Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 609-612
DOI: 10.22060/ceej.2020.17502.6583

Pavement Maintenance and Rehabilitation Planning Considering Budget Uncertainty

A. Golroo[1*] , A. H. Fani[1], H. Naseri[1], S. A. Mirhassani[2]

[1] Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
[2] Department of Mathematics and Computer Science, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Maintenance and rehabilitation planning plays a pivotal role in the implementation of an efficient pavement management system. The variables are generally considered deterministic to solve the problem. Nevertheless, this problem tackles with a high level of uncertainty. For instance, the budget, as one of the essential criteria, is fluctuated owing to resource limitation, and policy alteration. If the budget is taken into account as deterministic, the result of the problem may be considerably different from the absolute optimal solution to the problem. This investigation aims to solve a maintenance and rehabilitation problem by consideration of a novel and powerful uncertainty approach. To this end, a multi-stage integer linear uncertainty model is introduced to find a solution, which is feasible and optimal in all of the uncertainty modes. The case study of this paper is a network, including six pavements. The outcomes indicated that the proposed model is competent to consider budget fluctuation, and it introduces a solution that is optimal for all uncertainty scenarios. The comparison of deterministic and uncertainty models revealed that the number of preventative maintenance selected by the uncertainty model is more than that of the deterministic model. The number of preventative maintenance was increased from 36.67% to 40.91% via considering uncertainty in the problem. It can be postulated that the uncertainty model tries to allocate budget to more segments to reduce the likely negative impacts of budget fluctuation on the project.

Review History:
Received: Dec. 08, 2019
Revised: Feb. 09, 2020
Accepted: Mar. 10, 2020
Available Online: Apr. 03, 2020

Keywords:
Pavement management
Maintenance
Uncertainty
Optimization
Stochastic programming

1. INTRODUCTION

According to road maintenance and transportation organization, 97% of passenger transportation and 91% of goods transportations are conducted by pavements [1]. Accordingly, this massive number of transportation leads to increasing the deterioration rate of pavements in the network and increasing the required budget for pavements maintenance and rehabilitation [1]. To this end, the optimization of pavements maintenance and rehabilitation has been an immense concern.

Furthermore, the majority of pavements maintenance and rehabilitation models consider the budget constant. Nonetheless, estimating the annual budget in advance is not feasible owing to some economic and political problems. Hence, consideration of budget uncertainty can be an appropriate approach. Wu and Flintsch [2] considered budget uncertainty in a network, including 16000 pavements. They applied a Markov process to consider uncertainty in the pavements maintenance and rehabilitation problem [2]. Similarly, Gao *et al.* [3] took budget uncertainty into account in the pavements maintenance and rehabilitation problem. They considered a case study, which contained 16400 km linear pavements. To this end, the budget uncertainty was analyzed with the application of the Markov process.

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

According to the aforementioned concepts, budget uncertainty has been generally analyzed by the Markov process. Nonetheless, the Markov process cannot separate the pavements section in the network and cannot consider the condition of pavement individually. To this end, multistage stochastic integer programming is introduced in this study to prevail over this deficiency.

2. METHODOLOGY

This study is classified into three sub-parts, including selecting the pavement condition index and detecting the required models applied in the optimization problem, expansion of the deterministic pavements maintenance and rehabilitation problem, and solving the pavements maintenance and rehabilitation problem under uncertainty.

2.1. Pavement condition index

In this study, the international roughness index (*IRI*) is taken into consideration as the pavement condition index. Because this index directly correlates with the pavement's surface features, it plays a crucial role in the driver's safety and feeling of convenience. To estimate the deterioration rate of the pavement condition index, the model introduced by Tsunokawa and Schofer was applied in the optimization problem modeling [4].

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. The initial characteristics of network' sections

Section ID	Length (km)	Area (m^2)	Annual average daily traffic (vehicle per day)	Initial *IRI* (m/km)
1	6.58	90146	14378	2.45
2	2.83	58771	14378	2.88
3	3.67	48759	14378	2.41
4	7.45	95360	14378	4.30
5	3.15	43305	14378	2.32
6	3.74	51238	14378	2.90

Table 2. The unit cost and the improvement of each treatment

Treatment ID	Treatment type	Cost (Toman/m^2)	*IRI* improvement
1	Do nothing	0	0
2	Preventive	5000	0.3
3	Light rehabilitation	15000	1.2
4	Medium rehabilitation	32000	2
5	Heavy rehabilitation	65000	IRI_{new}=1.5

2.2. The deterministic model

In the pavement network, $I=\{1,2,3,\ldots,I\}$ sections are considered. Meanwhile, $K=\{1,2,3,\ldots,K\}$ treatments are taken into account in which K provides the highest level of improvement and it is the most expensive operation. The years in the analysis period are considered discrete parameters $T=\{1,2,3,\ldots,T\}$. Thus, the formulations of the deterministic model are as follow:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^{I}|IR_{i5}-IR_i^*| \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}A_iC_{ikt}x_{ikt}\le B_t \qquad \forall t\in T \tag{2}$$

$$IR_{it}=IR_{i0}\exp(\beta t)+\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{K-1}x_{ikt}e_{ik}\exp(\beta(t-j)) +(IR_{new}-IR_{i0}\exp(\beta t))x_{iKt} \quad \forall i\in I \tag{3}$$

$$IR_{it}\ge IR_{min} \qquad \forall t\in T \tag{4}$$

$$IR_{it}\le IR_{max} \qquad \forall t\in T \tag{5}$$

$$\overline{IR_t}=\frac{\sum_{i=1}^{I}IR_{it}A_i}{\sum_{i=1}^{I}A_i} \qquad \forall t\in T \tag{6}$$

$$\overline{IR_t}\le IR_t^{network} \qquad \forall t\in T \tag{7}$$

$$\sum_{k=1}^{K}X_{ikt}=1 \qquad \forall i\in I,\forall t\in T \tag{8}$$

$$X_{ikt}\in\{0,1\},IR_{it}\ge 0 \tag{9}$$

Where, Eq. (1) is the objective function of the deterministic problem, which minimizes the distances of pavements *IRI* and an ideal level in the last year of the analysis period. Eq. (2) represents the budget constraint. Eq. (3) implies a method that applies to calculate the *IRI* of sections based on the deterioration rate and improvement of treatment applied to the mentioned section. Eqs. (4) and (5) are set to restrict the range of *IRI*. Based on Eqs. (6) and (7), the weighted average of *IRI* for the network pavements cannot violate a particular range. Based on Eq. (8), only one selection can be made for each section in a year. Furthermore, the decision variable of this model is binary, and this statement is indicated in Eq. (9).

2.3. The uncertainty model

In the uncertainty model, under multistage stochastic integer programming, all feasible types of budget allocation are analyzed. That is to say, two levels of budget are taken into consideration for each year. Accordingly, 32 types of budget allocation can be available for 5 years (2^5).

3. CASE STUDY

To analyze the effects of uncertainty on pavement maintenance and rehabilitation planning, a case study, including 6 sections with a total length of 28 km, is taken into account. The mentioned sections are located on the Tehran-Garmsaar highway. The initial condition and characteristics of sections are shown in Table 1. Furthermore, The *IRI* improvement of treatments and treatment unit costs are given in Table 2 [1, 5, 6].

4. RESULTS AND DISCUSSION

The average condition (*IRI*) of the network for the deterministic and uncertainty models during a 5 year analysis period is illustrated in Fig. 1. As can be seen, the *IRI* is steadily reduced in the deterministic and uncertainty models. However, the performance of the deterministic model is a bit better than that of the uncertainty model. The deterministic model reduces the average *IRI* of the network from 2.87 to 2.25 m/km.

The comparison of the required cost to conduct the introduced solutions of the deterministic and uncertainty models is demonstrated in Table 3. Drawing on the results of this Table, the uncertainty model introduces cheaper optimal solutions than the deterministic model, and it may be because of considering uncertainty and budget reduction. Hence, it can be postulated that the uncertainty model is highly qualified to compensate for the effects of budget fluctuation on the performance of the network.

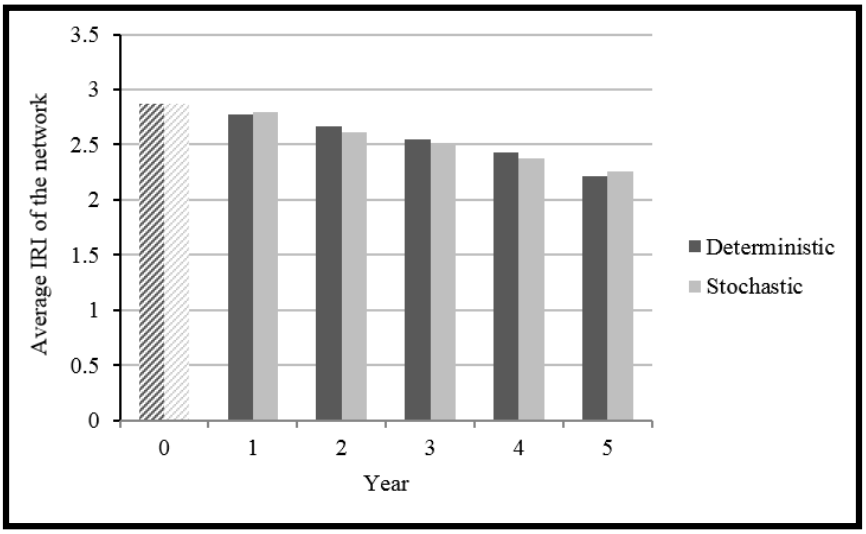


Fig. 1. The average value of pavements condition for deterministic and uncertainty budget models

5. CONCLUSION

The uncertainty model introduced in this study can control budget variation. Besides, in the analysis period, decision-makers can adjust the maintenance planning with the current circumstance.

Table 3. The total cost that spends on the network in budget models of deterministic and uncertainty

Year\Model	Deterministic	Uncertainty
1	1646927000	1552299500
2	1674199000	1547609250
3	1644046000	1531469375
4	1332295000	1429989513
5	1656954000	1412068497
Sum	7954421000	7473436134

REFERENCES

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

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

[3] L. Gao, R. Guo, Z. Zhang, An augmented Lagrangian decomposition approach for infrastructure maintenance and rehabilitation decisions under budget uncertainty, Structure and Infrastructure Engineering, (2011).

[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] 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.

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

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Golroo, A.H. Fani, H. Naseri, S.A. Mirhassani, Pavement Maintenance and Rehabilitation Planning Considering Budget Uncertainty, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 609-612.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17502.6583

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۷، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۷۸۱ تا ۲۸۰۰
DOI: 10.22060/ceej.2020.17502.6583

برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر روسازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت بودجه

امیر گلرو[1*]، امیرحسین فانی[1]، حامد ناصری[1]، سید علی میرحسنی[2]

۱ دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
۲ دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

خلاصه: برنامه ریزی عملیات نگهداری و تعمیر روسازی نقش بسزایی در اجرای کارآمد سیستم مدیریت روسازی ایفا می کند. این مسأله معمولاً با فرض قطعی بودن تمامی پارامترهای موجود بررسی می شود. در حالی که عدم قطعیت زیادی در مسأله دیده می‌شود. به طور مثال، میزان بودجه به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار به دلایل مختلفی مانند محدودیت منابع و تغییر سیاست ها با نوسان همراه است. برنامه‌ریزی عملیات با فرض قطعی بودن بودجه ممکن است به جوابی منجر شود که با جواب بهینه واقعی، فاصله زیادی داشته باشد. هدف این پژوهش، برنامه ریزی عملیات نگهداری و تعمیر روسازی در سطح شبکه با در نظر گرفتن عدم قطعیت بودجه با رویکردی جدید و کاربردی می‌باشد. برای این منظور، یک مدل برنامه ریزی تصادفی چند مرحله ای عدد صحیح خطی که هدف آن یافتن جوابی است که برای تمامی حالات عدم قطعیت امکان پذیر و بهینه باشد، ارائه می شود. نتایج مدل معرفی شده بر روی یک شبکه موردی با ۶ قطعه روسازی نشان داد مدل برنامه‌ریزی تصادفی به خوبی نوسانات بودجه را لحاظ کرده و راه حلی ارائه می کند که برای سناریوهای مختلف بهینه باشد. مقایسه نوع عملیات انتخاب شده توسط مدل های تصادفی و قطعی نشان داد که تعداد عملیات پیشگیرانه انتخاب شده توسط مدل تصادفی بیشتر از مدل قطعی است؛ به طوری که از ۳۶/۶۷٪ از کل عملیات انتخابی در مدل قطعی به ۴۰/۹۱٪ در مدل تصادفی می‌رسد. این موضوع مؤید این نکته است که مدل تصادفی سعی دارد بودجه را با توجه به اثرات منفی افت احتمالی آن بین قطعات بیشتری از طریق انتخاب عملیات پیشگیرانه تقسیم کند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

کلمات کلیدی:
سیستم مدیریت روسازی
برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر
عدم قطعیت
بهینه‌سازی
برنامه‌ریزی تصادفی

۱- مقدمه

طبق آمار سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای، حدود ۹۷ درصد از حمل و نقل مسافری و ۹۱ درصد از حمل و نقل باری کل کشور از طریق حمل و نقل جاده ای صورت پذیرفته است. این حجم بالای حمل و نقل موجب پایین آمدن سطح سرویس راه ها، افزایش هزینه های عملیات نگهداری و تعمیر (نت) و بالا رفتن تعداد تصادفات می شود. بالا رفتن نرخ اضمحلال روسازی، بالا رفتن تقاضا و محدود بودن بودجه در دسترس همگی سبب می شود مدیریت روسازی به عنوان یکی از مهمترین بخش های مدیریت زیرساخت حمل و نقل شناخته شود [۱].

یکی از اهداف کلیدی یک سیستم مدیریت روسازی، به تأخیر انداختن خرابی و افزایش عمر مفید شبکه راه ها از طریق انجام عملیات نت مختلف می باشد. این هدف از طریق بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی در سطوح شبکه و پروژه صورت می پذیرد. مدیریت در سطح شبکه نیازهای کل شبکه را مد نظر قرار می دهد. در مدیریت در سطح پروژه، هدف، انتخاب بهترین گزینه برای هر پروژه است و به جزئیات روش های اجرایی، هزینه ها، منابع مورد نیاز و محدودیت ها پرداخته می شود. تخصیص بودجه به صورت بهینه از طریق اجرای درست فرآیند بهینه‌سازی امکان‌پذیر است [۲].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: agolroo@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.

در سطح شبکه، مدل های ریاضی مختلفی برای برنامه‌ریزی زمان بندی عملیات نت روسازی موجود است. بسیاری از این مدل ها با فرض مشخص و قطعی بودن بودجه به حل مسأله می پردازند. با این وجود، بودجه به دلایل مختلف اقتصادی و سیاسی غیرقابل پیش‌بینی است. در ایران، سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای متولی توسعه و نگهداری از شبکه راه ها می باشد. بودجه این سازمان در طی سالیان متمادی با نوسان همراه بوده و نمی توان با قطعیت در مورد میزان آن صحبت کرد. به طور مثال، بودجه در طی دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۶ روند کاهشی را تجربه کرده؛ به طوری که از ۱۸۰۴ میلیارد تومان در سال ۱۳۹۶ به ۱۶۸۰ میلیارد تومان در سال ۱۳۹۷رسیده است که به معنای کاهش ۶/۸ درصدی می باشد. بودجه سال ۱۳۹۶ نیز به نسبت سال ۱۳۹۵ کاهش ۲۶ درصدی داشته است. به علاوه، بودجه تعمیر و نگهداری همواره در حال رقابت با سایر فعالیت های زیرساختی مانند توسعه و ایجاد راه های جدید است. بنابراین بودجه واقعی تخصیصی به تعمیر و نگهداری راه ها ممکن است فاصله زیادی از تخمین اولیه پیدا کند. نادیده گرفتن عدم قطعیت بودجه در مسأله ممکن است به جوابی منجر شود که به دلیل محدودیت های ایجاد شده در منابع، در عمل همه یا بخشی از برنامه عملیاتی پیشنهادی قابلیت اجرا نداشته باشد. لذا در نظر گرفتن عدم قطعیت و بررسی اثر آن ضروری می باشد [۱].

۲- مرور ادبیات

از اوایل دهه ۱۹۸۰، رویکردها و مدل های بهینه‌سازی مختلفی برای حل مسأله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی به کار گرفته شده است. در حال حاضر دو رویکرد عمده و مهم در ادبیات بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیات نت وجود دارد. در رویکرد اول معمولاً تمامی پارامترها قطعی و فاقد عدم قطعیت در نظر گرفته می شوند. مدل های برنامه‌ریزی عدد صحیح پرکاربردترین مدل ها در این زمینه هستند.

در رویکرد دیگر بهینه‌سازی، تلاش می شود عدم قطعیت پارامترها به خصوص عدم قطعیت در فرآیند اضمحلال روسازی در مسأله گنجانده شود. مشهورترین مدل های غیرقطعی در زمینه مدیریت روسازی مدل هایی هستند که بر اساس فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف[1] عمل می کنند. زنجیره مارکوف معمول ترین روش مدل‌سازی عملکرد روسازی به صورت احتمالاتی است. مدل‌سازی بر اساس فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف، معمولاً منجر به یک مدل برنامه‌ریزی خطی شده و حل می شود. از این پس در این مقاله این مدل ها، مدل های مارکوفی و مدل های مربوط به رویکرد اول، مدل های غیرمارکوفی نامیده می شوند. در ادامه ابتدا به تشریح روش های مارکوفی و سپس روش های غیرمارکوفی پرداخته خواهد شد.

مدل‌سازی مسأله مدیریت روسازی در سطح شبکه به صورت برنامه‌ریزی خطی عموما با استفاده از فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف صورت می پذیرد. در مدل های مارکوفی غالبا قطعات موجود در شبکه روسازی به چند گروه با مشخصات مشابه تقسیم شده و متغیرهای تصمیم به صورت درصدی از مجموع طول هر گروه روسازی که می بایست عملیات نت مختلف بر روی آن اعمال شود، تعریف می شوند [۳]. این موضوع ضعف این مدل ها نسبت به مدل های برنامه‌ریزی عدد صحیح محسوب می شود، زیرا جواب آن ها توانایی ارائه برنامه برای هریک از قطعات شبکه به صورت جداگانه را ندارد.

به علاوه، در زنجیره مارکوف، شاخص وضعیت روسازی تقسیم بندی شده و به صورت گسسته به شکل چند بازه در نظر گرفته می شود. در حالی که شاخص های وضعیت روسازی (مانند شاخص بین‌المللی ناهمواری[2] و شاخص وضعیت روسازی[3]) عموماً به صورت پیوسته می باشند. این گسسته سازی می تواند منجر به پایین آمدن کیفیت جواب گردد، زیرا ممکن است با یک تغییر کوچک در وضعیت روسازی، وضعیت از یک بازه به بازه دیگر منتقل شود و این موضوع ضعف دیگر روش های مارکوفی است.

گلابی و همکاران در سال ۱۹۸۲ یک مدل خطی برای سیستم مدیریت روسازی آریزونا طراحی کردند که در سال اول اجرا، ۱۴ میلیون دلار صرفه جویی در هزینه ها را در پی داشت [۲]. امباوانا و ترنکوئیست متغیرهای تصمیم مدل خطی بر مبنای مارکوف را به گونه ای تعریف کردند که قطعات هر گروه روسازی قابل شناسایی باشند [۴]. در پژوهش دیگری از فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف پنهان[4] به منظور تعیین عملیات نت استفاده شده است. در مدل عادی مارکوف، اندازه‌گیری وضعیت قطعات بدون خطا و به صورت

1 Markov Decision Process (MDP)

2 International Roughness Index (IRI)
3 Pavement Condition Index (PCI)
4 Hidden Markov Decision Process

قطعی فرض می شود. در حالی که یک مدل پنهان مارکوف می تواند عدم قطعیت در اندازه‌گیری وضعیت قطعات را در نظر بگیرد [۵]. در پژوهش وو و فلینچ یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه که به طور همزمان میانگین وزنی وضعیت قطعات شبکه و هزینه های تعمیر و نگهداری را بهینه می کند، به کار گرفته شده است [۶].

در پژوهش های زیادی مسأله بهینه‌سازی مدیریت روسازی در سطح شبکه به صورت یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح یا برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته[1] (برخی از متغیرها گسسته و برخی پیوسته) با متغیرهای تصمیم صفر و یک مدل شده است. راه حل بدست آمده از این مدل نشان می دهد به کدام قطعه، در چه زمانی و چه نوع عملیات نت اختصاص یابد. لذا برنامه عملیات نت برای هر قطعه به صورت جداگانه ارائه می شود. این مدل ها معمولاً از نوع زمان-گسسته هستند. رویکرد این مقاله نیز در مورد حل مسأله مدیریت عملیات نت، مدل‌سازی آن به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح می باشد. در مدل های برنامه‌ریزی عدد صحیح با بزرگ شدن تعداد مقاطع شبکه روسازی مورد بررسی، پیچیدگی محاسباتی به صورت نمایی افزایش یافته و حل دقیق مسأله به خصوص برای شبکه های بزرگ مقیاس[2] دشوار می گردد [۷].

لی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح که تابع هدف آن انتخاب مؤثرترین عملیات نت برای هر سال است، ارائه دادند. مدل ارائه شده قابلیت محاسبه حداقل بودجه مورد نیاز برای نگهداری شبکه در یک سطح از پیش تعیین شده را دارا می باشد. یک شبکه با ۵ قطعه روسازی نمونه موردی این پژوهش می باشد [۸]. وانگ و همکاران مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح دو هدفه را برای یافتن بهترین برنامه عملیات نت به کار گرفتند. جواب بدست آمده از مسأله آن ها بیشینه سازی میزان کارایی عملیات نت و کمینه سازی هزینه های وارد شده به کاربران را به صورت همزمان در نظر می گرفت. این مدل برای در یک شبکه کوچک با ۱۰ قطعه روسازی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت [۹]. اویانگ و مدنت به ارائه برنامه عملیات بازسازی در سطح شبکه پرداختند و برای حل مسأله از روش شاخه و کران و یک الگوریتم فراابتکاری حریصانه[3] استفاده کردند. ارائه برنامه بازسازی یک سیستم با سه قطعه روسازی توسط مدل اویانگ و مدنت مورد بررسی قرار گرفت [۱۰]. چاکروبورتی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح با تابع هدف بیشینه کردن تأثیر و کارایی عملیات نت برای یک شبکه با ۴۲ قطعه ارائه دادند [۱۱]. منساه و همکاران به مقایسه سه روش برنامه‌ریزی عدد صحیح، تحلیل هزینه-فایده[4] و تعمیمی از درخت تصمیم[5] پرداختند و نشان دادند برنامه‌ریزی عدد صحیح کارایی بسیار بهتری از دو روش دیگر در تخصیص بودجه و حفظ شبکه در وضعیت ایده‌آل دارد [۱۲].

در برنامه‌ریزی ریاضی معمولاً مسائل با پیش فرض قطعی بودن داده‌ها حل می‌شوند. حال آنکه در دنیای واقعی اکثر داده‌ها دچار عدم قطعیت می باشند. در نتیجه در مسائل دنیای واقعی ممکن است با تغییر یکی از داده‌ها تعداد زیادی از محدودیت‌ها نقض شده و یا جواب مسأله تغییر کند. در مسأله برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی نیز پارامترهایی نقش دارند که وجود عدم قطعیت در آن ها مشهود می باشد.

در مورد بودجه، ادارات و سازمان های متولی راه در طول سالیان متمادی نوسانات زیادی را در مقدار بودجه پیش‌بینی شده به دلایل مختلف سیاسی و اقتصادی تجربه کرده اند. اگر در طول یک یا چند سال از دوره برنامه‌ریزی، کاهش بودجه رخ دهد، بخشی از برنامه‌ریزی تعیین شده برای نگهداری شبکه غیر قابل اجرا بوده، پیش‌بینی وضعیت قطعات شبکه با نوسان همراه است و شبکه نیاز به برنامه‌ریزی مجدد دارد. در نتیجه در نظر نگرفتن عدم قطعیت موجود در بودجه آینده می تواند از کارایی مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیات نت بکاهد [۱۳].

روش های گوناگونی برای مواجهه با عدم قطعیت و پیامدهای ناشی از وجود عدم قطعیت تاکنون معرفی شده اند که برخی از آن ها عبارتند از: برنامه‌ریزی تصادفی[6]، برنامه‌ریزی احتمالاتی[7]، بهینه‌سازی استوار[8]، برنامه‌ریزی فازی[9]، بهینه‌سازی با استفاده از قیود ریسک و غیره. در جدول ۱ خلاصه ای از مطالعات برنامه‌ریزی عملیات نت در سطوح پروژه و شبکه در شرایط عدم قطعیت پارامترهای تأثیرگذار مسأله ارائه شده است. در این جدول پارامتری که عدم قطعیت آن مورد بررسی قرار گرفته، روش مواجهه با عدم قطعیت، مارکوفی با

1 Mixed Integer Programming
2 Large-Scale Network
3 Greedy Metaheuristic

4 Cost-Benefit Analysis
5 Decision Tree
6 Stochastic Programming
7 Probabilistic Programming
8 Robust Optimization
9 Fuzzy Programming

جدول ۱. مطالعات برنامه‌ریزی عملیات نت در سطوح پروژه و شبکه در شرایط عدم قطعیت به طور خلاصه

Table 1. The literature review of pavements maintenance and rehabilitation planning in the project and the network level by uncertainty consid

پژوهش	پارامتر عدم قطعیت	روش مواجهه با عدم قطعیت	مارکوفی یا غیرمارکوفی	سطح مدیریت	نمونه موردی
کوهن و مدنت (۲۰۰۵) [۱۴]	هر یک از درایه‌های ماتریس احتمال انتقال مارکوف	بهینه‌سازی استوار	مارکوفی	شبکه	۸۳۶۰ مترمربع
ژائو و ژانگ (۲۰۰۸) [۱۵]	هر یک از متغیرهای مستقل مدل خطی اضمحلال روسازی	بهینه‌سازی استوار	غیرمارکوفی	پروژه	-
وو و فلینچ (۲۰۰۹) [۶]	بودجه	برنامه‌ریزی احتمالاتی	مارکوفی	شبکه	۱۶۰۰۰ کیلومتر خطی
سیدالشهدایی و همکاران (۲۰۱۰) [۱۶]	نرخ اضمحلال روسازی	بهینه‌سازی با استفاده از قیود ریسک	مارکوفی	شبکه	۲۰ قطعه روسازی
اِنجی و همکاران (۲۰۱۱) [۱۷]	نرخ اضمحلال روسازی	بهینه‌سازی استوار	غیرمارکوفی	پروژه	-
ژائو و همکاران (۲۰۱۱) [۱۸]	بودجه	برنامه‌ریزی تصادفی	مارکوفی	شبکه	۱۶۴۰۰ کیلومتر خطی
امین (۲۰۱۳) [۱۳]	بودجه	بهینه‌سازی استوار	غیرمارکوفی	شبکه	۱۰ قطعه روسازی

غیرمارکوفی بودن مدل، سطح مدیریت و نمونه موردی هر پژوهش ارائه شده است.

همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است، عدم قطعیت موجود در بودجه در سطح شبکه، عمدتاً به کمک روش های مارکوفی مورد بررسی قرار گرفته است. لیکن همان‌طور که پیشتر عنوان شد، دو ضعف عمده این روش ها عدم توانایی ارائه برنامه مناسب برای هر قطعه به صورت جداگانه و همچنین گسسته سازی شاخص وضعیت روسازی می باشند. علاوه بر این، در مورد روش های غیرماکوفی، مشاهده می شود که عدم قطعیت موجود در مسأله تاکنون توسط این روش ها تنها در چند مطالعه محدود مورد بررسی قرار گرفته است و به طور مثال عدم قطعیت در بودجه به صورتی عملیاتی که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است، تاکنون با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا در این مقاله سعی شده است این خلأ تحقیقاتی مورد پژوهش قرار گیرد.

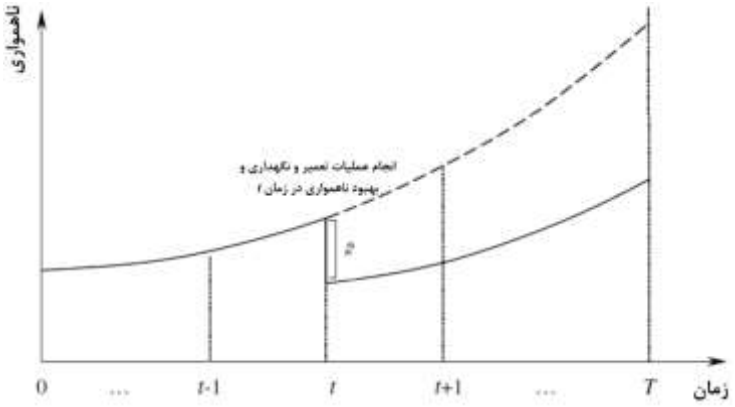
۳- اهداف پژوهش

هدف اصلی این پژوهش ارائه یک چهارچوب بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی عملیات نت در سطح شبکه با درنظر گرفتن عدم قطعیت موجود در بودجه می باشد. به منظور دست‌یابی به این هدف، مسأله به صورت یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله ای عدد صحیح[1] فرمول‌بندی می شود. مدل ارائه شده از این لحاظ با مدل قطعی مسأله متفاوت است که سعی در یافتن بهترین برنامه عملیات نت با توجه به تمامی حالات تصادفی ممکن برای بودجه دارد. در واقع در برنامه‌ریزی تصادفی هدف، اخذ تصمیمی است که علاوه بر امکان‌پذیر بودن در تمامی حالات، مقدار متوسط تابعی از متغیرهای تصادفی و تصمیمات، بهینه گردد.

۴- روش تحقیق

برای انجام این پژوهش به ترتیب سه گام انتخاب شاخص وضعیت روسازی و شناسایی مدل های لازم به منظور استفاده در مدل های بهینه سازی، توسعه و حل مدل برنامه‌ریزی عملیات نت در حالت قطعی و توسعه و حل مدل برنامه‌ریزی عملیات نت در حالت تصادفی انجام گرفته است. در ادامه هر یک از گام های مطرح شده شرح داده می شوند. لازم به ذکر است مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای استفاده شده در مدل های ریاضی در پیوست ۱ معرفی شده اند.

1 Multistage Stochastic Integer Programming



شکل ۱. اضمحلال ناهمواری و تأثیر عملیات نت در زمان t [۱۰]

Fig. 1. The deterioration of the international roughness index and the impact of maintenance during the time [10]

۴-۱- شاخص وضعیت روسازی و مدل های مورد نیاز

از پیش‌نیازهای لازم برای توسعه هر مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیات نت، تعیین شاخص وضعیت روسازی و همچنین شناسایی سه بخش مدل پیش‌بینی عملکرد[1]، مدل بهبود[2] وضعیت ناشی از انجام عملیات و میزان هزینه هر یک از عملیات نت می باشد. از آن جا که ناهمواری راه، یکی از شاخص های کلیدی در ارزیابی عملکرد راه است، شاخص بین‌المللی ناهمواری به عنوان شاخص عملکردی در این پژوهش در نظر گرفته شده است. ناهمواری راه به عنوان یکی از مهمترین پارامترهایی که مستقیماً با مشخصات سطحی روسازی در ارتباط می باشد، همواره مورد توجه همگان بوده است. همبستگی بالا بین این شاخص و راحتی کاربران راه و نیز تأثیر روند تغییرات آن بر شرایط عملکرد روسازی در زمان های مختلف، از دلایل انتخاب این شاخص می باشد. ناهمواری بر کیفیت سواری و هزینه های استهلاک و در نتیجه رضایت استفاده کنندگان از راه تأثیر بسزایی دارد. شاخص بین‌المللی ناهمواری که توسط بانک جهانی ارائه گردیده است، به طور کلی از تقسیم میزان پستی و بلندی های موجود در یک مسیر معین به فاصله طی شده تعیین می شود [۱۹]. لازم به ذکر است که اگرچه ناهمواری معیاری مهم و پرکاربرد به منظور نشان دادن راحتی استفاده‌کنندگان و نشانه‌ای برای ایمنی است، لیکن ممکن است به تنهایی الزاماً شاخص مناسبی برای تعیین عملیات نت نباشد و مناسب‌ترین زمان‌بندی را برای انتخاب نوع عملیات ارائه ندهد. به طور مثال امکان داد یک روسازی از لحاظ سازه‌ای دارای نقص بوده اما از لحاظ راحتی سواری هنوز در سطح قابل قبولی باقی مانده باشد. اما در عین حال با توجه به اهمیت این شاخص از جهات مختلف در پژوهش‌های متعددی در زمینه برنامه‌ریزی عملیات نت از این شاخص استفاده گردیده است. به علاوه در مدل های بهینه‌سازی این پژوهش که در بخش های بعدی معرفی می شوند، می توان مدل های اضمحلال مختلفی با توجه به شاخص مورد استفاده (مانند شاخص وضعیت روسازی، شاخص خدمت‌دهی روسازی و غیره)، در نظر گرفت و مدل اضمحلال منحنی روند به جهت استفاده از شاخص بین‌المللی ناهمواری به کار گرفته شده است.

استفاده از یک مدل عملکردی به جهت پیش‌بینی وضعیت روسازی و تشخیص این موضوع که در چه زمانی کدام قطعات شبکه به وضعیت بحرانی می رسند، ضروری می باشد. مدل پرکاربرد برای مدیریت عملیات نت در سطح شبکه، مدل منحنی روند[3] می باشد که توسط تیسانوکاوا و شوفر و بر اساس داده های جمع‌آوری شده توسط بانک جهانی [۲۰] معرفی شده است [۲۱]. تابع اضمحلال در این مدل، نسبت ناهمواری به ناهمواری اولیه را به صورت نمایی در طی زمان بیان می کند. اگر ناهمواری اولیه قطعه i برابر IR_{it^0} باشد، در زمان آینده t^* ($t^* > t$)، وضعیت این قطعه توسط معادله (۱) بیان می شود. همچنین فرآیند اضمحلال ناهمواری روسازی بر طبق این معادله در شکل ۱ نمایش داده شده است.

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

1 Performance Model
2 Improvement Model
3 Trend Curve

از مدل منحنی روند در پژوهش های گوناگونی در زمینه مدیریت عملیات نت روسازی در سطوح پروژه و شبکه استفاده شده است [۱۰, ۱۶, ۲۲, ۲۳].

انجام هر یک از عملیات نت، سبب بهبود وضعیت روسازی می شود. در مورد مدل بهبود عملیات نت برای شاخص بین‌المللی ناهمواری، عمدتاً در پژوهش های در سطح شبکه با چند نوع عملیات به این صورت عمل شده است که به ازای هر یک از عملیات با توجه به شدت آن، یک جهش عملکردی در وضعیت روسازی در نظر گرفته می شود. در برخی پژوهش ها میانگین مقدار جهش به کمک بررسی داده های تاریخچه ای و یا نظرات کارشناسان تخمین زده شده است. روش دیگر برآورد تابعی از متغیرهای تأثیرگذار نظیر نوع عملیات نت، وضعیت روسازی پیش از انجام عملیات و غیره و ارائه یک مدل بر اساس این متغیرها برای تخمین بهبود وضعیت می باشد [۲۴, ۲۵]. در این پژوهش، میانگین میزان جهش عملکردی برای هر یک از عملیات نت با استفاده از نتایج پژوهش های لو و تولیور [۲۶] و پترسون [۲۷] تخمین زده شده است.

همچنین اجرای هر یک از عملیات نت هزینه مربوط به خود را برای سیستم در بر دارد که این هزینه از محاسبه مجموع هزینه های عملیاتی اجرای هر یک از سیاست های نگهداری تعیین می شود.

۴-۲- برنامه‌ریزی عملیات نت در حالت قطعی

یک شبکه روسازی با یک مجموعه $I = \{1,2,3,\dots,I\}$ قطعه در نظر گرفته شده است. مجموعه عملیات نت به صورت مجموعه $K = \{1,2,3,\dots,K\}$ که عملیات Kام دارای بیشترین تأثیر و در عین حال بیشترین هزینه می باشد. دوره زمانی برنامه‌ریزی به صورت مجموعه $T = \{1,2,3,\dots,T\}$، یک دوره زمانی گسسته لحاظ می شود. در هر بازه زمانی، قطعات شبکه به دلایل مختلف از قبیل حجم ترافیک عبوری، شرایط آب و هوایی و بالا رفتن سن روسازی دچار اضمحلال می شوند. مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی با در نظر گرفتن قطعی بودن تمامی پارامترها به صورت معادلات (۲) تا (۱۰) می باشد.

$$Minimize \sum_{i=1}^{I} \left| IR_{i5} - IR_i^* \right| \qquad (۲)$$

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

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

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

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

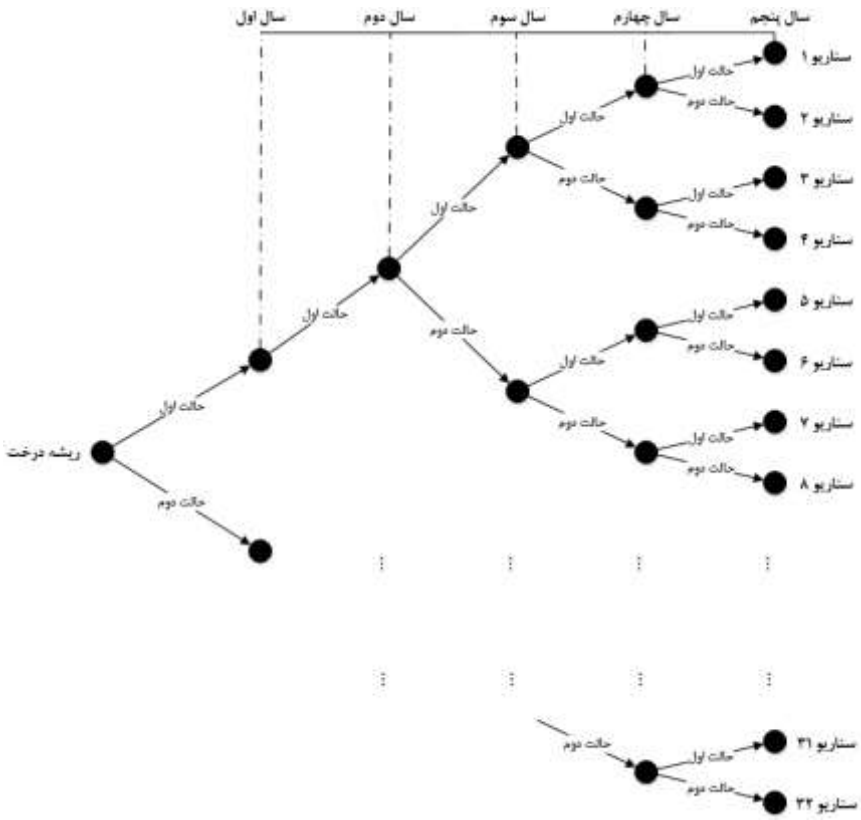
$$\overline{IR_t} = \frac{\sum_{i=1}^{I} IR_{it} A_i}{\sum_{i=1}^{I} A_i} \qquad \forall t \in T \qquad (۷)$$

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

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

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

معادله (۲) تابع هدف مدل را نشان می دهد که فاصله وضعیت قطعات روسازی در مقطع زمانی پایانی برنامه‌ریزی را از وضعیت ایده‌آل از پیش تعیین شده کمینه می کند. محدودیت (۳)، محدودیت مربوط به بودجه را نشان می دهد که در واقع مجموع هزینه های عملیات تعمیر و و نگهداری در هر مقطع زمانی، باید از بودجه موجود کمتر باشد. در محدودیت (۴) وضعیت هر قطعه در زمان t با توجه به نرخ اضمحلال و همچنین میزان بهبود ناهمواری با توجه به عملیات انجام گرفته تا زمان t، محاسبه می شود. عبارت پایانی محدودیت (۴) نشان می دهد برای عملیات نوع k یعنی بازسازی، وضعیت قطعه فارغ از این که پیش از انجام عملیات بازسازی در چه شرایطی بوده است به وضعیت یک روسازی نو (IRI_{new}) تغییر می کند. محدودیت (۵) کمترین میزان ممکن ناهمواری را برای هر یک از قطعات روسازی در هر مقطع زمانی نشان می دهد. پایین تر بودن وضعیت هر قطعه در هر مقطع زمانی از یک مقدار بیشینه مشخص شده توسط محدودیت (۶) تضمین می شود. این مقدار بیشینه به وسیله تصمیم گیران



شکل ۲. درخت سناریو برای ۲ حالت بودجه و دوره برنامه‌ریزی ۵ ساله

Fig. 2. The scenario tree for various budgets in a 5 year period

تعیین می شود. در محدودیت (۷) میانگین وزنی وضعیت تمامی قطعات شبکه در یک مقطع زمانی محاسبه می شود. در محاسبه میانگین، وزن قطعات بر اساس مساحت آن ها در نظر گرفته می شود. محدودیت (۸) بیشینه مجاز ناهمواری برای میانگین شبکه را مشخص می کند. محدودیت (۹) این موضوع را تضمین می کند که تنها یک عملیات نت در یک مقطع زمانی برای هر قطعه شبکه انتخاب و اعمال شود. محدودیت (۱۰) نشان می دهد وضعیت قطعات 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.

۴-۳- برنامه ریزی تصادفی چند مرحله ای مدیریت عملیات نت روسازی

در این پژوهش، عدم قطعیت موجود در بودجه در مسأله برنامه‌ریزی عملیات نت در سطح شبکه در بستر برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله ای مدل شده است. برنامه ریزی تصادفی یک چهارچوب برای مدل‌سازی مسائل بهینه‌سازی که برخی از پارامترهای آن ها با عدم قطعیت همراه هستند، فراهم می کند. در برنامه ریزی تصادفی هدف گرفتن تصمیمی است که برای همه (یا تقریباً همه حالات ممکن) شدنی باشد و مقدار متوسط تابعی از متغیرهای تصادفی و تصمیمات، بهینه گردد.

در این بخش پارامتر بودجه سالیانه به صورت غیرقطعی و در فرمول‌بندی معادلات (۲) تا (۱۱) به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته می شوند. در یک مسأله برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله ای، معمولاً عدم قطعیت در قالب یک درخت سناریوی چندسطحی بیان می شود که هر سناریو، وقوع دنباله ای از وقایع را نشان می دهد. در واقع گره های درخت، نقاط تصمیم‌گیری و شاخه های آن مشاهده ای از پارامترهای تصادفی را نشان می دهند. یک سناریو مسیری از ریشه تا برگ ها است. به طور مثال فرض کنید عدم قطعیت بودجه در هر سال با احتمال یکسان به صورت دو وضعیت یک و دو در نظر گرفته شود. لذا درخت سناریو پنج ساله به صورت شکل ۲ می باشد. عدم قطعیت بودجه در این پژوهش به صورت گسسته و در قالب

مجموعه ای از سناریوها مانند شکل ۱ بیان می شود.

در مورد عدم قطعیت بودجه، در پژوهش های پیشین در حوزه برنامه‌ریزی تصادفی مدیریت عملیات نت، کل بودجه به صورت یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شده است. در حالی که معلوم نیست با سپری شدن چند ماه از سال، بودجه مشخص و عدم قطعیت آن مشاهده شود. به طور مثال ممکن است پس از سپری شدن ۵ ماه از سال بودجه به سازمان متولی تخصیص یابد. بنابراین تصمیم‌گیران مجبورند تا ماه پنجم سال صبر کنند تا پس از معلوم شدن بودجه، با توجه به سناریوی بودجه محقق شده، تصمیمات مربوط به آن سناریو را اجرایی کنند. برای پرهیز از این مشکل و همچنین حل مسأله با رویکرد عملیاتی، در این پژوهش بودجه سالیانه به دو بخش قطعی و غیرقطعی تقسیم می شود. به عبارت دیگر یک پارامتر قطعی (B_t^{min}) به عنوان حداقل بودجه در نظر گرفته شده و یک متغیر تصمیم در مورد این بودجه قطعی تصمیم‌گیری می کند. در واقع مدل، پروژه های با اولویت بالا را در این بخش تعیین می کند. بخش اضافی بودجه به صورت غیرقطعی و در چند سناریو ($\tilde{B}_t^s$) در نظر گرفته می شود. یک متغیر تصمیم با توجه به تحقق سناریوهای مختلف، در مورد بخش عدم قطعی بودجه تصمیم گیری می کند. به طور مثال، فرض کنید در یک مسأله با T مرحله، اگر تعداد سناریوهای بودجه اضافی در مرحله t برابر N_t باشد، تعداد کل سناریوها برابر $\prod_{t=1}^{T} N_t$ می باشد. به عبارت دیگر تعداد گره های درخت سناریو در مرحله پایانی برابر این تعداد است.

با توجه به مطالب ذکرشده، مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله ای عدد صحیحِ مسأله مدیریت عملیات نت روسازی به صورت معادلات (۱۱) تا (۲۰) تا بیان می شود:

$$Minimize \sum_{i=1}^{I}\sum_{s=1}^{S} p^s \left| IR_{i5}^s - IR_i^* \right| \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K} A_i C_{ikt} \left(x_{ikt} + y_{ikt}^s \right) \le B_t^{min} + \tilde{B}_t^s \qquad \forall t \in T, \forall s \in S \qquad (۱۲)$$

$$IR_{it}^s = IR_{i0} \exp(\beta t) + \sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{K-1} \left(x_{ikt} + y_{ikt}^s \right) e_{ik} \exp\left(\beta (t-j)\right) + \left(IR_{new} - IR_{i0} \exp(\beta t) \right) \left(x_{iKt} + y_{iKt}^s \right) \quad \forall i \in I, \forall s \in S \qquad (۱۳)$$

$$IR_{it}^s \ge IR_{min} \qquad \forall t \in T, \forall s \in S \qquad (۱۴)$$

$$IR_{it}^s \le IR_{max} \qquad \forall t \in T, \forall s \in S \qquad (۱۵)$$

$$\overline{IR}_t^s = \frac{\sum_{i=1}^{I} IR_{it}^s A_i}{\sum_{i=1}^{I} A_i} \qquad \forall t \in T, , \forall s \in S \qquad (۱۶)$$

$$\overline{IR}_t^s \le IR_t^{network} \qquad \forall t \in T, \forall s \in S \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{k=1}^{K} \left(x_{ikt} + y_{ikt}^s \right) = 1 \qquad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \qquad (۱۸)$$

$$x_{ikt} \in \{0,1\}, y_{ikt}^s \in \{0,1\}, IR_{it}^s \ge 0 \qquad (۱۹)$$

$$y_{ikt}^m = y_{ikt}^n \qquad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T, \forall n \in S, \forall m \in S, \; 1 \le m < n \le S, \xi_t^m = \xi_t^n \qquad (۲۰)$$

تابع هدف مدل که در معادله (۱۱) بیان شده است، فاصله وضعیت قطعات روسازی در مقطع زمانی پایانی برنامه‌ریزی را از وضعیت ایده‌آل از پیش تعیین شده، با توجه به تمامی سناریوهای بودجه و نرخ اضمحلال کمینه می کند. معادلات (۱۲) تا (۱۹) با این تفاوت که برای هر سناریو نوشته شده اند، مشابه معادلات (۳) تا (۱۱) می باشند. همچنین متغیر تصمیم x_{ikt} برای بخش قطعی بودجه و متغیر تصمیم y_{ikt}^s در مورد بخش غیرقطعی مسأله، یعنی سناریوهای مختلف بودجه اضافی و نرخ اضمحلال، تصمیم گیری می کنند. معادلات (۲۰) نشان‌دهنده معادلات قیود عدم ناهماهنگی هستند. اگر دو سناریوی m و n از مجموعه سناریوهای $S = \{1,2,\dots,s\}$ دارای اطلاعات یکسانی در یک مقطع زمانی مشخص باشند، آن دو سناریو در آن مقطع زمانی عملاً غیر قابل تفکیک و مشابه یکدیگر هستند و لذا باید متغیر تصمیم برای آن دو سناریو در آن مرحله مساوی یکدیگر باشند. به طور مثال در درخت سناریو شکل ۱، سناریوهای ۱ تا ۴ در سال اول غیرقابل تفکیک هستند. زیرا بودجه این سناریوها در مرحله اول با یکدیگر تفاوتی ندارند. در نتیجه بردارهای متغیر تصمیم در هر مرحله، نمی توانند به داده های تصادفی همه مراحل وابسته باشند. به طور مثال بردارهای تصمیم مرحله اول می بایست برای همه سناریوهایی که تا مقطع زمانی تصمیم مرحله اول اطلاعات یکسانی دارند، یکسان باشند. معادلات قیود عدم ناهماهنگی در واقع ربط‌دهنده تصمیم های سناریوهای مختلف می باشند.

جدول ۲. مشخصات اولیه قطعات شبکه
Table 2. The initial characteristics of network' sections

قطعه روسازی	طول(کیلومتر)	مساحت(متر مربع)	متوسط سالیانه حجم ترافیک روزانه (وسیله نقلیه بر روز)	طبقه عملکردی قطعه	وضعیت اولیه ناهمواری (متر بر کیلومتر)
۱	۶/۵۸	۹۰۱۴۶	۱۴۳۷۸	راه اصلی	۲/۴۵
۲	۲/۸۳	۵۸۷۷۱	۱۴۳۷۸	راه اصلی	۲/۸۸
۳	۳/۶۷	۴۸۷۵۹	۱۴۳۷۸	راه اصلی	۲/۴۱
۴	۷/۴۵	۹۵۳۶۰	۱۴۳۷۸	راه اصلی	۴/۳۰
۵	۳/۱۵	۴۳۳۰۵	۱۴۳۷۸	راه اصلی	۲/۳۲
۶	۳/۷۴	۵۱۲۳۸	۱۴۳۷۸	راه اصلی	۲/۹۰

۵- نتایج نمونه موردی

در این بخش نتایج حل مدل تصادفی برای یک شبکه با ۶ قطعه ارائه شده و با نتایج مدل قطعی مقایسه شده است. پیش از ارائه نتایج، شبکه موردی این پژوهش و سایر پارامترهای موردنیاز برای حل مسأله، معرفی شده است. مدل‌سازی و حل مسائل توسط نرم‌افزار سیستم مدل‌سازی جبری عمومی[1] ($GAMS$) و با استفاده از یک کامپیوتر لپ تاپ دارای پردازشگر ۷ هسته ای $2.8GHz$ و $4\ GB$ حافظه RAM اجرا شده است.

۵-۱- شبکه نمونه موردی

یک شبکه روسازی کوچک با ۶ قطعه روسازی آسفالتی، با طول کل تقریبی ۲۸ کیلومتر به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. این ۶ قطعه بخشی از مسیر جاده‌ای گرمسار-تهران در جنوب شرقی استان تهران می‌باشد. داده های قطعات این شبکه از پایگاه داده سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای اخذ شده است [۱]. مشخصات اصلی این شبکه کوچک مقیاس در ادامه ارائه می شود.

۵-۱-۱- مشخصات قطعات و وضعیت اولیه آن ها

همان‌طور که پیشتر در بخش ۳-۱ عنوان شد، شاخص بین‌المللی ناهمواری به عنوان شاخص عملکردی در این پژوهش در نظر گرفته شده است. مشخصات طول، مساحت، متوسط سالیانه حجم ترافیک روزانه، طبقه عملکردی و وضعیت اولیه شش قطعه شبکه در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است این ۶ قطعه بخشی از مسیر جاده‌ای گرمسار-تهران در جنوب شرقی استان تهران می‌باشند.

1 General Algebraic Modeling System (GAMS)

۵-۱-۲- انواع سیاست های نگهداری، هزینه و میزان تأثیر آن ها

در این پژوهش گزینه های عملیات نت شبکه روسازی به پنج گروه تقسیم بندی می شوند. این پنج گروه به ترتیب هزینه از کم به زیاد عبارتند از: بدون نیاز به عملیات، پیشگیرانه، بهسازی نوع ۱، بهسازی نوع ۲ و بازسازی. در میان این سیاست ها، سیاست گروه اول یعنی "بدون نیاز به عملیات" نشان‌دهنده این موضوع است که هیچ عملیات نت در آن مقطع زمانی روی روسازی مورد نظر انجام نمی شود. عملیات نت هر یک از ۴ سیاست باقیمانده به شرح زیر می باشند:

- پیشگیرانه: درزگیری، فاگ سیل[2]، چیپ سیل[3]، میکروسرفیسینگ[4] و اسلاری سیل[5]
- بهسازی نوع ۱: آماده سازی سطح و روکش یک لایه ای با بتن آسفالتی گرم، اجرای یک لایه ماسه آسفالت و یک لایه روکش آسفالت، اجرای روکش ۴ تا ۶ سانتی‌متری
- بهسازی نوع ۲: آماده سازی و روکش بیش از یک لایه با بتن آسفالتی گرم، بازیافت سرد و روکش، اجرای روکش ۸ تا ۱۲ سانتی‌متری
- بازسازی: برداشت لایه های آسفالتی، ترمیم اساس و اجرای لایه های آسفالتی

میانگین جهش عملکردی شاخص بین‌المللی ناهمواری از پژوهش های لو و تولیور [۲۶] و پترسون [۲۷] استخراج شده است. لو و تولیور میانگین جهش عملکردی عملیات پیشگیرانه را با بررسی

2 Fog Seal
3 Chip Seal
4 Micro surfacing
5 Slurry Seal

جدول ۳. هزینه و میزان بهبود ناهمواری ناشی از انجام هر یک از عملیات نت

Table 3. The unit cost and the improvement of each treatment

عملیات نت	هزینه (تومان بر مترمربع)	میزان بهبود ناهمواری (متر بر کیلومتر)
۱	۰	۰
۲	۵۰۰۰	۰/۳
۳	۱۵۰۰۰	۱/۲
۴	۳۲۰۰۰	۲
۵	۶۵۰۰۰	تغییر وضعیت به وضعیت روسازی نو ($IRI_{new=}$ ۱/۵)

داده های پایگاه داده $LTPP$ تخمین زدند [۲۶]. همچنین پترسون جهش عملکردی شاخص بین‌المللی ناهمواری ناشی از اجرای روکش آسفالتی با ضخامت های مختلف را به کمک بررسی داده های بانک جهانی برآورد کرد [۲۷].

هزینه بر اساس هزینه نوع عملیات نت به واحد طول یا مساحت روسازی مورد نظر، محاسبه می شود. در این پژوهش هزینه هر یک از عملیات از پایگاه داده سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای استخراج شده است [۱]. در ادامه میزان بهبود و هزینه تقریبی حاصل از انجام هر یک از عملیات نت در جدول ۳ ارائه شده است.

۵-۱-۳- نرخ اضمحلال روسازی

ضریب βدر مدل منحنی اضمحلال معادله (۱) در مطالعات لی و مدنت، اویانگ و مدنت و سیدالشهدایی و همکاران برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است [۱۰, ۱۶, ۲۲]. در این پژوهش نیز، برای حل مسأله در حالت قطعی، ضریب βدر مدل منحنی روند برابر ۰/۰۵ لحاظ شده است.

۵-۱-۴- بودجه

بودجه در تمامی سال ها برابر با ۱/۸ میلیارد تومان در نظر گرفته شده است. میزان بودجه تخصیصی به این قطعات در پایگاه داده سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای مشخص بوده و از این طریق استخراج شده است [۱]. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت پس از مشورت با کارشناسان سازمان راهداری، ۲۰ درصد کاهش بودجه در بحث سناریوهای عدم قطعیت اعمال می شود. لذا عدم قطعیت بودجه با در نظر گرفتن ۲ سناریوی بودجه اختصاص داده شده (۱/۸ میلیارد تومان) و ۲۰ درصد کاهش در بودجه تخصیصی (۱/۴۴ میلیارد تومان) دیده می شود. همچنین حداقل بودجه برابر دو سوم بودجه اختصاص داده شده (۱/۲ میلیارد تومان) فرض شده است. بنابراین در واقع در مدل برنامه‌ریزی تصادفی، میزان بودجه حداقل (B_t^{min}) برابر ۱/۲ میلیارد تومان و دو سناریوی عدم قطعیت در مورد بودجه اضافی ($\tilde{B}_t^s$) برابر با ۲۴۰ و ۶۰۰ میلیون تومان می باشند.

۵-۱-۵- دوره برنامه‌ریزی

در این پژوهش، یک دوره برنامه‌ریزی پنج ساله در نظر گرفته شده است که به طور فرضی عملیات نت در ابتدای هر سال اعمال می شوند. همچنین در هر سال، تنها یک عملیات نت برای هر قطعه انتخاب می شود.

۵-۱-۶- سایر محدوده های شاخص بین‌المللی ناهمواری مورد نیاز مسأله

در این پژوهش، کمینه و بیشینه شاخص بین‌المللی ناهمواری در مورد وضعیت هر قطعه در هر سال، به کمک محدوده های تعریف شده توسط بانک جهانی برای راه های نو و کارکرده، برابر صفر و ۴ متر بر کیلومتر در نظر گرفته شده است [۲۸]. همچنین ناهمواری ایده‌آل مدنظر در سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای ایران در سال پایانی دوره برنامه ریزی برابر ۲/۲ متر بر کیلومتر لحاظ شده است [۱].

۵-۲- نتایج مدل قطعی

حل مسائل قطعی و تصادفی توسط حل کننده $CPLEX$در نرم‌افزار $GAMS$صورت گرفته است. جواب بهینه بدست آمده از وضعیت قطعات روسازی در سال های مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین جزییات برنامه عملیات نت با بودجه قطعی برابر با ۱/۸ میلیارد تومان در جدول ۵ نشان داده شده است. در این جدول

جدول ۴. شاخص بین‌المللی ناهمواری قطعات روسازی در طول دوره برنامه‌ریزی

Table 4. The international roughness index of pavement sections in the analysis period

قطعه روسازی / سال	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۲/۵۷	۲/۷۰	۲/۵۵	۲/۳۸	۲/۲۰
۲	۳/۰۲	۳/۱۸	۳/۳۵	۲/۳۲	۲/۱۴
۳	۲/۵۳	۲/۳۶	۲/۱۹	۲/۳۰	۲/۱۱
۴	۳/۳۲	۲/۲۹	۲/۱۱	۲/۲۲	۲/۳۳
۵	۲/۱۳	۲/۲۵	۲/۰۶	۲/۱۷	۲/۲۸
۶	۳/۰۴	۳/۲۱	۳/۰۷	۳/۲۳	۲/۱۹

جدول ۵. تصمیمات بهینه برنامه عملیات برای بودجه قطعی

Table 5. The optimal solutions of the deterministic budget model

قطعه	سال	نوع عملیات نت				
		بدون عملیات	پیشگیرانه	بهسازی نوع ۱	بهسازی نوع ۲	بازسازی
۱	۱	۱				
۱	۲	۱				
۱	۳		۱			
۱	۴		۱			
۱	۵		۱			
۲	۱	۱				
۲	۲	۱				
۲	۳	۱				
۲	۴			۱		
۲	۵		۱			
۳	۱	۱				
۳	۲		۱			
۳	۳		۱			
۳	۴	۱				
۳	۵		۱			
۴	۱			۱		
۴	۲			۱		
۴	۳		۱			
۴	۴	۱				
۴	۵	۱				
۵	۱		۱			
۵	۲	۱				
۵	۳		۱			
۵	۴	۱				
۵	۵	۱				
۶	۱	۱				
۶	۲	۱				
۶	۳		۱			
۶	۴	۱				
۶	۵			۱		

جدول ۶. شاخص بین‌المللی ناهمواری قطعات روسازی در طول دوره برنامه‌ریزی با توجه به وقوع سناریوهای مختلف

Table 6. The international roughness index of pavement sections among various scenarios in the analysis period

قطعه و سال	سناریوها															
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۱. سال ۱	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸
۱. سال ۲	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱
۱. سال ۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳
۱. سال ۴	۲/۳۵	۲/۳۵	۲/۳۵	۲/۳۵	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۵	۲/۳۵	۲/۳۵	۲/۳۵	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۳۶	۲/۳۶
۱. سال ۵	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۴۸	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۱۸	۲/۱۸
۲. سال ۱	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳
۲. سال ۲	۳/۱۸	۳/۱۸	۳/۱۸	۳/۱۸	۳/۱۸	۳/۱۸	۳/۱۸	۳/۱۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸
۲. سال ۳	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۳/۳۵	۳/۳۵	۳/۳۵	۳/۳۵	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹
۲. سال ۴	۲/۲۶	۲/۲۶	۲/۲۶	۲/۲۶	۳/۲۲	۳/۲۲	۲/۳۲	۲/۳۲	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹
۲. سال ۵	۲/۳۷	۲/۰۷	۲/۳۷	۲/۰۷	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۱۴	۲/۱۴	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰
۳. سال ۱	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳
۳. سال ۲	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶
۳. سال ۳	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۸۰	۲/۸۰	۲/۸۰	۲/۸۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰
۳. سال ۴	۲/۶۳	۲/۶۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۹۴	۲/۹۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳
۳. سال ۵	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۱/۹۰	۱/۹۰	۲/۴۸	۲/۴۸	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵

	سناریوها															
	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲
۱. سال ۱	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۵۸
۱. سال ۲	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱
۱. سال ۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳
۱. سال ۴	۲/۳۵	۲/۳۵	۲/۳۵	۲/۳۵	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۶۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶
۱. سال ۵	۲/۴۷	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۵۰	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۱۸
۲. سال ۱	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۳
۲. سال ۲	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸
۲. سال ۳	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۰۹
۲. سال ۴	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۲/۱۹
۲. سال ۵	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰
۳. سال ۱	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۳
۳. سال ۲	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵
۳. سال ۳	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۱/۸۵	۱/۸۵	۱/۸۵	۱/۸۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵
۳. سال ۴	۲/۲۶	۲/۲۶	۲/۲۶	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۶

عدد ۱ نشان‌دهنده این موضوع است که این نوع عملیات نت برای یک قطعه در سال مورد نظر انتخاب شده است. به طور مثال در مورد قطعه دوم همان‌طور که در جدول ۵ مشخص شده است، در سال های اول تا سوم عملیاتی انجام نشده، در سال چهارم عملیات بهسازی نوع ۱ و در نهایت در سال پنجم عملیات پیشگیرانه انتخاب شده است. از همین رو، همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، قطعه ۲ در طول سال های اول تا سوم زوال پیدا کرده و از وضعیت ناهمواری ۳/۰۲ متر بر کیلومتر به وضعیت ۳/۳۵ رسیده است. در سال چهارم به دلیل انجام عملیات بهسازی نوع ۱ وضعیت بهبود یافته و به ۲/۳۲ متر بر کیلومتر و در سال پنجم نیز با اندکی بهبود به ۲/۱۴ متر بر کیلومتر رسیده است. سلول‌هایی از این جدول که با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند، در واقع نشان‌دهنده سالی هستند که عملیات نت بر روی قطعه مورد نظر انجام شده و شاخص بین‌المللی ناهمواری بهبود داشته است. شایان ذکر است با توجه به نتایج جدول ۵ برای قطعه ۴ در دو سال متوالی اول و دوم گزینه بهسازی نوع ۱ پیشنهاد شده است که این موضوع از دید عملیاتی کمی با چالش مواجه می‌باشد و می‌بایست بیان کرد که این امر از محدودیت‌های مدل بوده و می‌توان با افزودن قیود عملیاتی و کاربردی این محدودیت‌ها را تا حد امکان از بین برد. به طور مثال، اضافه کردن قیدی که در طول دو، سه یا چند سال متوالی عملیات سنگین نگهداری نظیر بهسازی نوع ۱ و نوع ۲ برای یک قطعه تنها یک بار مجاز به انتخاب شدن باشد که این موضوع می‌تواند در پژوهش‌های آینده در نظر گرفته شود.

۵-۳- نتایج مدل برنامه‌ریزی تصادفی

این مسأله ۳۲=2^5 سناریو مختلف مشابه درخت سناریو شکل ۱ را دارا می باشد. در این شکل بودجه حالت اول بیانگر بودجه ۱/۴۴ میلیارد و بودجه حالت دوم نشان دهنده ۱/۸ میلیارد می باشد. با فرض احتمال وقوع برابر برای تمامی سناریوها، هر سناریو با احتمال ۰/۰۳۱۲۵ اتفاق می افتد.

جواب بهینه بدست آمده از مسأله برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله ای در مورد وضعیت قطعات روسازی با توجه به سال ها و سناریوهای مختلف در جدول ۶ نشان داده شده است. به جهت جلوگیری از طولانی شدن این جدول اطلاعات وضعیت قطعات در طول دوره برنامه‌ریزی برای ۳ قطعه اول ارائه شده است. به طور مثال در مورد قطعه دوم در سال چهارم، وضعیت ناهمواری قطعه با توجه به وقوع سناریوهای مختلف از کمینه ۲/۱۹ (سناریوهای ۹ تا ۳۲) تا بیشینه ۳/۲۲ (سناریوی ۵ و ۶) متر بر کیلومتر متغیر بوده و میانگین وضعیت برای تمامی سناریوها برابر ۲/۲۷ متر بر کیلومتر می باشد.

برنامه عملیات نت در مورد بودجه حداقل و همچنین سناریوهای مختلف بودجه اضافی در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است. برای ارائه نتایج به صورت مختصر، تنها عملیات نوع دوم تا پنجم در جداول زیر آورده شده و سال هایی که عملیاتی برای آن ها در جدول مشخص نشده است، در واقع بدون نیاز به عملیات می باشند.

جدول ۷ نشان‌دهنده این موضوع است که با توجه به بودجه حداقل، کدام برنامه عملیات در اولویت قرار داشته و فارغ از این که بودجه اضافی به چه میزان است، عملیات انتخاب شده به صورت قطعی باید اجرا شود. در ادامه در جدول ۸ سایر عملیات مورد نیاز با توجه به سناریوهای مختلف بودجه اضافی انتخاب شده اند. به طور مثال قطعه دوم در سال دوم در صورت وقوع سناریوهای ۱ تا ۸ بدون نیاز به عملیات بوده و در صورت وقوع سناریوهای ۹ تا ۳۲ عملیات بهسازی نوع ۱ برای آن انجام می پذیرد. ستون آخر جدول ۸ نشان می دهد هر یک از عملیات منتخب، در چند درصد از سناریوها پیشنهاد شده اند. در واقع اگر یک عملیات در یک سال برای ۱۰۰ درصد سناریوها انتخاب شود، می توان آن عملیات را مشابه عملیات منتخب در جدول ۷ تلقی کرد، زیرا فارغ از وقوع هر یک از سناریوها، آن عملیات در تمامی حالات می بایست انجام شود.

جدول ۷. برنامه عملیات نت برای شبکه موردی با توجه به بودجه حداقل (x_{ikt})

Table 7. The treatment modes of implementation for the case study under minimum budget scenario

قطعه و سال	نوع عملیات	
	پیشگیرانه	بهسازی نوع ۱
۱- سال ۲	۱	
۴- سال ۱		۱

جدول ۸. برنامه عملیات نت با توجه به سناریوهای بودجه اضافی (y^s_{itk})

Table 8. The maintenance planning in the additional budget scenario

سال و																																		درصد
نوع عملیات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	وقوع
قطعه ۱																																	
سال ۳ نوع ۲	۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱													۳۷/۵
سال ۴ نوع ۲					۱	۱	۱	۱							۱	۱					۱	۱			۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۵۰
سال ۵ نوع ۲	۱	۱	۱	۱		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹۳/۸
قطعه ۲																																	
سال ۲ نوع ۳									۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷۵
سال ۳ نوع ۳	۱	۱	۱	۱																													۱۲/۵
سال ۴ نوع ۲					۱	۱																											۶/۲۵
سال ۴ نوع ۳							۱	۱																									۶/۲۵
سال ۵ نوع ۲		۱		۱			۱	۱																									۱۲/۵
سال ۵ نوع ۳					۱	۱																											۶/۲۵
قطعه ۳																																	
سال ۱ نوع ۲																	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۵۰
سال ۲ نوع ۲																	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۵۰
سال ۳ نوع ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱									۵۰
سال ۴ نوع ۲			۱	۱	۱	۱	۱	۱			۱	۱	۱	۱	۱	۱									۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۶۲/۵
سال ۵ نوع ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱			۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱															۵۰
سال ۵ نوع ۳									۱	۱																							۶/۲۵
سال و																																	درصد
نوع عملیات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	وقوع
قطعه ۴																																	
سال۲ نوع ۲									۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱									۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۵۰
سال ۳ نوع ۲																	۱	۱	۱	۱													۱۲/۵

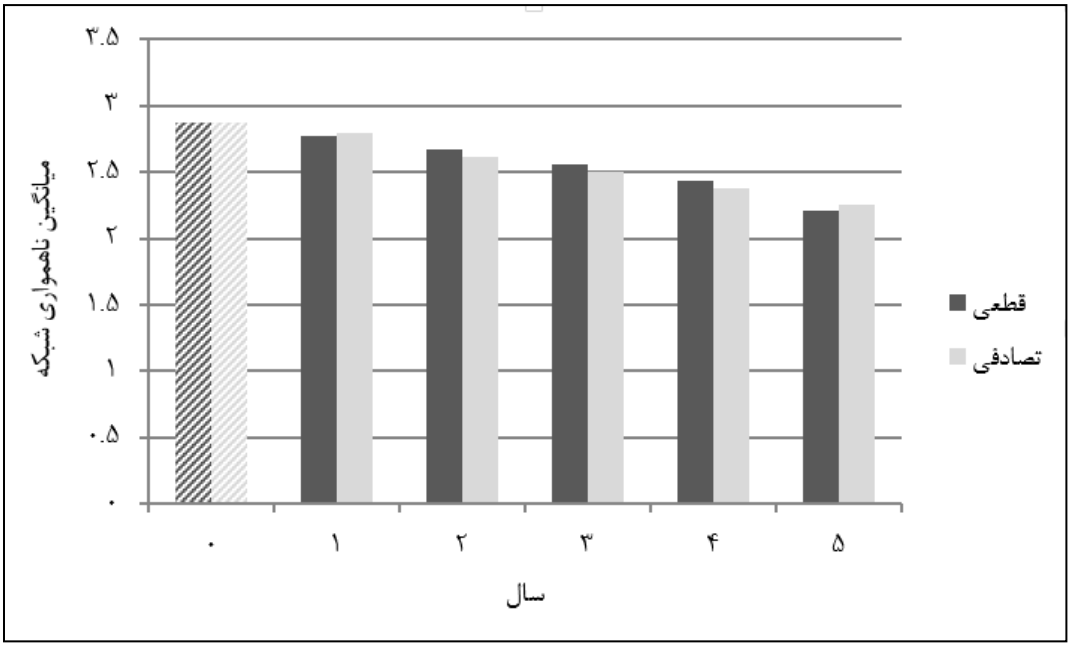
جدول ۸. برنامه عملیات نت با توجه به سناریوهای بودجه اضافی (y^s_{itk})

Table 8. The maintenance planning in the additional budget scenario

سال و	سناریو																															درصد
نوع عملیات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	وقوع
سال ۳ نوع ۳					۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۶۲/۵
سال ۴ نوع ۲					۱	۱	۱	۱															۱	۱									۱۸/۸
سال ۴ نوع ۳	۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱													۳۷/۵
سال ۵ نوع ۲	۱	۱	۱	۱				۱		۱	۱	۱	۱	۱		۱				۱	۱	۱	۱	۱			۱	۱					۵۶/۳
قطعه ۵																																	
سال ۲ نوع ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱																	۵۰
سال ۳ نوع ۲									۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱													۲۵
سال ۴ نوع ۲													۱	۱	۱	۱			۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۵۶/۳
سال ۵ نوع ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱									۱	۱			۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۶۸/۸
قطعه ۶																																	
سال ۲ نوع ۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱																									۲۵
سال ۳ نوع ۲																	۱	۱	۱	۱									۱	۱	۱	۱	۲۵
سال ۳ نوع ۳									۱	۱	۱	۱																					۱۲/۵
سال ۴ نوع ۲																									۱	۱							۶/۲۵
سال ۴ نوع ۳													۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱			۱	۱					۳۱/۳
سال ۵ نوع ۲									۱		۱	۱	۱	۱	۱	۱					۱	۱	۱	۱			۱	۱					۴۰/۶
سال ۵ نوع ۳																	۱	۱	۱	۱					۱	۱			۱	۱	۱	۱	۳۱/۳

جدول ۹. درصد هریک از عملیات تخصیص داده شده به قطعات شبکه در کل طول دوره برنامه‌ریزی
Table 9. The percentage of each treatment assigned to pavement sections in the analysis period

نوع عملیات	قطعی	تصادفی
بدون انجام عملیات	۵۰	۴۷/۳۹
پیشگیرانه	۳۶/۶۷	۴۰/۹۱
بهسازی نوع ۱	۱۳/۳۳	۱۱/۷
بهسازی نوع ۲	۰	۰
بازسازی	۰	۰



شکل ۳. میانگین وضعیت قطعات شبکهدر طول دوره برنامه‌ریزی برای روش های قطعی و تصادفی
Fig. 3. The average value of pavements condition for deterministic and uncertainty budget model

به منظور مقایسه دو روش، درصد هریک از عملیات نت که در کل طول دوره برنامه‌ریزی به قطعات شبکه تخصیص داده شده است در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می دهد که مدل برنامه‌ریزی تصادفی بودجه بیشتری را صرف عملیات پیشگیرانه کرده است. دلیل این امر می‌تواند این موضوع باشد که مدل تصادفی با تقسیم بودجه موجود بین تعداد قطعات بیشتر به وسیله تخصیص تعداد عملیات پیشگیرانه، سعی دارد اثرات زیان‌بار کاهش احتمالی بودجه را کنترل کند.

در شکل ۲ میانگین وضعیت قطعات شبکه در طول دوره برنامه‌ریزی برای روش های قطعی و تصادفی نشان داده شده است. به طور مثال در جواب ارائه شده توسط مدل قطعی، میانگین ناهمواری شبکه از ۲/۸۷ متر بر کیلومتر در سال صفر به ۲/۲۵ متر بر کیلومتر در سال پایانی می رسد. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، روش برنامه‌ریزی تصادفی با وجود در نظر گرفتن عدم قطعیت بودجه، به خوبی به هدف مورد نظر مسأله رسیده است و از لحاظ وضعیت قطعات شبکه در طول دوره برنامه‌ریزی توانسته است عملکردی مشابه روش قطعی داشته باشد. همچنین میزان هزینه صرف شده در روش قطعی و میانگین هزینه ۳۲ سناریو روش تصادفی برای نگهداری قطعات شبکه در طول دوره برنامه‌ریزی در جدول ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است، روش تصادفی به دلیل لحاظ کردن عدم قطعیت و کاهش بودجه، برای یافتن جواب بهینه‌ای که تمامی قیود مسأله را نیز رعایت کند در مجموع هزینه کمتری صرف کرده است و

جدول ۱۰. میزان هزینه صرف شده در طول دوره برنامه‌ریزی برای روش‌های قطعی و تصادفی
Table 10. The total cost that spends on the network in deterministic and uncertainty budget models

سال		۱	۲	۳	۴	۵	مجموع
هزینه	قطعی	1646927000	1674199000	1644046000	1332295000	1656954000	7954421000
	تصادفی	1552299500	1547609250	1531469375	1429989513	1412068497	7473436134

این امر توانایی این روش در کنترل نواسانات بودجه را نشان می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

تعیین یک برنامه مناسب عملیات نت یکی از مهمترین گام های صورت گرفته در یک سیستم مدیریت روسازی است. روش های مختلف بهینه‌سازی، با استفاده از تحلیل عملکرد روسازی و محاسبه هزینه های نگهداری و ترمیم، بر اساس بهینه کردن اهداف تصمیم‌گیران، مناسب ترین رویکرد نگهداری را برای اجرا انتخاب می کنند. به علاوه، بودجه نگهداری راه ها به دلایل مختلف سیاسی و اقتصادی در طول سالیان متمادی با نوسانات زیادی همراه بوده است. در صورت در نظر نگرفتن عدم قطعیت موجود در بودجه، برنامه عملیات بهینه بدست آمده ممکن است با برنامه بهینه واقعی تفاوت زیادی داشته و همه یا بخشی از آن غیرقابل اجرا باشد.

هدف این پژوهش، برنامه‌ریزی بهینه عملیات نت روسازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در بودجه می باشد. این مسأله به کمک روش برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله ای عدد صحیح مدل شده است. تفاوت مدل برنامه‌ریزی تصادفی با مدل قطعی از این لحاظ است که مدل تصادفی سعی در یافتن بهترین برنامه عملیات نت با توجه به تمامی حالات عدم قطعیت دارد. عدم قطعیت موجود در بودجه به شکلی عملیاتی و به این صورت در نظر گرفته شده است که بودجه به دو قسمت تقسیم شده به طوری که قسمت اول، بخش قطعی و حداقل بودجه می باشد که در مورد عملیاتی که اولویت بالایی دارند تصمیم‌گیری می کند و بخش اضافی بودجه به صورت چند سناریو به حداقل بودجه اضافه می شود. مهم‌ترین ویژگی این رویکرد، تعیین عملیات مشخص در هر سال برای هر یک از قطعات شبکه علاوه بر در نظر گرفتن عدم قطعیت ذکرشده می باشد و لذا از بودجه موجود به صورت بهینه استفاده می شود. این موضوع برای سازمان های متولی راه می تواند بسیار ارزشمند باشد.

نتایج روش برنامه‌ریزی تصادفی برای یک شبکه نمونه موردی با ۶ قطعه ارائه شده است. برنامه عملیات نت برای هر قطعه با توجه به وقوع هر سناریو تعیین شده و وضعیت هر قطعه روسازی با توجه به عملیات انجام شده در هر سال مشخص شده است. نتایج نشان‌دهنده این موضوع بودند که مدل برنامه‌ریزی تصادفی، نوسانات بودجه را در نظر گرفته و راه حلی ارائه می کند که برای سناریوهای مختلف بهینه باشد. مقایسه نوع عملیات پیشنهاد شده توسط مدل های تصادفی و قطعی مؤید این نکته است که مدل تصادفی در طول دوره برنامه‌ریزی منابع بیشتری را به عملیات پیشگیرانه اختصاص می دهد؛ به طوری که درصد ۳ عملیات اول یعنی بدون انجام عملیات، پیشگیرانه و بهسازی نوع ۱ به ترتیب از ۵۰، ۳۶/۶۷ و ۱۳/۳۳ برای مدل قطعی به ۴۷/۳۹، ۴۰/۹۱ و ۱۱/۷ برای مدل تصادفی می رسد. این اتفاق از این موضوع نشأت گرفته است که مدل تصادفی به جهت کاهش اثرات منفی افت احتمالی بودجه، بودجه موجود را به تعداد قطعات بیشتری از طریق انتخاب عملیات پیشگیرانه تقسیم می کند. همچنین بررسی وضعیت قطعات شبکه در طول دوره برنامه‌ریزی نشان داد در مدل قطعی میانگین ناهمواری شبکه از ۲/۸۷ در سال صفر به ۲/۲۱ متر بر کیلومتر در سال پایانی و در مدل تصادفی از ۲/۸۷ در سال صفر به ۲/۲۵ متر بر کیلومتر در سال پایانی می رسد. لذا نتایج بدست آمده نشان می دهد مدل تصادفی با وجود در نظر گرفتن عدم قطعیت بودجه، به خوبی وضعیت قطعات شبکه را کنترل می کند.

به دلیل پیچیدگی محاسباتی مدل های برنامه‌ریزی عدد صحیح و افزایش تعداد حالات ممکن مسأله به صورت نمایی برای شبکه های بزرگ و واقعی، ارائه روش ها و تکنیک هایی برای کاهش تعداد متغیرها و کوچک کردن فضای جواب مسأله و در نهایت، حل مسائل برنامه‌ریزی عملیات نت شبکه های بزرگ مقیاس به عنوان موضوع پیشنهادی برای پژوهش های آینده بسیار ارزشمند به نظر می‌رسد. به علاوه، رفع برخی دیگر از محدودیت‌های این پژوهش نظیر استفاده از

سایر شاخص‌های عملکردی روسازی مانند شاخص وضعیت روسازی به جهت انتخاب عملیات نت و همچنین افزودن قیود عملیاتی مانند انتخاب نشدن عملیات پرهزینه و سنگین در طی سال‌های متوالی با توجه به محدودیت‌ها در منابع اجرایی و عمر مؤثر عملیات نت می‌تواند موارد بسیار مفیدی برای در نظر گرفتن در پژوهش‌های آینده باشد.

مراجع

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

[2] K. Golabi, R.B. Kulkarni, G.B. Way, A Statewide Pavement Management System, Interfaces, 12 (1982) 5-21.

[3] J.M. de la Garza, S. Akyildiz, D.R. Bish, D.A. Krueger, Network-level optimization of pavement maintenance renewal strategies, Advanced Engineering Informatics, 25 (2011) 699-712.

[4] J.R. Mbwana, M.A. Turnquist, Optimization modeling for enhanced network-level pavement management system, Transportation Research Record, (1996).

[5] F. Guignier, S. Madanat, Optimization of infrastructure systems maintenance and improvement policies, Journal of Infrastructure Systems, 5 (1999) 124-134.

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

[7] R. Denysiuk, A.V. Moreira, J.C. Matos, J.R.M. Oliveira, A. Santos, Two-stage multiobjective optimization of maintenance scheduling for pavements, Journal of Infrastructure Systems, 23 (2017).

[8] N. Li, R. Haas, W.-C. Xie, Investigation of Relationship Between Deterministic and Probabilistic Prediction, Transportation Research Record, 1592 (1997) 70-79.

[9] 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.

[10] 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.

[11] P. Chakroborty, P.K. Agarwal, A. Das, Comprehensive pavement maintenance strategies for road networks through optimal allocation of resources, Transportation Planning and Technology, 35 (2012) 317-339.

[12] J. France-Mensah, J. O'Brien William, Budget Allocation Models for Pavement Maintenance and Rehabilitation: Comparative Case Study, Journal of Management in Engineering, 34 (2018) 5018002.

[13] M. Al-Amin, Impact of budget uncertainty on network-level pavement condition : a robust optimization approach, in, 2013.

[14] K.D. Kuhn, S.M. Madanat, Model uncertainty and the management of a system of infrastructure facilities, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 13 (2005).

[15] L. Gao, Z. Zhang, Robust Optimization for Managing Pavement Maintenance and Rehabilitation, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2084 (2009) 55-61.

[16] 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.

[17] M. Ng, Z. Zhang, S. Travis Waller, The price of uncertainty in pavement infrastructure management planning: An integer programming approach, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 19 (2011) 1326-1338.

[18] L. Gao, R. Guo, Z. Zhang, An augmented Lagrangian decomposition approach for infrastructure maintenance and rehabilitation decisions under budget uncertainty, Structure and Infrastructure Engineering, (2011).

[19] M. Fakhri, M. Alaleh, A. Edrisi, Maintenance and rehabilitation model for pavement considering user cost, Transporation Engineering Journal, 7 (2015) 523-540.

[20] 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).

[21] 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.

[22] 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.

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

[24] L. Samuel, C. Sinha Kumares, Effectiveness of Highway Pavement Seal Coating Treatments, Journal of Transportation Engineering, 130 (2004) 14-23.

[25] S. Labi, K.C. Sinha, Measures of short-term effectiveness of highway pavement maintenance, Journal of Transportation Engineering, 129 (2003) 673-683.

[26] 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.

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

[28] 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).

پیوست ۱: نمادگذاری

مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای استفاده شده در مدل های ریاضی در جدول پ-۱ معرفی شده است.

مجموعه ها	
I	مجموعه قطعات شبکه روسازی، $I = \{1,2,3, \dots, I\}$
T	مجموعه دوره زمانی برنامه ریزی$\{1,2,3, \dots, T\} = T$،
K	مجموعه عملیات نت، $K = \{1,2,3, \dots, K\}$، که عملیات K بیشترین تأثیر و در عین حال بیشترین هزینه را دارا می باشد.
S	مجموعه سناریوها در حالت عدم قطعیت، $S = \{1,2,3, \dots, S\}$
پارامترها	
IR_{i0}	ناهمواری اولیه قطعه i
IR_{it}	ناهمواری قطعه i در زمان t
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_{new}	ناهمواری قطعه پس از انجام عملیات بازسازی
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
A_i	مساحت قطعه i
$AADT_i$	متوسط سالیانه حجم ترافیک روزانه قطعه i
β	نرخ اضمحلال قطعه i در مدل منحنی روند
β^s	نرخ اضمحلال قطعه i در مدل منحنی روند برای سناریوی s
B_t	بودجه موجود برای مدیریت عملیات نت در سال t
B_t^{min}	حداقل بودجه در سال t که قطعا محقق می شود.
$\widetilde{\boldsymbol{B}}_{\boldsymbol{t}}^{\boldsymbol{s}}$	بودجه اضافی با توجه به سناریوی s در سال t

پارامترها	
p^s	احتمال وقوع سناریوی s
ξ_t	پدیده عدم قطعی در مرحله t
C_{ikt}	هزینه واحد انجام عملیات نت نوع k به قطعه i در سال t
e_{ik}	میزان بهبود ناهمواری قطعه i به دلیل انجام عملیات نت نوع k
N_{ik}	بیشینه تعداد مجاز انجام عملیات نت نوع k به قطعه i در طول دوره برنامه ریزی
d	نرخ تورم
متغیرها	
x_{ikt}	متغیر تصمیم دودویی، نشان‌دهنده انجام عملیات نوع k در زمان t به قطعه i
y_{ikt}^s	متغیر تصمیم دودویی، نشان‌دهنده انجام عملیات نوع k در زمان t به قطعه i در سناریوی s

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Golroo, A.H. Fani, H. Naseri, S.A. Mirhassani, Pavement Maintenance and Rehabilitation Planning Considering Budget Uncertainty, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 2781-2800.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17502.6583