrated in Figure 1a. As can be seen from the results of this figure, the average value of IRI is reduced steadily in two models. However, the single-objective model outweighs the two-objective model, and the average of network IRI in the single-objective model is 9% lower than that of the two-objective model.

The required cost to implement the optimal solution of single-objective and two-objective models is demonstrated in Figure 1b. Drawing on the results, the total money that should be paid for the optimal solutions of single-objective and two-objective models is equal to 57.4 and 52 billion Tomans, in the order mentioned. Hence, it can be postulated that consideration of energy consumption in pavement maintenance and rehabilitation problem may lead to reducing the total required cost.

The energy consumption of single-objective and two-objective models during the 5 year analysis period is indicated in Figure 1c. As can be perceived from the results of this figure, the performance of the two-objective model in order to reduce the energy consumption is by far better than that of the single-objective model. The reduction of energy consumption in the two-objective model is owing to the consideration of energy consumption as one of the objective functions of the model. The total energy required to implement the optimal solutions of the two-objective model is 13% lower than that of the single-objective model.

5- Conclusions

- Soccer league competition is highly qualified to solve large-scale maintenance and rehabilitation planning problems.
- Comparing the results of single-objective and two-objective models indicates that by consideration of energy consumption is model, the average value of IRI in the network is increased by 9%. Nonetheless, the total required cost and total energy consumption are reduced 9% and 13%, in the order mentioned, if the two-objective model is replaced with the single-objective model.

• By virtue of maintenance and rehabilitation planning, the average value of IRI is reduced steadily in both models.

References

[1] R. Mallick, V. Amirthalingam, Sustainable pavements in India-the time to start is now, New Build. Mater. Constr. World Mag, 16 (2010) 128-140.

[2] C. Robinette, J. Epps, Energy, Emissions, Material Conservation, and Prices Associated with Construction, Rehabilitation, and Material Alternatives for Flexible Pavement, Transportation Research Record, 2179 (2010) 10-22.

[3] A. Faghih-Imani, L. Amador-Jimenez, Toward Sustainable Pavement Management: Incorporating Environmental Impacts of Pavement Treatments into a Performance-Based Optimization, Transportation Research Record, 2366 (2013) 13-21.

[4] K. Tsunokawa, J.L. Schofer, Trend curve optimal control model for highway pavement maintenance: Case study and evaluation, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 28 (1994) 151-166.

[5] T. Watanatada, C.G. Harral, W.D.D.D. Paterson, A.M., A. Bhandari, K. Tsunokawa, The Model., Highway Design and Maintenance Standard Model (1): Description of the HDM-III, (1988).

[6] N. Moosavian, B. Kasaee Roodsari, Soccer league competition algorithm: A novel meta-heuristic algorithm for optimal design of water distribution networks, Swarm and Evolutionary Computation, 17 (2014) 14-24.

[7] 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 (2004) 347-365.

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

[9] S.R. Seyedshohadaie, I. Damnjanovic, S. Butenko, Risk-based maintenance and rehabilitation decisions for transportation infrastructure networks, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44 (2010) 236-248.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Golroo , A. H. Fani, H. Naseri , Extended Abstract Template for Amirkabir Journal of Science and Research , Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 591-594.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17500.6582

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۶۹۵ تا ۲۷۱۲
DOI: 10.22060/ceej.2020.17500.6582

برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر شبکه‌های بزرگ-مقیاس روسازی با در نظر گرفتن مصرف انرژی

امیر گل‌رو*، امیرحسین فانی، حامد ناصری

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

خلاصه: مدیریت زیرساخت‌های بزرگ حمل و نقلی نظیر روسازی‌ها نیازمند یک برنامه‌ریزی اصولی و بهینه است تا از هدررفت منابع جلوگیری شود. بنابراین یکی از مهم‌ترین بخش‌های یک سیستم مدیریت روسازی، بهینه سازی برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر می‌باشد. سازمان‌های متولی راه عمدتا با شبکه‌هایی بزرگ با تعداد قطعات بالا سر و کار دارند. پیچیدگی محاسباتی مدیریت این شبکه‌ها با بالارفتن اندازه شبکه و تعداد قطعات آن به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. روش‌های دقیق بهینه‌سازی عموما برای مسائل با اندازه کوچک طراحی شده‌اند. لذا روش‌هایی نظیر الگوریتم‌های فرا ابتکاری و تکنیک‌های تجزیه برای حل این گونه مسائل پیشنهاد شده و کارایی خوبی از خود نشان داده‌اند. از سویی دیگر، اخیرا در مسئله برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر روسازی اثرات زیست محیطی و کنترل آن‌ها به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش بهینه سازی مصرف انرژی به عنوان یکی از مهم‌ترین مولفه‌های زیست محیطی و بهینه سازی وضعیت قطعات شبکه به عنوان هدف اصلی سازمان به صورت توأمان در بستر بهینه سازی دو هدفه مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل مسئله، از یک الگوریتم فرا ابتکاری جدید به نام الگوریتم رقابت لیگ فوتبال که توانایی خوبی برای حل مسائل گسسته نشان داده، استفاده شده است. ایده این الگوریتم از رقابت لیگ‌های فوتبال الهام گرفته شده که بر اساس رقابت بین تیم‌ها و بازیکنان است. نمونه موردی این پژوهش یک شبکه واقعی با ۸۴ قطعه روسازی می‌باشد. نتایج به‌دست آمده نشان داد این الگوریتم توانایی حل مسئله یک شبکه بزرگ در زمان کوتاه و منطقی را دارد. به علاوه مقایسه جواب‌ها مشخص کرد در نظر گرفتن مصرف انرژی به عنوان تابع هدف دوم مسئله همراه با بهینه سازی وضعیت قطعات شبکه، به کاهش ۱۳ درصدی مصرف انرژی، کاهش ۱۰ درصدی هزینه‌های کل و افزایش ۹ درصدی میانگین ناهمواری قطعات شبکه منجر می‌شود..

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۹/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۰
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

کلمات کلیدی:
سیستم مدیریت روسازی
برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر
بهینه سازی
الگوریتم رقابت لیگ فوتبال
مصرف انرژی

۱- مقدمه

مطابق پیش بینی ها، جمعیت ایران در سال ۱۴۲۰ به ۹۵ میلیون نفر می رسد که نشان دهنده رشد حدود ۲۰ درصدی جمعیت کنونی می باشد. این رشد سبب افزایش تقاضا برای انواع محصولات و خدمات شده و در نتیجه منجر به افزایش تقاضا در سیستم حمل و نقل نیز می گردد. از طرف دیگر حمل و نقل جادهای با دارا بودن آمار سالیانه جابه‌جایی حدود ۶۰۰ میلیون تن کالا، ۹۰۰ میلیون مسافر و ۱۰ میلیون تن ترانزیت کالا بیش از ۹۰ درصد جابه‌جایی کالا و مسافر را انجام می دهد و این موضوع نشان دهنده اهمیت و سهم بالای حمل و نقل جادهای در ایران می باشد [۱].

روسازی جاده ها یکی از اجزای اصلی زیرساخت های حمل و نقل جاده ای هستند و به گونه ای طراحی می شوند که بتوانند دوره عمر بهره برداری طولانی را در شرایط ایمن، هموار و قابل استفاده فراهم کنند. وضعیت شبکه راه های کشور اثر بسیار عمیقی در بسیاری از مسائل از جمله اقتصاد، توسعه، رفاه و محیط زیست دارد. از این رو، همواره بحث های مربوط به خرابی روسازی و هزینه های مربوط به تعمیر و نگهداری راه ها، یکی از مباحث مهم در مهندسی راه و ترابری بوده است. سیستم مدیریت روسازی به کلیه فعالیتهای مربوط به نگهداری شبکه راه، در جهت افزایش سطح خدمت رسانی و عملکردی قطعات مختلف آن گفته میشود که هدف آن کمینه سازی هزینه های مربوط به گزینه های مختلف عملیات نگهداری و تعمیر[1] (عملیات نِت) و ارتقای سطح روسازی راه به یک حد قابل قبول برای راحتی رانندگان است [۲].

با توجه به محدود بودن منابع مالی و افزایش روز افزون هزینه های

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

1 Maintenance and Rehabilitation (M&R)

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.

مربوط به نگهداری راه ها، انتخاب یک عملیات نگهداری مناسب و همچنین تعیین زمانبندی مؤثر، به صورتی که هزینه های مربوط به نگهداری راه کمینه شود، یکی از نگرانی های مهم مدیران ارشد و متولیان امر است. این امر از طریق بهینه سازی برنامه‌ریزی عملیات نت در سطح شبکه تحقق میباید. در یک شبکه روسازی هدف از بهینه سازی دریافت پاسخ این سوال مهم است که در کدام مقطع روسازی، چه زمانی و چه نوع عملیات نت نیاز است تا با توجه به محدودیت منابع، مقاطع شبکه در سطح مطلوب مورد نظر حفظ شوند. مدل‌سازی این مسئله عمدتا به یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح[1] منجر می گردد [۳].

سازمان های متولی راه همواره با شبکه هایی در مقیاس صدها و هزاران قطعه مواجه هستند. نکته قابل توجه در مورد مدل های برنامه‌ریزی عدد صحیح بهینه سازی مدیریت روسازی پیچیدگی محاسباتی[2] آن ها است که از مرتبه نمایی می باشد. در نتیجه با بزرگ شدن تعداد مقاطع شبکه روسازی مورد بررسی، پیچیدگی محاسباتی به صورت نمایی افزایش یافته و حل دقیق مسئله به خصوص برای شبکه های بزرگ مقیاس[3] دشوار می گردد. لذا پرداختن به مسئله برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی برای شبکه های بزرگ و واقعی امری چالش برانگیز و در عین حال ضروری می‌باشد. از طرف دیگر، ملاحظات زیست محیطی من‌جمله بهینه سازی مصرف انرژی برای سازمان های متولی راه به موضوعی مهم و اجتناب ناپذیر بدل شده است. توجه به این موضوع در واقع به معنی صرفه جویی و جلوگیری از اتلاف انرژی، سرمایه‌ها و منابع با ارزش می باشد. انجام هر یک از عملیات نت روسازی در مراحل مختلف ساخت تا اجرا، مصرف انرژی مشخصی را در پی دارد. لذا می‌توان مدل بهینه سازی برنامه‌ریزی عملیات نت را به گونه‌ای تعریف نمود که یکی از اهداف آن بهینه سازی مصرف انرژی باشد [۳].

۲- مرور ادبیات

در مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح، پیچیدگی محاسباتی مسئله بهینه سازی برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی با افزایش اندازه شبکه به صورت نمایی افزایش پیدا میکند. حل مسائل شبکه های کوچک مقیاس توسط روش های دقیق بهینه سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح مانند شاخه و کران[4] میسر است، لیکن این روش ها به دلیل ماهیت ترکیبیاتی مسئله، توانایی حل مسائل بزرگ مقیاس را در زمان منطقی ندارند [۴]. برای حل این چالش، محققان به دو دسته از روش ها شامل تکنیک های تجزیه[5] و روش های فرا ابتکاری[6] روی آورده اند [۵]. برخی اوقات آنچه که حل یک مسئله را از روش‌های معمول بسیار مشکل می‌کند، این است که بیش از یک مورد تصمیم‌گیری وجود دارد. هر یک از این موارد تصمیم‌گیری ممکن است به تنهایی پیچیده نباشند، اما در نظر گرفتن همه آن ها در یک مدل به طور همزمان، چندان آسان نیست. تکنیک تجزیه می‌تواند در چنین مسائلی مفید واقع شود. از جمله این روش ها می توان به روش های تجزیه بندرز[7]، تجزیه دانتزیگ – ولف[8] و آزادسازی و تجزیه لاگرانژ[9] اشاره کرد [۶].

در پژوهش های کاراباکال و همکاران و داهل و مینکن از تکنیک آزادسازی لاگرانژ برای تجزیه مسئله برنامه‌ریزی عملیات نت به زیرمسئله هایی جداگانه استفاده شده است. سپس هر زیرمسئله توسط الگوریتم کوتاه ترین مسیر حل شده است. شاخص وضعیت روسازی و میزان تأثیر و بهبود عملیات نت به جهت به کارگیری الگوریتم کوتاه ترین مسیر در هر یک از زیر مسئله ها گسسته سازی شده و به چند بازه تقسیم شده است [۸ و ۷]. ژائو و ژانگ نیز مسئله را به کمک تکنیک آزادسازی لاگرانژ تجزیه کرده و از الگوریتم شاخه و برش برای حل زیرمسئله ها استفاده کردند. در روش آن ها نیازی به گسسته سازی شاخص وضعیت روسازی نیست [۵].

روش های فرا ابتکاری برای برطرف کردن ضعف روش های دیگر ابداع شده اند تا با استفاده از مکانیزم‌هایی به جهت خروج از بهینه محلی، توانایی یافتن جواب‌های با کیفیت بالا برای مسائل بهینه سازی پیچیده به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. این روش ها با کمک تصادف و الهام گرفتن از حقایق طبیعی و اجتماعی و غیره سعی در یافتن جواب دارند. هر چند از این روش ها برای حل مسائل پیوسته نیز به کار گرفته شده، اما استفاده گسترده این روش ها در مسائل گسسته به چشم میخورد. موضوع مهم در الگوریتم های فرا ابتکاری تعادل بین کاوش[10] و بهره‌وری[11] است. کاوش به معنای توانایی الگوریتم برای جستجوی مناطق مختلف فضای جستجو است و بهره‌وری قابلیت متمرکز کردن جستجو در محدوده مطلوب است تا جواب مورد نظر موشکافی شود. یک الگوریتم فرا ابتکاری کارا این دو هدف را با یکدیگر متعادل می‌کند [۹].

1 Integer Programming (IP) Model
2 Computational Complexity
3 Large-Scale Network
4 Branch and Bound (B&B)
5 Decomposition Techniques
6 Metaheuristic Algorithms
7 Benders Decomposition
8 Dantzig and Wolfe
9 Lgrangian Relaxation
10 Exploration
11 Exploitation

پرکاربردترین الگوریتم های فرا ابتکاری استفاده شده در مسئله مدیریت عملیات نت روسازی، الگوریتم های ژنتیک[1] و ازدحام ذرات[2] می باشند [۱۰]. الگوریتم ژنتیک به طور گسترده در حل مسئله شبکه بزرگ مقیاس مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶-۱۱]. الگوریتم ژنتیک برای اولین بار توسط فاو و همکاران [۱۲] برای حل این مسئله به کار گرفته شد. پس از آن در چند پژوهش از نسخه چند هدفه این الگوریتم یعنی الگوریتم ژنتیک چند هدفه مبتنی بر مرتب سازی نامغلوب[3] برای بهینه سازی اهداف و سیاست های مختلف نگهداری راه نظیر مینیمم سازی هزینه سازمان ها، مینیمم سازی هزینه وارد شده به کاربران و بهینه سازی وضعیت قطعات شبکه استفاده شد [۱۷ و ۱۵ و ۱۳].

مقایسه عملکرد دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات به منظور بهینه سازی برنامه‌ریزی عملیات روسازی در حالت تک هدفه توسط طیبی و همکاران صورت گرفت و نشان داده شد الگوریتم ازدحام ذرات در زمان کمتر جواب های بهتری ارائه می دهد [۱۰]. در پژوهش متین و همکاران مقایسه دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات در دو حالت تک هدفه و چند هدفه صورت گرفته است و نشان داده شد که در حالت تک هدفه، الگوریتم ازدحام ذرات و در حالت چندهدفه، الگوریتم ژنتیک چند هدفه مبتنی بر مرتب سازی نامغلوب[4] عملکرد بهتری دارند [۱۸].

در طی سالیان اخیر الگوریتم‌ها و روش‌های فرا ابتکاری جدید و با عملکرد بسیار مناسب در ادبیات بهینه سازی معرفی شده اند. لیکن در زمینه حل مسئله برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی شبکه های بزرگ مقیاس به عنوان یک مسئله با پیچیدگی محاسباتی بالا تنها به استفاده از چند روش کلاسیک فرا ابتکاری بسنده شده است و در این زمینه خلأ تحقیقاتی مشاهده می‌شود. در این مقاله الگوریتم رقابت لیگ فوتبال[5] به عنوان یک الگوریتم جدید که از خود کارایی خوبی برای حل مسائل گسسته نشان داده است به کار گرفته می‌شود [۱۹].

ایده اصلی این الگوریتم با الهام از لیگ‌های حرفه‌ای فوتبال و بر اساس مسابقات بین تیم‌ها و همچنین بازیکنان است. مانند دیگر روش‌های فرا ابتکاری، این روش با یک جمعیت اولیه شروع می‌شود. اعضای جمعیت (بازیکنان) در دو نوع هستند: بازیکنان ثابت و جایگزین. از رقابت میان تیم‌ها برای به دست آوردن مقام‌های برتر در جدول لیگ و از مسابقات داخلی بین بازیکنان در هر تیم برای پیشرفت‌های شخصی آن‌ها و همگرایی افراد جامعه به حد مطلوب نهایی استفاده می‌شود [۱۹]. به علاوه در مورد مسائل زیست محیطی، اثرات زیان‌بار صنایع حمل و نقل و روسازی بر محیط زیست قابل اغماض نمی‌باشند. تقریبا ۳۰٪ آلودگی هوای بین المللی و ۲۵٪ مصرف سوخت‌های فسیلی در دنیا مربوط به صنعت حمل و نقل می‌باشد [۲۰]. ازاین رو اهمیت تحلیل و بررسی اثرات زیست محیطی در مدیریت روسازی از جمله مصرف انرژی مضاعف می‌باشد.

چان و همکاران (۲۰۱۱) کاهش مصرف انرژی در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری روسازی راه‌ها را از مهم ترین رویکردها جهت ارتقای توسعه پایدار معرفی کردند. در این پژوهش، چند عملیات نت مرسوم از لحاظ شرایط عملکردی، شرایط اقتصادی و میزان آلایندگی زیست محیطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و نتایج به دست آمده نشان داد که انتخاب عملیات نت مناسب سبب کاهش چشمگیر مصرف انرژی می‌شود. همچنین، عملیات پیشگیرانه به عنوان بهترین روش جهت کاهش انرژی معرفی گردید [۲۰].

روبینت و همکاران (۲۰۱۰) بررسی اثرات زیست محیطی هر یک از عملیات نگهداری و بازسازی روسازی‌ها را در تحلیل هزینه چرخه عمر امری ضروری دانسته و بیان کردند که مصرف انرژی و هزینه چرخه عمر باید به صورت توأمان در تحلیل عملیات نت روسازی‌ها در نظر گرفته شوند. لذا، در نظر گرفتن این استراتژی سبب بهبود شرایط زیست محیطی و توسعه پایدار می‌گردد [۲۱].

فقیه ایمانی و همکاران (۲۰۱۳) بیان کردند که کاهش اثرات محیط زیستی از جمله مصرف انرژی باید به عنوان یک هدف مهم همزمان با کاهش هزینه و ارتقای وضعیت روسازی در نظر گرفته شود. در این تحقیق، با مقایسه گزینه‌های مختلف نگهداری راه، برنامه عملیات بهینه از نظر ملاحظات زیست محیطی معرفی شدند. سپس، با در نظر گرفتن یک مطالعه موردی مشخص گردید می‌توان با انتخاب‌های آگاهانه بدون پرداخت هزینه اضافه اثرات مخرب زیست محیطی عملیات نت را تا سطح چشمگیری کاهش داد [۲۲].

وانگ و همکاران (۲۰۱۱) مصرف انرژی را در تحلیل چرخه عمر روسازی‌های راه در نظر گرفتند. در این پژوهش، راه‌های پرتردد و راه‌های با ترافیک کم به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. سپس، یک مطالعه موردی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاکی از آن بودند که انتخاب برنامه عملیات مناسب سبب بهبود شرایط محیط زیست می‌شود. نتایج پژوهش نشان داد که در راه‌های پرتردد انتخاب بهینه عملیات نوسازی و در راه‌های

1 Genetic Algorithm
2 Particle Swarm Optimization (PSO)
3 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGAII)
4 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGAII)
5 Soccer League Competition (SLC)

کم تردد انتخاب صحیح مصالح و کیفیت اجرا نقش کلیدی در کاهش مصرف انرژی ایفا می‌کنند [۲۳].

در زمینه برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی برای شبکه های واقعی، خلأ پژوهشی که علاوه بر یافتن برنامه عملیات بهینه بر اساس سیاست های تعیین شده، بهینه سازی مصرف انرژی را نیز به صورت توأمان به عنوان یک هدف در نظر بگیرد دیده می‌شود. در این پژوهش سعی شده است پس از به دست آوردن انرژی مصرفی برای اجرای هر یک از عملیات نت، بهینه سازی مصرف انرژی در کنار سایر اهداف مد نظر قرار گیرد.

۳- بیان مسئله و اهداف

سازمان های متولی راه همواره با شبکه هایی در مقیاس صدها و هزاران قطعه مواجه هستند. با بزرگ شدن تعداد مقاطع شبکه روسازی، پیچیدگی حل مسئله به صورت نمایی افزایش یافته و حل دقیق مسئله دشوار می گردد. از طرف دیگر محدود بودن ذخایر فسیلی و همچنین آلودگی های ناشی از مصرف این سوخت‌ها موجب گشته تا در دو دهه اخیر موضوع محیط زیست و ابعاد مختلف آن به عنوان یک دغدغه عمومی در تمامی زمینه های مرتبط مطرح گردد. از این رو اهداف اصلی این پژوهش بهینه سازی برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی برای شبکه‌های بزرگ مقیاس و واقعی به همراه بهینه سازی مصرف انرژی به کمک الگوریتم فرا ابتکاری رقابت لیگ فوتبال و همچنین بررسی اثرات در نظر گرفتن مصرف انرژی بر روی برنامه بهینه عملیات نت و سایر پارامترها می باشد.

۴- روش تحقیق

با توجه به مباحث مطرح شده، برای اینکه بتوان چنین اهدافی را دنبال نمود و در نهایت بدان دست یافت، باید گام های مختلفی را طی نمود. به طور کلی انجام پژوهش را می توان به ترتیب با گام های انتخاب شاخص وضعیت روسازی و مدل عملکردی آن، توسعه مدل برنامه‌ریزی عملیات نت در دو حالت بدون لحاظ کردن مصرف انرژی و سپس در نظر گرفتن آن در مدل، ارائه الگوریتم حل مسئله و حل شبکه نمونه موردی مسئله با ۸۴ قطعه خلاصه کرد. هر یک از گام های اشاره شده در ادامه تشریح گردیده است.

۱- ۱- انتخاب شاخص وضعیت روسازی و مدل عملکردی آن

مدل های عملکردی روسازی در مدیریت روسازی نقش کلیدی دارند و در واقع نشان دهنده این موضوع هستند که روند خرابی روسازی به چه صورت بوده و در چه زمانی به وضعیت بحرانی می‌رسد و نیازمند عملیات نگهداری می باشد. ناهمواری راه یک شاخص با اهمیت در رابطه با راحتی سواری و ایمنی روسازی محسوب می‌شود. برای یک راننده اتومبیل، رانندگی در راه‌های ناهموار به معنی فقدان راحتی، کاهش سرعت، خرابی احتمالی وسیله نقلیه و افزایش هزینه‌های عملیاتی است. شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی ناهمواری روسازی راه وجود دارد که شاخص بین‌المللی ناهمواری[1] از مهم‌ترین آنها محسوب می‌شود. لذا همانطور که گفته شد از آنجا که ناهمواری راه، یکی از شاخص های کلیدی در ارزیابی عملکرد راه است، شاخص بین المللی ناهمواری به عنوان شاخص عملکردی در این پژوهش در نظر گرفته شده است [۲۴].

برای شاخص بین المللی ناهمواری، مدل‌های عملکردی گوناگونی تاکنون معرفی شده است. مدل شناخته شده و پرکاربرد برای مدیریت عملیات نت در سطح شبکه ، مدل منحنی روند[2] می باشد که توسط تیسانوکاوا و شوفر و بر اساس داده های جمع آوری شده توسط بانک جهانی [۲۵] معرفی شده است [۲۴]. تابع زوال در این مدل، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، نسبت ناهمواری به ناهمواری اولیه را به صورت نمایی در طی زمان بیان می کند. اگر ناهمواری اولیه قطعه برابر IR_{it° باشد، در زمان آینده t^* ($t^* > t$)، وضعیت این قطعه توسط معادله (۱) بیان میشود.

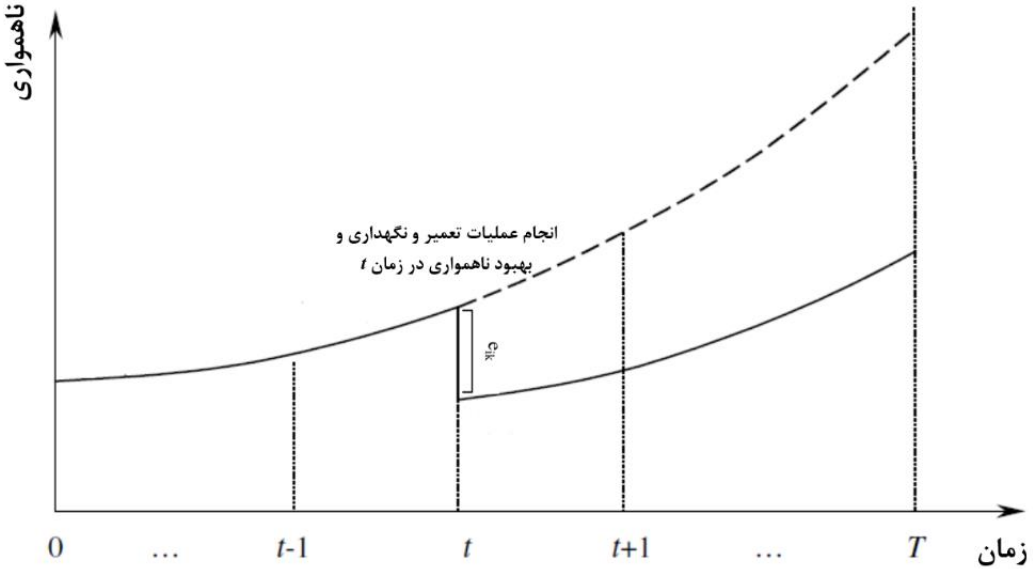
$$IR_{it^*} = IR_{it^0} \exp\left(\beta(t^* - t^0)\right) \qquad (۱)$$

از مدل منحنی روند در پژوهش های گوناگونی در زمینه مدیریت عملیات نت روسازی در سطوح پروژه و شبکه استفاده شده است [۲۹-۲۶]. شایان ذکر است در مدل های بهینه سازی این پژوهش که در ادامه معرفی می شوند، می توان مدل های زوال مختلفی با توجه به شاخص مورد استفاده، در نظر گرفت و مدل زوال منحنی روند به جهت استفاده از شاخص بین المللی ناهمواری به کار گرفته شده است.

۱- ۲- برنامه‌ریزی عملیات نت در حالت قطعی

در این بخش، مسئله برنامه‌ریزی عملیات نت بدون لحاظ کردن مصرف انرژی مدل شده است. در این مدل، مسئله با یک تابع هدف که رسیدن وضعیت قطعات شبکه در پایان دوره برنامه‌ریزی ۵ ساله به یک وضعیت

1 International Roughness Index
2 Trend Curve



شکل ۱. زوال ناهمواری و تأثیر عملیات نت در زمان t [۲۶]

Fig. 1. Roughness deterioration and the effect of Pavement M&R treatments in time t [26]

ایده‌آل پیش فرض می‌باشد، در نظر گرفته شده است. یک شبکه روسازی با یک مجموعه $\mathrm{I}=\{1,2,3,\ldots,\mathrm{I}\}$ قطعه در نظر گرفته شده است. مجموعه عملیات نت به صورت مجموعه $\mathrm{K}=\{1,2,3,\ldots,\mathrm{K}\}$ که عملیات k ام دارای بیش‌ترین تأثیر و در عین حال بیش‌ترین هزینه می باشد. دوره زمانی برنامه‌ریزی به صورت مجموعه $\mathrm{T}=\{1,2,3,\ldots,\mathrm{T}\}$، یک دوره زمانی گسسته لحاظ می شود. در هر بازه زمانی، قطعات شبکه به دلایل مختلف من‌جمله حجم ترافیک عبوری، شرایط آب و هوایی و بالا رفتن سن روسازی دچار زوال می شوند. مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی تک هدفه به صورت معادلات (۲) تا (۱۰) می باشد.

$$Minimize \sum_{i=1}^{I}\left(\left|IR_{iT}-IR_i^*\right|\right)^s \qquad s\in\{1,2,3,4\} \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}A_iC_{ikt}x_{ikt}\le B_t \qquad \forall t\in T \qquad (۳)$$

$$IR_{it}=IR_{i0}\exp(\beta t)+\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{K-1}x_{ikt}e_{ik}\exp\left(\beta(t-j)\right) \quad \forall i\in I \qquad (۴)$$

$$IR_{it}\ge IR_{min} \qquad \forall t\in T \qquad (۵)$$

$$IR_{it}\le IR_{max} \qquad \forall t\in T \qquad (۶)$$

$$\overline{IR_t}=\frac{\sum_{i=1}^{I}IR_{it}A_i}{\sum_{i=1}^{I}A_i} \qquad \forall t\in T \qquad (۷)$$

$$\overline{IR_t}\le IR_t^{network} \qquad \forall t\in T \qquad (۸)$$

$$\sum_{k=1}^{K}X_{ikt}=1 \qquad \forall i\in I,\forall t\in T \qquad (۹)$$

$$X_{ikt}\in\{0,1\}\ ,IR_{it}\ge 0 \qquad (۱۰)$$

که در این معادله ها IR_{i0} ناهمواری اولیه قطعه i، IR_{it} ناهمواری قطعه i در زمان ، IR_{min} ناهمواری مجاز حداقل برای هر قطعه شبکه در هر مقطع زمانی، IR_{max} ناهمواری مجاز حداکثر برای هر قطعه شبکه در هر مقطع زمانی، IR^*_i ناهمواری ایده آل مدنظر در سال پایانی دوره برنامه ریزی، $\overline{IR_t}$ ناهمواری متوسط تمامی قطعات شبکه در سال t، $IR_t^{network}$ حداقل ناهمواری متوسط مورد نیاز قطعات شبکه در سال t، مساحت قطعه i، نرخ زوال قطعه i در مدل منحنی روند، بودجه موجود برای مدیریت عملیات نت در سال ، C_{ikt} هزینه واحد انجام عملیات نت نوع به قطعه i در سال t و e_{ik} میزان بهبود ناهمواری قطعه i به دلیل انجام عملیات نت نوع k می باشند. معادله (۲) تابع هدف مدل در حالت تک هدفه را بیان می‌کند به طوری که فاصله وضعیت قطعات روسازی در مقطع زمانی پایانی برنامه‌ریزی را از وضعیت ایده آل از پیش تعیین شده مینیمم باشد. s نشان دهنده توان تابع هدف تعریف شده بوده و به کمک تحلیل حساسیت مقدار بهینه آن مشخص می‌شود. محدودیت بودجه در معادله (۳) در نظر گرفته شده است که در هر مقطع زمانی، مجموع هزینه های عملیات نت باید از بودجه موجود کمتر باشد. وضعیت هر قطعه در زمان t(۴) نشان داده شده است. عبارت اول سمت راست تساوی با در نظر گرفتن مدل عملکردی و نرخ زوال و عبارت دوم با در نظر گرفتن میزان بهبود ناهمواری هر یک از عملیات انجام گرفته تا زمان t، وضعیت قطعه در هر مقطع زمانی را محاسبه می‌کنند. مینیمم و ماکزیمم ناهمواری ممکن و مجاز به جهت در نظر گرفتن سیاست های تصمیم‌گیران و منطقی بودن پاسخ‌ها برای هر یک از قطعات روسازی در هر مقطع زمانی توسط معادله‌های (۵) و (۶) تعیین می شوند. میانگین وزنی وضعیت قطعات شبکه بر اساس مساحت آن‌ها در محدودیت (۷) محاسبه و در محدودیت (۸) ماکزیمم مجاز ناهمواری برای میانگین شبکه تعیین می‌شود. انتخاب تنها یک عملیات در یک مقطع زمانی برای هر قطعه شبکه برای درست بودن جواب مدل بهینه سازی در معادله (۹) رعایت شده است. محدودیت (۱۰) بیان می کند که وضعیت قطعات در طول دوره برنامه‌ریزی نامنفی و متغیر تصمیم X_{ikt} یک متغیر دودویی است به گونه ای که اگر یک عملیات نت برای یک قطعه روسازی در یک مقطع زمانی انتخاب شود، این متغیر تصمیم برابر ۱ است و در غیر این صورت برابر صفر می باشد.

۱- ۳- مدل برنامه‌ریزی عملیات نت در حالت در نظر گرفتن مصرف انرژی

در این بخش مسئله برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی با در نظر گرفتن مصرف انرژی هر یک از عملیات نت و بهینه کردن آن مدل شده است. لذا مسئله به صورت یک مدل با ۲ تابع هدف فرموله شده است. با توجه به این که محدودیت های این مدل نیز به مانند محدودیت‌های (۳) تا (۱۰) مدل پیشین می باشند، بنابراین به جهت پرهیز از تکرار مطالب تنها توابع هدف مدل جدید در قالب دو معادله (۱۱) و (۱۲) در ادامه معرفی می شوند.

$$Minimize \sum_{i=1}^{I} \left(\left| IR_{iT} - IR_i^* \right| \right)^s \qquad s \in \{1,2,3,4\} \qquad (۱۱)$$

$$Minimize \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{K} \sum_{t=1}^{T} A_i EN_{ikt} x_{ikt} \qquad (۱۲)$$

که در آن EN_{ikt} میزان انرژی صرف شده واحد انجام عملیات نت نوع k به قطعه i در سال t از ابتدا تا انتها یعنی از مرحله ساخت تا مرحله اجرا می باشد. تابع هدف معادله (۱۱) مشابه معادله (۲) بوده و سعی می‌کند فاصله وضعیت قطعات شبکه در پایان دوره برنامه‌ریزی از یک وضعیت ایده‌آل پیش فرض مینیمم باشد. در معادله (۱۲) مینیمم کردن میزان مصرف انرژی عملیات نت در طول دوره برنامه‌ریزی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. در ادامه الگوریتم حل مسئله معرفی می‌شود.

۵- الگوریتم حل مسئله

الگوریتم رقابت لیگ فوتبال یک الگوریتم جدید فرا ابتکاری است که اخیرا برای اولین بار برای یافتن طراحی بهینه سیستم‌های توزیع آب مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹]. ایده اصلی این الگوریتم از لیگ‌های حرفه‌ای فوتبال الهام گرفته و فرآیند جستجو بر اساس مسابقات بین تیم‌ها و بازیکنان استوار است. جمعیت به دو سطح تقسیم می‌شود: ۱-تیم و ۲-بازیکن که هر کدام از آن‌ها به پیدا کردن بهینه جهانی[1] به طور موثر کمک می‌کنند. در لیگ فوتبال در شرایط واقعی، در طول یک فصل که معمولا از اواسط تابستان تا اواسط بهار به طول می‌انجامد، هر تیم با تیم‌های دیگر دو بار، یک بار در خانه و یک بار خارج از خانه، بازی می‌کند [۱۹]. تیم‌ها ۳ امتیاز برای هر برد، ۱ امتیاز برای تساوی و بدون امتیاز برای باخت کسب می‌کنند. تیم‌ها با امتیازات کل کسب شده در تمام بازی‌ها در رده‌بندی قرار می‌گیرند. در الگوریتم رقابت لیگ فوتبال، هر بازیکن یک بردار راه حل است و در طول

1 Global Optimum

یک فصل، هر تیم یک بار با تیم‌های دیگر بازی می‌کند و تیم‌ها با به روز رسانی بازیکنان خود امتیاز کسب می‌کنند. بازیکنانی که قدرتمندتر هستند تیم قدرتمندتری را تشکیل می‌دهند که در رده‌های برتر جدول لیگ قرار می‌گیرند. علاوه بر این، تیم‌های قدرتمند شانس بالاتری برای پیروزی در مسابقات خود دارند. با این وجود پیش بینی برنده دقیق یک مسابقه مشخص، قبل از پایان بازی ممکن نیست. همچنین علاوه بر مسابقات لیگ بین تیم‌ها، در هر تیم یک رقابت داخلی برگزار می‌شود. بازیکنان برای جلب توجه مربیان با بهبود عملکردشان با یکدیگر به رقابت می‌پردازند. این رقابت داخلی منجر به رشد کیفیت و قدرت یک تیم می‌شود. در هر تیم یک بازیکن کلیدی وجود دارد که به آن بازیکن ستاره[1] گفته می‌شود. بازیکن ستاره بهترین عملکرد را در بین سایر بازیکنان تیم دارد. علاوه بر این، در هر لیگ یک بازیکن منحصر به فرد وجود دارد که به آن بازیکن فوق ستاره[2] گفته می‌شود. بازیکن فوق ستاره به عنوان قدرتمندترین بازیکن لیگ تعریف شده است [۳۱]. به عنوان مثال، در لیگ باشگاهی اسپانیا (لالیگا) لیونل مسی بازیکن فوق ستاره لیگ و همچنین بازیکن ستاره بارسلونا است. بعد از هر مسابقه، بازیکنان تیم برنده استراتژی‌های مختلفی را برای بهبود عملکرد آینده خود اتخاذ می‌کنند. وقتی تیمی در یک مسابقه برنده شود، بازیکنان آن سعی می‌کنند از وضعیت بازیکن ستاره تیم و بازیکن فوق ستاره لیگ استفاده و پیروی کنند. اپراتورهای تقلید[3] و تحریک[4] در الگوریتم رقابت لیگ فوتبال این استراتژی را شبیه سازی می‌کنند. اپراتور تقلید بازیکنان جدیدی ایجاد می‌کند که تحت تأثیر بازیکنان ستاره و فوق ستاره قرار دارند و حرکت و تغییر آن‌ها به سمت وضعیت این بازیکنان است. اپراتور تحریک بهترین مسیر ممکن برای بازیکنان جایگزین را می‌یابد و پیشنهاد می‌دهد [۳۱]. بر اساس موارد ذکر شده گام‌های الگوریتم رقابت لیگ فوتبال در شکل ۲ ارائه شده است.

یکی از مزیت‌های الگوریتم رقابت لیگ فوتبال استفاده از ترکیبی از فرآیندهای جستجو در مقیاس‌های بزرگ و کوچک به صورت توأمان است. در مقیاس بزرگ، فرایند جستجو بین تیم‌های لیگ انجام می‌شود در حالی که جستجوی مقیاس کوچک بین بازیکنان تیم‌ها صورت می‌پذیرد. در مقیاس بزرگ، هر تیم شامل بازیکنانی است که سعی در بهبود عملکرد خود دارند و این یعنی یافتن راه حل بهتر. در هر تیم بهترین بازیکنان، بازیکن ستاره نامیده می‌شوند در حالی که سایر بازیکنان تیم حرکات خود را با او تنظیم می‌کنند. فرآیند نسبتاً مشابهی در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات[5] وجود دارد، اما این الگوریتم از اپراتورهای مختلفی برای ارزیابی فضای جستجو استفاده می‌کند. از طرف دیگر، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات فقط یک جمعیت را در در نظر می‌گیرد در حالی که الگوریتم رقابت لیگ فوتبال از چندین جمعیت یا تیم در فرایند جستجو استفاده می‌کند. علاوه بر این، در الگوریتم رقابت لیگ فوتبال بهترین بازیکن لیگ یا بازیکن فوق ستاره را در نظر می‌گیرد، در حالی که همه بازیکنان باید از او الگو بگیرند. یکی دیگر از مزیت‌های این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری، استفاده از استراتژی‌های جستجوی مختلف است. در الگوریتم رقابت لیگ فوتبال به ترتیب از اپراتورهای تقلید و تحریک برای بازیکنان ثابت و جایگزین (دو نوع جمعیت) به جهت بهبود وضعیت آن‌ها استفاده می‌شود. در مجموع، این الگوریتم می‌تواند با استفاده از استراتژی‌ها و اپراتورهای مختلف، تقسیم فضای جستجو برای در سطح بزرگ و کوچک و همچنین تقسیم بازیکنان به ثابت و جایگزین، به سرعت فضای جستجو را بررسی کرده و بهینه جهانی را پیدا کند [۳۱].

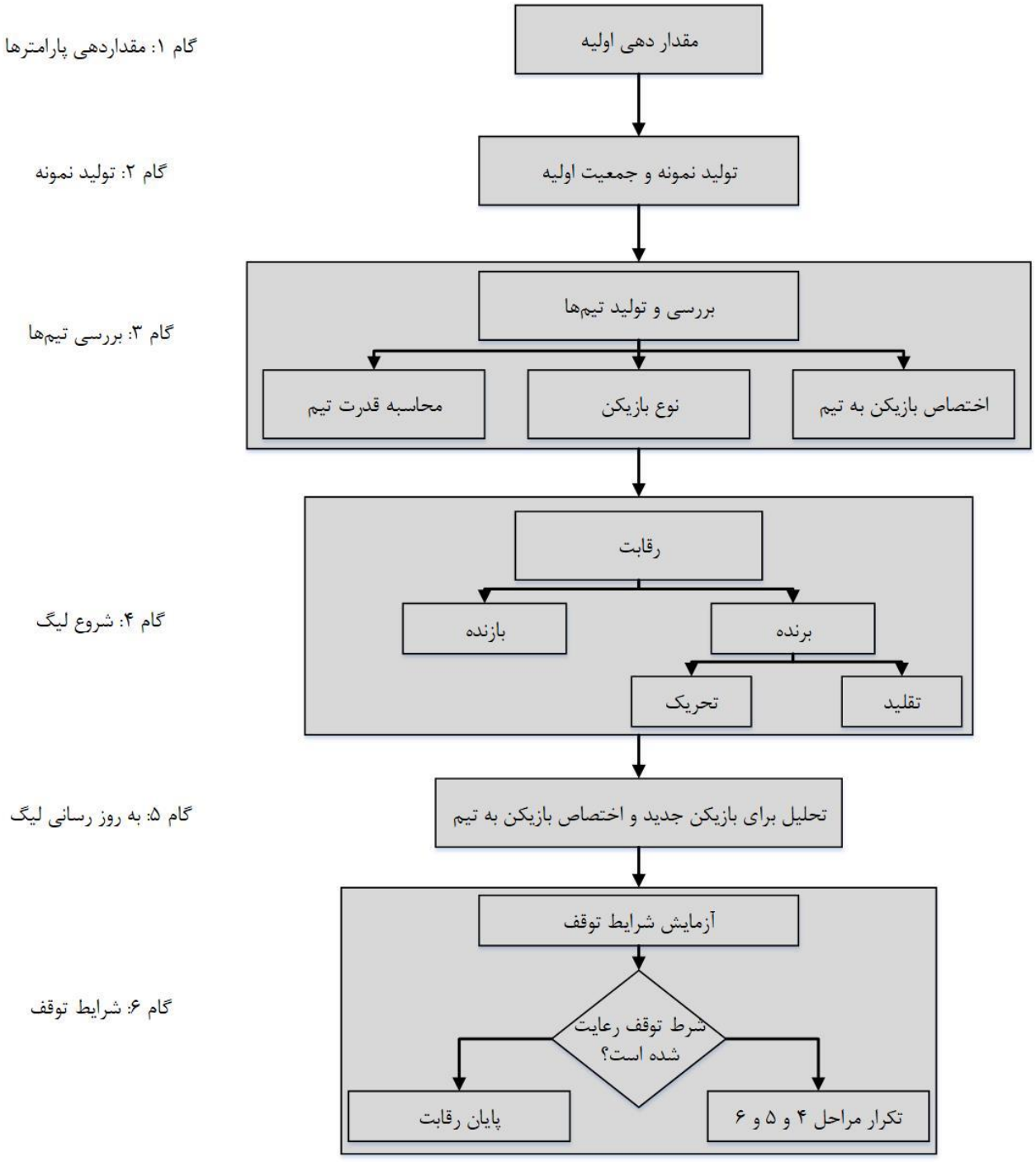
۶- نتایج شبکه نمونه موردی

نتایج حل دو مدل ارائه شده در این پژوهش توسط روش رقابت لیگ فوتبال برای یک شبکه واقعی بزرگ مقیاس در این بخش بررسی شده است. مدل‌سازی و حل مسائل توسط نرم افزار متلب[6] MATLAB و با استفاده از یک کامپیوتر لپتاپ دارای پردازشگر ۷ هسته ای ۲/۸ zHG و ۴BG حافظه RAM اجرا شده است. پیش از ارائه نتایج، شبکه نمونه موردی، مشخصات آن و همچنین مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای حل مدل های بهینه سازی معرفی شده است. سپس به نحوه کالیبراسیون الگوریتم رقابت لیگ فوتبال در این پژوهش پرداخته می‌شود. پس از آن نتایج هر دو مدل به صورت همزمان ارائه و مقایسه می‌شوند.

۷- شبکه نمونه موردی و پارامترهای مدل

یک شبکه روسازی واقعی، با طول کل تقریبی ۲۵۱ کیلومتر و شامل ۸۴ قطعه روسازی آسفالتی از راه‌های برون شهری استان تهران به عنوان شبکه

1 Star Player [30] M.W. Sayers, T.D. Gillespie, W.D.O. Paterson, Sayers, M. W., Gillespie, T. D. and Paterson, W. D. O. (1986) Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements. Washington, D.C., U.S.A.: World Bank.Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements, (1986).
2 Super Star Player (SSP)
3 Provocation
4 Imitation
5 Particle Swarm Optimization (PSO)
6 Matrix Laboratory (MATLAB)



شکل ۲. گام‌های الگوریتم رقابت لیگ فوتبال

Fig. 2. The steps of soccer league competition algorithm

جدول ۱. مشخصات چند قطعه روسازی از شبکه مورد مطالعه به طور نمونه

Table 1. The specifications of some example pavement sections in the case study network

قطعه	طول قطعه (کیلومتر)	مساحت (متر مربع)	AADT (وسیله نقلیه بر روز)	شاخص ناهمواری (متر بر کیلومتر)
1	4.8	35194.7	20809	2.4
2	8.7	63662.8	20809	2.4
3	2.6	19810.1	20809	4.3
4	2.1	30239.7	20809	4.3
5	4.1	59276.0	20809	3.4
6	1.4	20625.6	20809	4.9
...	...	...	...	...
84	7.8	56405.0	9102	2.8
بیشینه	13.7	101551.9	24127	6.1
کمینه	1.0	7400.0	1050	1.9
میانگین	3.0	24731.2	15145.3	3.7

نمونه موردی این پژوهش به کار گرفته شده است. داده های قطعات این شبکه از پایگاه داده سازمان راهداری و حمل و نقل جادهای اخذ شده است [۱]. معیارهای قطعه بندی شامل سازه روسازی، ترافیک و وضعیت روسازی می‌باشند. به دلیل تعداد بالای قطعات بیان مشخصات تمامی قطعات امکان پذیر نبوده و در جدول ۱ مشخصات چند قطعه از شبکه مورد مطالعه به طور نمونه و به اختصار ارائه گردیده است.

به طور خلاصه میانگین کل طول قطعات برابر ۳ کیلومتر و بیش‌ترین و کم‌ترین طول یک قطعه در شبکه به ترتیب برابر ۱۳/۷ و ۱ کیلومتر می‌باشد. به علاوه میانگین وضعیت شاخص بین‌المللی ناهمواری به عنوان شاخص عملکردی در نظر گرفته شده در این پژوهش برای کل قطعات شبکه در سال صفر برابر ۳/۶۷ متر بر کیلومتر است. قطعاتی با میزان ناهمواری ۱/۹۳ و ۶/۱۲ متر بر کیلومتر به ترتیب بهترین و بدترین وضعیت ناهمواری در بین قطعات شبکه را دارا می‌باشند.

در مورد مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای حل مدل‌های بهینه سازی، میزان بودجه اختصاص داده شده به منظور نگهداری این شبکه روسازی برابر ۱۷ میلیارد تومان بوده و از پایگاه داده سازمان راهداری و حمل و نقل جادهای استخراج شده است [۱]. نرخ زوال در مدل منحنی عملکرد معادله (۱) در مطالعات لی و مدنت، اویانگ و مدنت و سیدالشهدایی و همکاران برابر ۰/۰۵ لحاظ شده است [۲۸-۲۶]. این عدد به کمک تحلیل بر روی داده های بانک جهانی استخراج شده است. در این مقاله نیز نرخ زوال در مدل منحنی روند برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.

سیاست‌ها و عملیات نت شبکه روسازی در ۵ گروه به ترتیب هزینه از کم به زیاد شامل بدون نیاز به عملیات، پیشگیرانه[1]، بهسازی سبک[2]، بهسازی متوسط[3] و بازسازی[4] تقسیم می‌شوند. بدون نیاز به عملیات به این معنی است که در آن مقطع زمانی هیچ عملیاتی صورت نمی‌پذیرد و روسازی روند طبیعی زوال خود را ادامه می‌دهد. عملیات نت در مورد گروه‌های دوم تا پنجم به طور خلاصه در ادامه ارائه می‌شوند. عملیات پیشگیرانه شامل چیپ سیل[5]، میکروسرفیسینگ[6] و اسلاری سیل[7]، بهسازی سبک شامل آماده

1 Preventive Maintenance
2 Light Rehabilitation
3 Medium Rehabilitation
4 Reconstruction
5 Chip Seal
6 Microsurfacing
7 Slurry Seal

سازی سطح و روکش یک لایهای با بتن آسفالتی گرم، بهسازی متوسط شامل آماده سازی و روکش بیش از یک لایه با بتن آسفالتی گرم، بازیافت سرد و روکش و بازسازی شامل برداشت لایه های آسفالتی، ترمیم اساس و اجرای لایه های آسفالتی می‌باشند. لازم به ذکر است با توجه به نوع تعریف مسئله و مدل بهینه سازی انجام گرفته در این پژوهش سطح مداخله عملیات نت در نظر گرفته شده از نوع برنامه‌ریزی شده[1] می‌باشد چرا که مدل بهینه سازی با توجه به تمامی محدودیت‌ها و منابع موجود بهترین زمان ممکن برای انجام عملیات را پیشنهاد می‌کند.

بهبود حاصل شده در وضعیت قطعات روسازی ناشی از اجرای هر یک از عملیات نت از پژوهش های لو و تولیور [۳۲] و پترسون [۳۳] استخراج شده و میزان آن برای گروه های اول تا پنجم عملیات نت به ترتیب برابر صفر، ۰/۳، ۱/۲، ۲ و ۳ متر بر کیلومتر می‌باشد. لازم به ذکر است مقادیر نرخ زوال و میزان بهبود عملیات نت مربوط به شرایط کشور نبوده و با توجه به فقدان اطلاعات در این زمینه سعی شده است از نزدیک‌ترین مدل‌ها به شرایط موجود استفاده شود.

هزینه اجرای هر یک از عملیات نگهداری به واحد مساحت روسازی از پایگاه داده سازمان راهداری و حمل و نقل جادهای استخراج شده است و میزان آن برای گروه اول تا پنجم به ترتیب مساوی صفر، ۵۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۳۲۰۰۰ و ۶۵۰۰۰ تومان بر متر مربع است. همچنین میزان انرژی مصرفی برای اجرای هر یک از گزینه‌های تعمیر و نگهداری از پژوهش‌های چِهوویتس [۳۴] و سرهآ [۳۵] استخراج شده است و میزان آن‌ها برای گروه اول تا پنجم به ترتیب برابر ۲۱/۵۶، ۷۷، ۱۴۲/۸ و ۱۹۸/۵ مگاژول بر متر مربع است. کم‌ترین و بیش‌ترین میزان شاخص بین المللی ناهمواری ممکن و مجاز برای وضعیت هر قطعه در هر سال، از طریق محدوده های تعریف شده توسط بانک جهانی برای راه های نو و کارکرده، در این پژوهش برابر ۱/۵ و ۴ متر بر کیلومتر در نظر گرفته شده است [۳۰]. همچنین ناهمواری ایده آل مدنظر در سازمان راهداری و حمل و نقل جادهای ایران در سال پایانی دوره برنامه ریزی برابر ۲/۲ متر بر کیلومتر لحاظ شده است. در نهایت یک دوره برنامه‌ریزی پنج ساله که در هر سال، تنها یک عملیات نت برای هر قطعه انتخاب می شود، به عنوان دوره برنامه‌ریزی این پژوهش در نظر گرفته شده است.

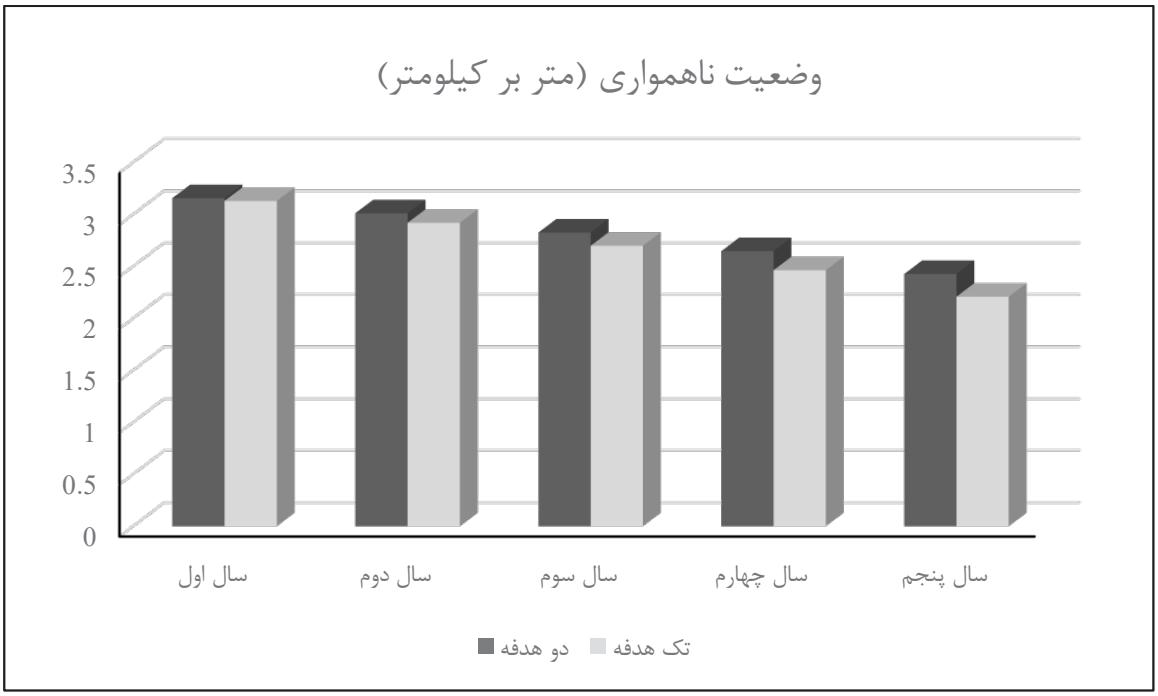
۸- کالیبراسیون الگوریتم

ین الگوریتم تعدادی پارامتر شامل تعداد تیم‌های لیگ، تعداد تیم‌هایی که به دسته پایین‌تر سقوط می‌کنند، تعداد بازیکنان ثابت و ذخیره هر تیم را دارا می‌باشد که در ابتدا برای هر یک از این ۴ پارامتر یک مجموعه، به طور مثال برای تعداد تیم‌ها مجموعه ۵ عضوی {۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸} و به همین ترتیب برای سایر پارامترها مجموعه‌ای حاوی مقادیر تقریبی مناسب آن پارامتر در الگوریتم که در مراجع مختلف پیشنهاد شده است، در نظر گرفته می‌شود. سپس در مرحله اول مقدار ۳ پارامتر را برابر میانگین مقادیر آن‌ها قرار داده می‌شود و مقدار پارامتر چهارم، به طور مثال تعداد تیم‌ها، بین مجموعه مقادیر آن در تکرارهای مختلف تغییر داده می‌شود تا میزان بهینه آن پارامتر به‌دست آید. پس از آن مقدار بهینه تعداد تیم‌ها ثابت در نظر گرفته شده و پارامتر بعدی تغییر داده می‌شود تا میزان بهینه آن مشخص شود. این روند تا کالیبراسیون تمامی پارامترهای الگوریتم ادامه می‌یابد. بر اساس روندی که توضیح داده شد، مقدار بهینه پارامترهای تعداد تیم‌های لیگ، تعداد تیم‌هایی که به دسته پایین‌تر سقوط می‌کنند، تعداد بازیکنان ثابت و ذخیره هر تیم به ترتیب برابر ۱۰، ۲، ۵ و ۲ حاصل شد. همچنین تعداد لیگ‌های برگزار شده (تعداد تکرار الگوریتم) نیز به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد پس از تکرار ۱۰۰۰ پیشرفت چندانی در جواب‌های الگوریتم به‌دست نیامده و تنها زمان حل آن افزایش می‌یابد. لذا تعداد تکرارها برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد.

۹- تحلیل و مقایسه نتایج

حل مدل‌های معرفی شده توسط الگوریتم رقابت لیگ فوتبال و با مقادیر کالیبراسیون پارامترهایی که به آن‌ها اشاره شد انجام شده است. در مورد حل الگوریتم دو هدفه، معمولا پیچیدگی حل این گونه مدل‌ها بالا می‌باشد. یکی از راه‌های حل آن‌ها، تبدیل این مدل‌ها به مدل‌های تک هدفه از طریق روش مجموع وزنی است. در این روش ضرایب وزنی بر پایه اهمیت توابع هدف مختلف نسبت به یکدیگر به آن‌ها اختصاص داده شده و مسئله به یک مدل با یک تابع هدف تبدیل شده و حل می‌شود. اصلی‌ترین نکته در این روش انتخاب میزان وزن هر یک از توابع هدف می‌باشد [۳۶]. در این پژوهش از این روش برای حل مسئله دو هدفه استفاده شده و با توجه به اهمیت و اولویت برابر هر یک از توابع هدف یعنی بهینه سازی وضعیت شبکه در مقابل بهینه سازی انرژی مصرفی اوزان هر دو تابع هدف مساوی ۰/۵ لحاظ شده است. همچنین لازم به ذکر است برای حل مدل‌ها تمامی محدودیت‌های

1 Scheduled



شکل ۳. میانگین شاخص بین المللی ناهمواری قطعات شبکه در طول دوره برنامه ریزی

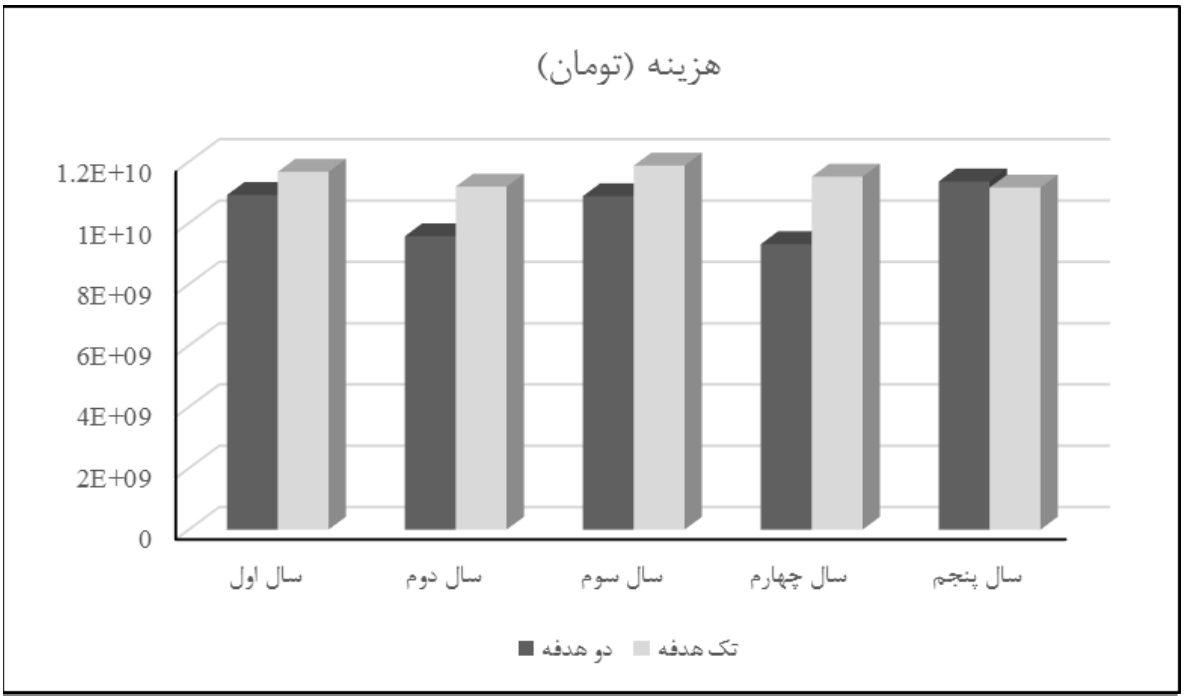
Fig. 3. The average IRI of the network sections during the planning period

معرفی شده در مسائل تک هدفه و دو هدفه به صورت توابع جریمه[1] در تابع هدف در نظر گرفته شده‌اند.

در مورد تحلیل حساسیت توان تابع هدف اول یعنی پارامتر S ، برای هر یک از مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۴ مدل مسئله ۱۰ مرتبه حل شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد مقادیر میانگین وضعیت قطعات شبکه برای مقدار ۲ یعنی تابع درجه دوم به کم‌ترین میزان در مقایسه با سایر مقادیر رسیده و لذا پارامتر S برابر ۲ قرار داده شد.

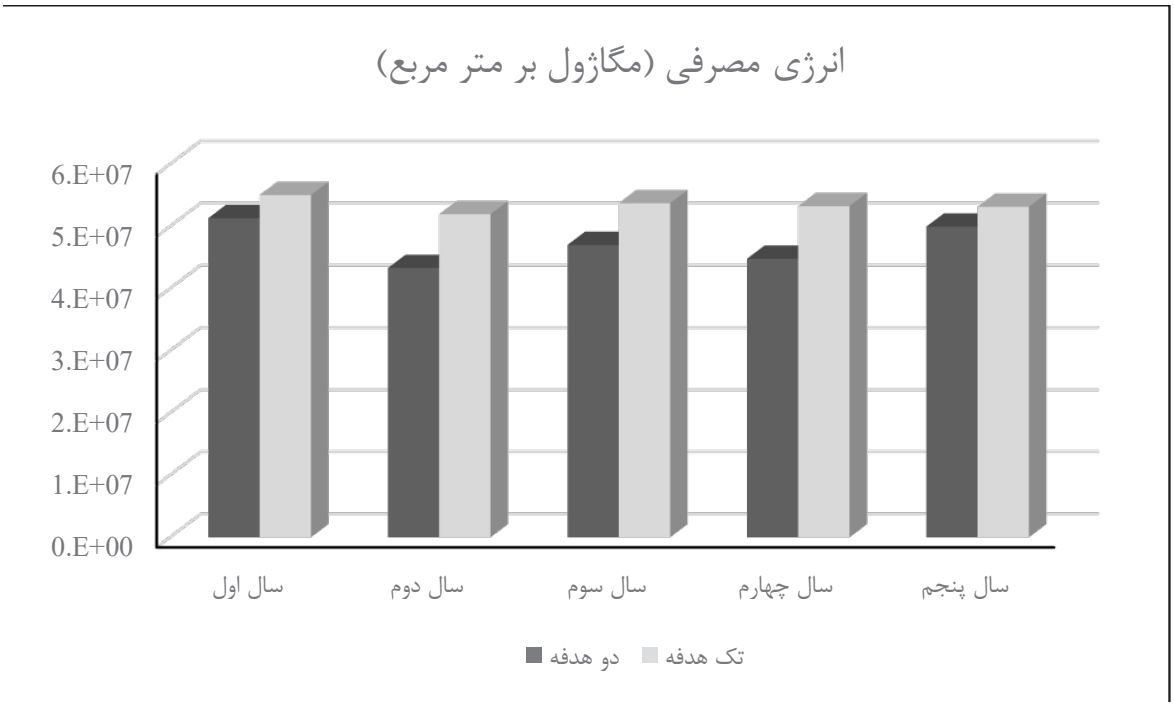
مقدار تابع هدف جواب بهینه مدل تک هدفه برابر ۱/۹۸۲ می‌باشد که نشان دهنده این موضوع است که جواب بهینه به‌دست آمده به هدف تعریف شده یعنی فاصله کم وضعیت قطعات در سال پایانی از مقدار ایده آل ناهمواری را به خوبی دست پیدا می‌کند و عملکرد مناسب الگوریتم رقابت لیگ فوتبال را برای این مسئله نمایان می‌کند. مقدار تابع هدف مدل دو هدفه برای تابع هدف اول برابر ۵/۰۵ و برای تابع هدف دوم یعنی میزان مصرف انرژی برابر $۲/۳۶\times۱۰^{۸}$ مگاژول بر متر مربع است در حالی که میزان مصرف انرژی برای جواب بهینه مدل تک هدفه $۲/۶۷\times۱۰۸$ مگاژول بر متر مربع می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهد در جواب بهینه مدل دوم وضعیت قطعات از مقدار ایده آل نسبت به مدل اول اندکی فاصله گرفته و بدتر شده لیکن در عین حال حدود ۱۳٪ کاهش مصرف انرژی نسبت به جواب مدل اول حاصل شده است. میانگین وضعیت قطعات بر اساس شاخص بین المللی ناهمواری، میزان هزینه مورد نیاز و میزان انرژی مصرفی در طول ۵ سال دوره برنامه‌ریزی شبکه نمونه موردی برای مدل‌های تک هدفه و دو هدفه در شکل ۳ تا شکل ۵ ارائه شده است. در شکل ۳ جواب بهینه میانگین وضعیت ناهمواری قطعات در طول سال‌های برنامه‌ریزی در هر دو مدل روند کاهشی داشته لیکن در مدل تک هدفه با توجه به این که مدل تنها به دنبال بهینه کردن وضعیت قطعات است عملکرد بهتری مشاهده می‌شود و به طور مثال در سال آخر مدل تک هدفه ۹٪ عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد. هزینه مورد نیاز برای اجرای هر یک از جواب‌های بهینه مدل‌های ارائه شده در طول دوره برنامه‌ریزی در شکل ۴ ارائه شده است. میزان هزینه کل جواب مدل‌های تک هدفه و دو هدفه به ترتیب برابر ۵۷/۴ و ۵۲ میلیارد تومان می‌باشد که این نکته را نشان می‌دهد که در پی کاهش میزان مصرف انرژی در مدل دوم، میزان هزینه مورد نیاز نیز با توجه به

1 Penalty Functions



شکل ۴. هزینه مورد نیاز اجرای عملیات منتخب در طول دوره برنامه ریزی

Fig. 4. The costs of selected M&R treatments during the planning period



شکل ۵. میزان انرژی مصرفی عملیات منتخب در طول دوره برنامه ریزی

Fig. 5. The energy consumption of single-objective and two-objective models during the planning period

جدول ۲. تعداد هر یک از عملیات نت در طول دوره برنامه‌ریزی برای مدل تک هدفه

Table 2. The number of each treatment assigned to the network sections over the planning horizon regarding single-objective model

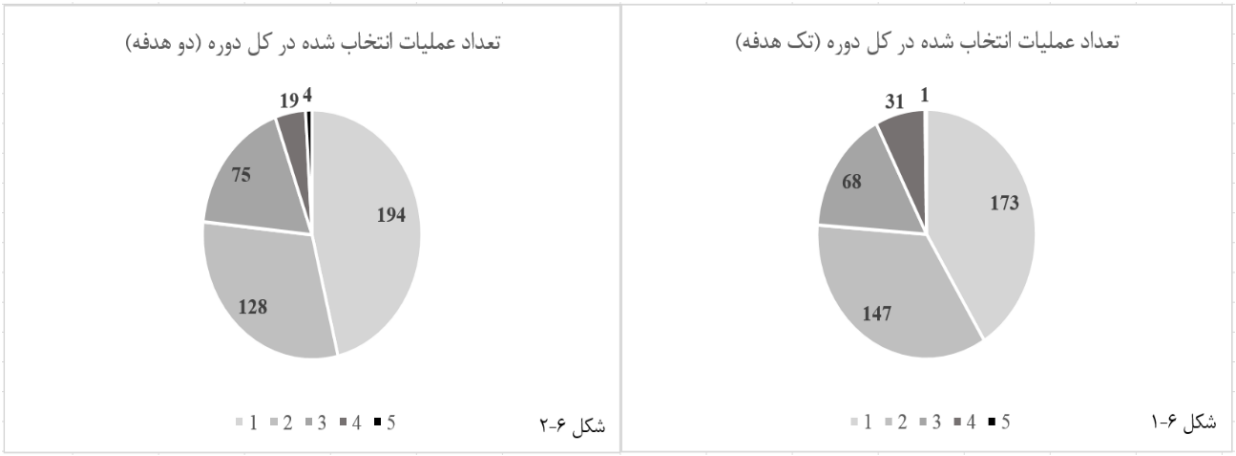
نوع عملیات	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
۱	۳۶	۳۱	۳۴	۳۷	۳۵
۲	۲۷	۲۹	۳۱	۳۲	۲۸
۳	۱۳	۱۹	۹	۱۰	۱۷
۴	۸	۴	۱۰	۵	۴
۵	۰	۱	۰	۰	۰

جدول ۳.تعداد هر یک از عملیات نت در طول دوره برنامه‌ریزی برای مدل دو هدفه

Table 3. The number of each treatment assigned to the network sections over the planning horizon regarding two-objective model

نوع عملیات	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
۱	۳۶	۴۱	۳۸	۴۱	۳۸
۲	۲۵	۲۴	۲۷	۲۶	۲۶
۳	۱۷	۱۳	۱۷	۱۶	۱۲
۴	۶	۵	۱	۱	۶
۵	۰	۱	۱	۰	۲

عملیات انتخاب شده حدود ۹٪ کاهش داشته است. دلیل این موضوع در ادامه و در بررسی نوع عملیات انتخابی در هر مدل بیشتر روشن خواهد شد. در شکل ۵ میزان انرژی مصرفی عملیات منتخب در طول دوره برنامه‌ریزی آورده شده است. با توجه به تابع هدف اضافه شده در مدل دوم مبنی بر بهینه سازی مصرف انرژی، مجموع انرژی مصرفی در کل دوره در جواب دو هدفه همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، ۱۳٪ کاهش نسبت به جواب تک هدفه تجربه کرده است. این موضوع می‌تواند اثرات زیست محیطی بسیار مفیدی داشته و مقدمه‌ای بر تحلیل‌های بیشتر در جهت بهینه سازی مصرف انرژی و همچنین کاهش میزان سایر آلاینده‌ها و در نظر گرفتن دغدغه‌های زیست محیطی باشد. تعداد هر یک از عملیات نت انتخاب شده در طول دوره برنامه‌ریزی ۵ ساله برای مدل‌های تک هدفه و دو هدفه به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ ارائه شده است. به علاوه شکل ۶ در واقع جمع بندی نتایج این دو جدول برای کل دوره برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. چِهوویتس و گلهوس [۳۴] با تقسیم میزان مصرف انرژی حاصل از هر یک از عملیات های تعمیر



شکل ۶. تعداد هر یک از عملیات نت در کل دوره برنامه‌ریزی برای مدل‌های تک هدفه و دو هدفه

Fig. 6. The number of each treatment over the planning horizon for single-objective and two-objective results

و نگهداری به میزان افزایش عمر ناشی از اجرای عملیات های مذکور، میزان مصرف انرژی سالیانه هر یک از عملیات های تعمیر و نگهداری را محاسبه کردند. بر اساس نتایج حاصله، بیش‌ترین نرخ مصرف انرژی سالیانه مرتبط به عملیات های بهسازی متوسط و بازسازی می‌باشد. همچنین، نرخ مصرف انرژی سالیانه عملیات بهسازی سبک از نرخ مصرف انرژی سالیانه مرتبط به عملیات های بهسازی متوسط و بازسازی به مراتب کمتر می‌باشد. به علاوه، کم‌ترین میزان نرخ مصرف انرژی سالیانه متعلق به عملیات ۱ (بدون نیاز به عملیات) می‌باشد زیرا در صورت عدم انجام عملیات میزان مصرف انرژی متناظر صفر می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۶، مجموع عملیات بهسازی متوسط و بازسازی انتخاب شده در بهینه سازی تک هدفه ۳۹٪ بیشتر از تعداد این عملیات‌ها در بهینه سازی دو هدفه می‌باشد. اگرچه، عملیات بهسازی سبک انتخاب شده در بهینه سازی دوهدفه ۱۰٪ بیشتر از تعداد عملیات بهسازی سبک انتخاب شده در بهینه سازی تک هدفه می‌باشد. در مدل تک هدفه ۱۷۳ انتخاب گزینه بدون انجام عملیات از میان ۴۲۰ حالت ممکن صورت گرفته در حالی که در مدل دو هدفه گزینه بدون انجام عملیات ۱۹۴ مرتبه یعنی ۲۱ بار بیشتر انتخاب شده است. این بدین معنی است که مدل دو هدفه سعی دارد با کم کردن تعداد کل عملیات منتخب، مصرف انرژی را در شبکه کاهش دهد و به تبع این انتخاب، هزینه کل مورد نیاز نیز در مدل دو هدفه کاهش داشته است. از این رو، نتایج حاصله از این پژوهش همراستا با یافته‌های سایر محققین می‌باشد [۳۵ و ۳۴].

۱۰- نتیجه گیری

برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی در سطح شبکه معمولا شامل تصمیم گیری در مورد این سوال می‌شود که کدام عملیات، در کدام مقطع روسازی و چه زمانی انجام گیرد تا اهداف مورد نظر مسئله تأمین شود. پیچیدگی محاسباتی این مسئله که به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مدل می‌شود، با بزرگ شدن ابعاد و تعداد مقاطع شبکه از نوع نمایی است. روش های مختلف بهینه سازی از طریق بررسی زوال روسازی، ارزیابی هزینه عملیات مختلف و بر مبنای بهینه سازی سیاست تصمیم‌گیران، بهترین برنامه نگهداری را انتخاب می کنند. علاوه بر این، پیامدهای مخرب اقدامات مختلف صنایع حمل و نقل و روسازی بر محیط زیست قابل توجه بوده و به خصوص در پژوهش‌های اخیر به لزوم در نظر گرفتن آن در مدل برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی اشاره شده است. در این مقاله، دو مدل تک هدفه و دو هدفه برای حل مسئله برنامه‌ریزی عملیات نت در سطح شبکه‌های واقعی ارائه شده است. در مدل تک هدفه تابع هدف مسئله، بهینه سازی فاصله وضعیت قطعات روسازی در مقطع زمانی پایانی برنامه‌ریزی از وضعیت ایده آل از پیش تعیین شده است. در مدل دو هدفه علاوه بر تابع هدف ذکر شده، مینیمم سازی کل مصرف انرژی عملیات نت در طول دوره برنامه‌ریزی که یکی از پارامترهای مهم و اساسی دغدغه‌های زیست محیطی می‌باشد، به عنوان هدف دوم مدل لحاظ شده است. الگوریتم بهینه سازی فرا ابتکاری

رقابت لیگ فوتبال به عنوان یک الگوریتم جدید برای حل این مدل‌ها به کار گرفته شده است. الگوریتم رقابت لیگ فوتبال به روش جستجوی جمعیتی است که از فرآیند موجود در مسابقات لیگ حرفه‌ای فوتبال و رقابت بین تیم‌ها و بازیکنان استخراج شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد این الگوریتم به خوبی توانایی حل مسئله برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی در سطح شبکه‌های بزرگ و واقعی را داراست و به جواب بهینه نزدیک می‌شود. مقایسه نتایج مدل تک هدفه و دو هدفه نشان داد با توجه به اضافه شدن تابع هدف بهینه سازی مصرف انرژی در مدل دو هدفه میانگین وضعیت شاخص بین المللی ناهمواری قطعات در طول سال‌های مختلف اندکی بدتر شده و بالاتر رفته است و به طور مثال در سال آخر مدل تک هدفه ۹٪ عملکرد مناسب‌تری از این لحاظ دارد. در مقابل، در جواب بهینه مدل دو هدفه میزان مصرف انرژی و همچنین میزان هزینه عملیات نت در طول دوره برنامه‌ریزی به ترتیب با ۱۳٪ و ۹٪ کاهش مواجه شده است. دلیل پایین آمدن هزینه عملیات در کنار مصرف انرژی در مدل دوهدفه از این نکته نشأت می‌گیرد که مدل دو هدفه سعی دارد با انتخاب تعداد کل عملیات نت کمتر مصرف انرژی را به مقدار بهینه برساند و به تبع این تصمیم میزان کل هزینه‌ها نیز کاهش می‌یابد به طوری که در مدل‌های تک هدفه و دو هدفه گزینه بدون انجام عملیات به ترتیب ۱۷۳ و ۱۹۴ مرتبه از ۴۲۰ حالت ممکن انتخاب شده است و این امر نشان دهنده کاهش قابل توجه تعداد کل عملیات نت در طول دوره برنامه‌ریزی می‌باشد. این مقاله تنها مصرف انرژی در مسئله برنامه‌ریزی عملیات نت را مورد کنکاش قرار می‌دهد در حالی در نظر گرفتن سایر پارامترهای زیست محیطی نظیر میزان آلایندگی و انتشار کربن و همچنین ارزیابی میزان تأثیر آن‌ها بر روی برنامه نگهداری روسازی نیازمند پژوهش‌های بیشتر در آینده هستند. همچنین بررسی سایر الگوریتم‌های دقیق و فرا ابتکاری جدید برای حل مسئله بزرگ مقیاس برنامه‌ریزی عملیات نت و مقایسه کارایی آن‌ها به عنوان موضوع پژوهش‌های آینده می‌تواند بسیار مفید باشد.

منابع

[1] ORM (Office of Road Maintenace), Iran's Road Maintenance and Transportation Organization (RMTO), Tehran, Iran (In Persian). in, 2019.

[2] M.Y. Shahin, Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots, (2005).

[3] F. Wang, Z. Zhang, R. Machemehl, Decision-Making Problem for Managing Pavement Maintenance and Rehabilitation Projects, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1853 (2003) 21-28.

[4] R. Mallick, V. Amirthalingam, Sustainable pavements in India-the time to start is now, New Build. Mater. Constr. World Mag, 16 (2010) 128-140.

[5] L. Gao, Z. Zhang, An Approximation Approach to Large-Scale Pavement Maintenance and Rehabilitation Problem, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2304 (2012) 1-14.

[6] D.-S. Chen, Y. Dang, R.G. Batson, Applied integer programming : modeling and solution, in, Wiley, Hoboken, N.J., 2010.

[7] N. Karabakal, J.C. Bean, J.R. Lohmann, Scheduling pavement maintenance with deterministic deterioration and budget constraints, in, 1994.

[8] G. Dahl, H. Minken, Methods based on discrete optimization for finding road network rehabilitation strategies, Computers & Operations Research, 35 (2008) 2193-2208.

[9] X.-S. Yang, Review of meta-heuristics and Yang, X.-S. (2011) Review of meta-heuristics and generalised evolutionary walk algorithm, IJBIC. doi: 10.1504/IJBIC.2011.039907.generalised evolutionary walk algorithm, IJBIC, 3 (2011) 77-84.

[10] N.R. Tayebi, F. Moghadas Nejad, M. Mola, A Comparison between GA and PSO in Analyzing Pavement Management Activities, Journal of Transportation Engineering, 140 (2013) 130613024931003.

[11] W.T. Chan, T.F. Fwa, C.Y. Tan, Road-maintenance planning using genetic algorithms. I: Formulation, Journal of Transportation Engineering, 120 (1994) 693-709.

[12] T.F. Fwa, W.T. Chan, C.Y. Tan, Genetic-algorithm programming of road maintenance and rehabilitation, Journal of Transportation Engineering, 122 (1996) 246-253.

[13] C. Pilson, W.R. Hudson, V. Anderson, Multiobjective optimization in pavement management by using genetic

algorithms and efficient surfaces, Transportation Research Record, 100 (1998) 42-48.

[14] A. Ferreira, A. Antunes, L. Picado-Santos, Probabilistic segment-linked pavement management optimization model, Journal of Transportation Engineering, 128 (2002) 568-577.

[15] S. Meneses, A. Ferreira, Pavement maintenance programming considering two objectives: maintenance costs and user costs, International Journal of Pavement Engineering, 14 (2012) 206-221.

[16] B.S. Mathew, K.P. Isaac, Optimisation of maintenance strategy for rural road network using genetic algorithm, International Journal of Pavement Engineering, 15 (2014) 352-360.

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

[18] A. Gerami Matin, R. Vatani 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), 4 (2017) 477-486.

[19] N. Moosavian, B. Kasaee Roodsari, Soccer league competition algorithm: A novel meta-heuristic algorithm for optimal design of water distribution networks, Swarm and Evolutionary Computation, 17 (2014) 14-24.

[20] S. Chan, B. Lane, T. Kazmierowski, W. Lee, Pavement Preservation: A Solution for Sustainability, Transportation Research Record, 2235 (2011) 36-42.

[21] C. Robinette, J. Epps, Energy, Emissions, Material Conservation, and Prices Associated with Construction, Rehabilitation, and Material Alternatives for Flexible Pavement, Transportation Research Record, 2179 (2010) 10-22.

[22] A. Faghih-Imani, L. Amador-Jimenez, Toward Sustainable Pavement Management: Incorporating Environmental Impacts of Pavement Treatments into a Performance-Based Optimization, Transportation Research Record, 2366 (2013) 13-21.

[23] T. Wang, I.-S. Lee, A. Kendall, J. Harvey, E.-B. Lee, C. Kim, Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance, Journal of Cleaner Production, 33 (2012) 86-96.

[24] K. Tsunokawa, J.L. Schofer, Trend curve optimal control model for highway pavement maintenance: Case study and evaluation, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 28 (1994) 151-166.

[25] T. Watanatada, C.G. Harral, W.D.D.D. Paterson, A.M., A. Bhandari, K. Tsunokawa, The Model., Highway Design and Maintenance Standard Model (1): Description of the HDM-III, (1988).

[26] 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 (2004) 347-365.

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

[28] S.R. Seyedshohadaie, I. Damnjanovic, S. Butenko, Risk-based maintenance and rehabilitation decisions for transportation infrastructure networks, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44 (2010) 236-248.

[29] Y. Ouyang, S. Madanat, An analytical solution for the finite-horizon pavement resurfacing planning problem, Transportation Research Part B: Methodological, 40 (2006) 767-778.

[30] M.W. Sayers, T.D. Gillespie, W.D.O. Paterson, Sayers, M. W., Gillespie, T. D. and Paterson, W. D. O. (1986) Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements. Washington, D.C., U.S.A.: World Bank.Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements, (1986).

[31] N. Moosavian, Soccer league competition algorithm for solving knapsack problems, Swarm and Evolutionary ComputationMoosavian, N. (2015) 'Soccer league competition algorithm for solving knapsack problems', Swarm and Evolutionary Computation, 20, pp. 14–22..,

20 (2015) 14-22.

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

[33] W.D.O. Paterson, Quantifying the effectiveness of pavement maintenance and rehabilitation, in: Proceedings at the 6th REAAA Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 1990.

[34] J. Chehovits, L. Galehouse, Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements, Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation, (2010).

[35] P. CEREA, Preventive maintenance treatments on road pavements: multiapproach life cycle assessment, in, 2011, pp. 161.

[36] Z. Wu, G.W. Flintsch, Pavement Preservation Optimization Considering Multiple Objectives and Budget Variability, Journal of Transportation Engineering, 135 (2009) 305-315.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Golroo , A. H. Fani, H. Naseri ,Pavement maintenance planning of large-scale transportation networks considering energy consumption, Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 2695-2712.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17500.6582

This page intentionally left blank