



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

امیر گلرو<sup>۱\*</sup>، امیرحسین فانی<sup>۱</sup>، حامد ناصری<sup>۱</sup>، سید علی میرحسینی<sup>۲</sup>

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

### 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

**خلاصه:** برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر روسازی نقش بسزایی در اجرای کارآمد سیستم مدیریت روسازی ایفا می‌کند. این مسأله معمولاً با فرض قطعی بودن تمامی پارامترهای موجود بررسی می‌شود. 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 سیاست‌ها 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، برنامه‌ریزی 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 برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای عدد صحیح خطی که هدف آن یافتن جوابی است که برای تمامی حالات عدم قطعیت امکان پذیر و بهینه باشد، ارائه می‌شود. 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 می‌کند که برای سناریوهای مختلف بهینه باشد. مقایسه نوع عملیات انتخاب شده توسط مدل‌های 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.

### ۱- مقدمه

حمل و نقل شناخته‌شده [۱]. یکی از اهداف کلیدی یک سیستم مدیریت روسازی، به تأخیر انداختن خرابی و افزایش عمر مفید شبکه راه‌ها از طریق انجام عملیات نت مختلف می‌باشد. این هدف از طریق بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیات نت روسازی در سطوح شبکه و پروژه صورت می‌پذیرد. مدیریت در سطح شبکه نیازهای کل شبکه را مد نظر قرار می‌دهد. در مدیریت در سطح پروژه، هدف، انتخاب بهترین گزینه برای هر پروژه است و به جزئیات روش‌های اجرایی، هزینه‌ها، منابع مورد نیاز و محدودیت‌ها پرداخته می‌شود. تخصیص بودجه به صورت بهینه از طریق اجرای درست فرآیند بهینه‌سازی امکان‌پذیر است [۲].

طبق آمار سازمان راه‌داری و حمل و نقل جاده‌ای، حدود ۹۷ درصد از حمل و نقل مسافری و ۹۱ درصد از حمل و نقل باری کل کشور از طریق حمل و نقل جاده‌ای صورت پذیرفته است. این حجم بالای حمل و نقل موجب پایین آمدن سطح سرویس راه‌ها، افزایش هزینه‌های عملیات نگهداری و تعمیر (نت) و بالا رفتن تعداد تصادفات می‌شود. بالا رفتن نرخ اضمحلال روسازی، بالا رفتن تقاضا و محدود بودن بودجه در دسترس همگی سبب می‌شود مدیریت روسازی به عنوان یکی از مهمترین بخش‌های مدیریت زیرساخت

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



عمل می کنند. زنجیره مارکوف معمول ترین روش مدل سازی عملکرد روسازی به صورت احتمالاتی است. مدل سازی بر اساس فرآیند تصمیم گیری مارکوف، معمولاً منجر به یک مدل برنامه ریزی 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.

مدل سازی مسأله مدیریت روسازی در سطح شبکه به صورت برنامه ریزی خطی عموماً با استفاده از فرآیند تصمیم گیری مارکوف صورت می پذیرد. در مدل های مارکوفی غالباً 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 برنامه ریزی 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 بین المللی ناهمواری<sup>۲</sup> و شاخص وضعیت روسازی<sup>۳</sup>) 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.

گلایبی 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 تصمیم گیری مارکوف پنهان<sup>۴</sup> به منظور تعیین عملیات نت استفاده شده است. در مدل عادی مارکوف، اندازه گیری وضعیت قطعات بدون خطا و به صورت

در سطح شبکه، مدل های ریاضی مختلفی برای برنامه ریزی 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 پیش بینی 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 ۱۳۹۷ رسیده 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 بهینه سازی مختلفی برای حل مسأله بهینه سازی برنامه ریزی عملیات نت روسازی به کار گرفته شده است. در حال حاضر دو رویکرد عمده و مهم در ادبیات بهینه سازی برنامه ریزی عملیات نت وجود دارد. در رویکرد اول معمولاً تمامی پارامترها قطعی و فاقد عدم قطعیت در نظر گرفته می شوند. مدل های برنامه ریزی عدد صحیح پرکاربردترین مدل ها در این زمینه هستند.

در رویکرد دیگر بهینه سازی، 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 تصمیم گیری مارکوف<sup>۱</sup>

2 International Roughness Index (IRI)

3 Pavement Condition Index (PCI)

4 Hidden Markov Decision Process

1 Markov Decision Process (MDP)

بررسی قرار گرفت [۱۰]. چاکروپورتی 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<sup>۴</sup> و تعمیمی از درخت تصمیم<sup>۵</sup> 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 می‌باشند. 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 آن‌ها مشهود می‌باشد.

در مورد بودجه، ادارات و سازمان‌های متولی راه در طول سالیان متمادی نوسانات زیادی را در مقدار بودجه پیش‌بینی شده به دلایل مختلف سیاسی و اقتصادی تجربه کرده‌اند. 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 می‌تواند از کارایی مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیات نت بکاهد [۱۳].

روش‌های گوناگونی برای مواجهه با عدم قطعیت و پیامدهای ناشی از وجود عدم قطعیت تاکنون معرفی شده‌اند که برخی از آن‌ها عبارتند از: برنامه‌ریزی تصادفی<sup>۶</sup>، برنامه‌ریزی احتمالاتی<sup>۷</sup>، بهینه‌سازی استوار<sup>۸</sup>، برنامه‌ریزی فازی<sup>۹</sup>، بهینه‌سازی با استفاده از قیود ریسک و غیره. در جدول ۱ خلاصه‌ای 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

قطعی فرض می‌شود. در حالی که یک مدل پنهان مارکوف می‌تواند عدم قطعیت در اندازه‌گیری وضعیت قطعات را در نظر بگیرد [۵]. در پژوهش‌ها و فلینچ یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه که به طور همزمان میانگین وزنی وضعیت قطعات شبکه و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را بهینه می‌کند، به کار گرفته شده است [۶].

در پژوهش‌های زیادی مسأله بهینه‌سازی مدیریت روسازی در سطح شبکه به صورت یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح یا برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته<sup>۱</sup> (برخی از متغیرها گسسته و برخی پیوسته) با متغیرهای تصمیم صفر و یک مدل شده است. راه حل بدست آمده از این مدل نشان می‌دهد به کدام قطعه، در چه زمانی و چه نوع عملیات نت اختصاص یابد. لذا برنامه عملیات نت برای هر قطعه به صورت جداگانه ارائه می‌شود. این مدل‌ها معمولاً از نوع زمان-گسسته هستند. رویکرد این مقاله نیز در مورد حل مسأله مدیریت عملیات نت، مدل‌سازی آن به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح می‌باشد. در مدل‌های 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 شبکه‌های بزرگ مقیاس<sup>۲</sup> دشوار می‌گردد [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 می‌باشد. یک شبکه با ۵ قطعه روسازی نمونه موردی این پژوهش می‌باشد [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 آن‌ها بیشینه‌سازی میزان کارایی عملیات نت و کمینه‌سازی هزینه‌های وارد شده به کاربران را به صورت همزمان در نظر می‌گرفت. این مدل برای در یک شبکه کوچک با ۱۰ قطعه روسازی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت [۹]. اوپانگ و مدننت به ارائه برنامه عملیات بازسازی در سطح شبکه پرداختند و برای حل مسأله از روش شاخه و کران و یک الگوریتم فراابتکاری حریمانه<sup>۳</sup> استفاده کردند. ارائه برنامه بازسازی یک سیستم با سه قطعه روسازی توسط مدل اوپانگ و مدننت مورد

4 Cost-Benefit Analysis

5 Decision Tree

6 Stochastic Programming

7 Probabilistic Programming

8 Robust Optimization

9 Fuzzy Programming

1 Mixed Integer Programming

2 Large-Scale Network

3 Greedy Metaheuristic

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

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

موجود در بودجه می باشد. به منظور دست‌یابی به این هدف، مسأله به صورت یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله ای عدد صحیح<sup>۱</sup> 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.

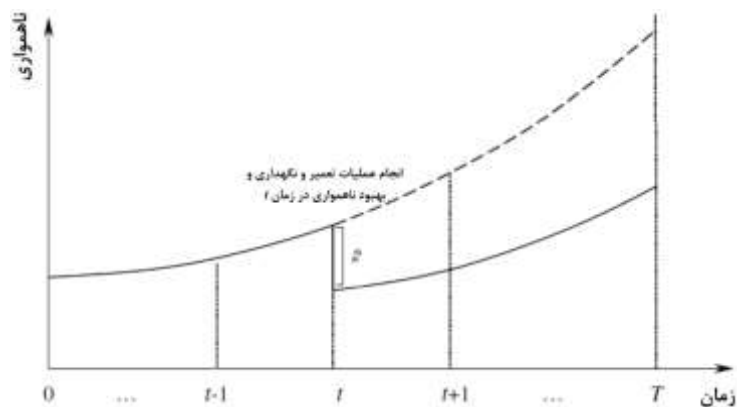
غیرمارکوفی بودن مدل، سطح مدیریت و نمونه موردی هر پژوهش ارائه شده است.

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 غیرمارکوفی، 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 خلاء تحقیقاتی مورد پژوهش قرار گیرد.

#### ۳- اهداف پژوهش

هدف اصلی این پژوهش ارائه یک چهارچوب بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی عملیات نت در سطح شبکه با در نظر گرفتن عدم قطعیت

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]

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

از پیش نیازهای لازم برای توسعه هر مدل بهینه سازی برنامه ریزی عملیات نت، تعیین شاخص وضعیت روسازی و همچنین شناسایی سه بخش مدل پیش بینی عملکرد<sup>۱</sup>، مدل بهبود<sup>۲</sup> 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 بین المللی 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 بین المللی 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 استفاده کنندگان و نشانه ای برای ایمنی است، لیکن ممکن است به تنهایی الزاماً شاخص مناسبی برای تعیین عملیات نت نباشد و مناسب ترین زمان بندی را برای انتخاب نوع عملیات ارائه ندهد. به طور مثال امکان داد یک روسازی از لحاظ سازه ای 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 پژوهش های متعددی در زمینه برنامه ریزی عملیات نت از این شاخص استفاده گردیده است. به علاوه در مدل های بهینه سازی 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 خدمت دهی روسازی و غیره)، در نظر گرفت و مدل اضمحلال منحنی روند به جهت استفاده از شاخص بین المللی ناهمواری به کار گرفته شده است.

استفاده از یک مدل عملکردی به جهت پیش بینی 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<sup>۳</sup> می باشد که توسط تیسانو کوا و شوفر و بر اساس داده های جمع آوری 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  $t^* > t$ ، 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.

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

3 Trend Curve

1 Performance Model  
2 Improvement Model

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K A_i C_{ikt} x_{ikt} \leq B_t \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$IR_{it} = IR_{i0} \exp(\beta t) + \sum_{j=1}^{t-1} \sum_{k=1}^{K-1} x_{ikt} e_{ik} \exp(\beta(t-j)) + \quad (4)$$

$$(IR_{new} - IR_{i0} \exp(\beta t)) x_{ikt} \quad \forall i \in I$$

$$IR_{it} \geq IR_{min} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$IR_{it} \leq IR_{max} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$\overline{IR}_t = \frac{\sum_{i=1}^I IR_{it} A_i}{\sum_{i=1}^I A_i} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\overline{IR}_t \leq IR_t^{network} \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ikt} = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (9)$$

$$x_{ikt} \in \{0, 1\}, IR_{it} \geq 0 \quad (10)$$

معادله (۲) تابع هدف مدل را نشان می دهد که فاصله وضعیت قطعات روسازی در مقطع زمانی پایانی برنامه ریزی را از وضعیت ایده آل 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 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 ( $IR_{new}$ ) 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

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 بین المللی 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 تاریخیچه 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.

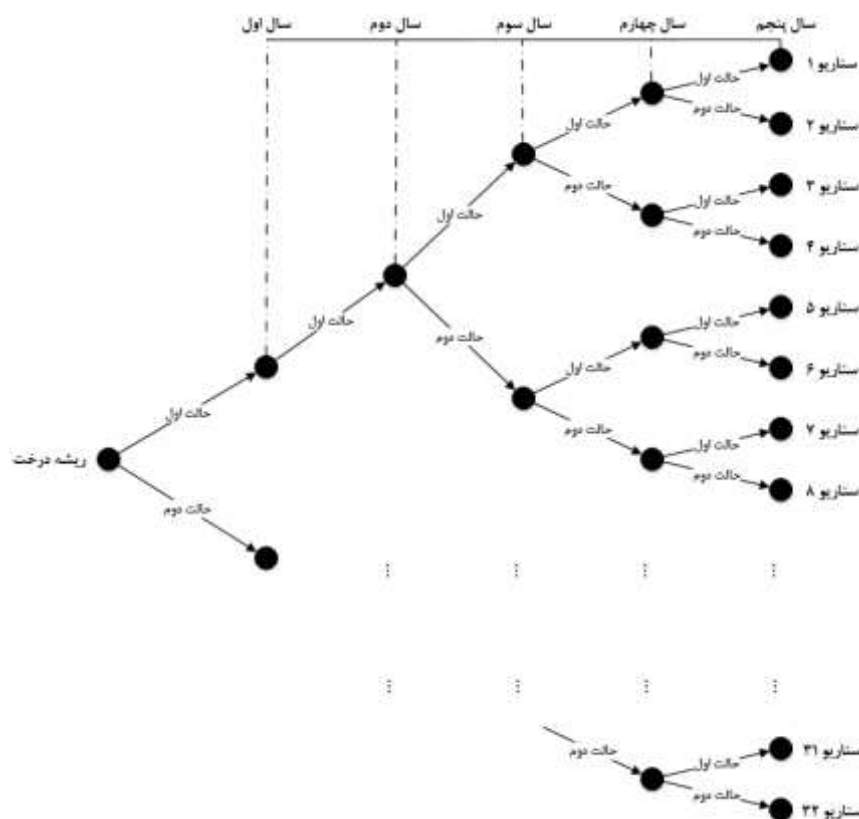
همچنین اجرای هر یک از عملیات نت هزینه مربوط به خود را برای سیستم در بر دارد که این هزینه از محاسبه مجموع هزینه های عملیاتی اجرای هر یک از سیاست های نگهداری تعیین می شود.

#### ۲-۴- برنامه ریزی 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  $K$ ام دارای بیشترین تأثیر و در عین حال بیشترین هزینه می باشد. دوره زمانی برنامه ریزی 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 برنامه ریزی عدد صحیح خطی با در نظر گرفتن قطعی بودن تمامی پارامترها به صورت معادلات (۲) تا (۱۰) می باشد.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^I |IR_{i5} - IR_i^*| \quad (2)$$





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

برای مدل‌سازی مسائل بهینه‌سازی که برخی از پارامترهای آن‌ها با عدم قطعیت همراه هستند، فراهم می‌کند. در برنامه ریزی تصادفی هدف گرفتن تصمیمی است که برای همه (یا تقریباً همه حالات ممکن) شادنی 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 می‌شوند. در یک مسأله برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای، معمولاً عدم قطعیت در قالب یک درخت سناریوی چندسطحی بیان می‌شود که هر سناریو، وقوع دنباله‌ای از وقایع را نشان می‌دهد. در واقع گره‌های درخت، نقاط تصمیم‌گیری و شاخه‌های آن مشاهده‌ای از پارامترهای تصادفی را نشان می‌دهند. یک سناریو مسیری از ریشه تا برگ‌ها 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 می‌باشد. عدم قطعیت بودجه در این پژوهش به صورت گسسته و در قالب

تعیین می‌شود. در محدودیت (۷) میانگین وزنی وضعیت تمامی قطعات شبکه در یک مقطع زمانی محاسبه می‌شود. در محاسبه میانگین، وزن قطعات بر اساس مساحت آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. محدودیت (۸) بیشینه مجاز ناهمواری برای میانگین شبکه را مشخص می‌کند. محدودیت (۹) این موضوع را تضمین می‌کند که تنها یک عملیات نت در یک مقطع زمانی برای هر قطعه شبکه انتخاب و اعمال شود. محدودیت (۱۰) نشان می‌دهد وضعیت قطعات نامنفی و متغیر تصمیم  $X_{ikt}$  یک متغیر دودویی است به گونه‌ای 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 می‌باشد.

#### ۳-۴- برنامه ریزی تصادفی چند مرحله‌ای 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 مرحله‌ای مدل شده است. برنامه ریزی تصادفی یک چهارچوب

$$\overline{IR}_t^s \leq IR_{max}^s \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (15)$$

$$\overline{IR}_t^s = \frac{\sum_{i=1}^I IR_{it}^s A_i}{\sum_{i=1}^I A_i} \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (16)$$

$$\overline{IR}_t^s \leq IR_t^{network} \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^K (x_{ikt} + y_{ikt}^s) = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (18)$$

$$x_{ikt} \in \{0,1\}, y_{ikt}^s \in \{0,1\}, IR_{it}^s \geq 0 \quad (19)$$

$$y_{ikt}^m = y_{ikt}^n \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T, \forall n \in S, \forall m \in S, \\ 1 \leq m < n \leq S, \xi_t^m = \xi_t^n \quad (20)$$

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 می‌کند. معادلات (۱۲) تا (۱۹) با این تفاوت که برای هر سناریو نوشته شده‌اند، مشابه معادلات (۳) تا (۱۱) می‌باشند. همچنین متغیر تصمیم  $x_{ikt}$  برای بخش قطعی بودجه و متغیر تصمیم  $y_{ikt}^s$  در مورد بخش غیرقطعی مسئله، یعنی سناریوهای مختلف بودجه اضافی و نرخ اضمحلال، تصمیم‌گیری می‌کنند. 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 غیر قابل تفکیک هستند. زیرا بودجه این سناریوها در مرحله اول با یکدیگر تفاوتی ندارند. در نتیجه بردارهای متغیر تصمیم در هر مرحله، نمی‌توانند به داده‌های تصادفی همه مراحل وابسته باشند. به طور مثال بردارهای تصمیم مرحله اول می‌بایست برای همه سناریوهایی که تا مقطع زمانی تصمیم مرحله اول اطلاعات یکسانی دارند، یکسان باشند. معادلات قیود عدم ناهماهنگی در واقع ربط‌دهنده تصمیم‌های سناریوهای مختلف می‌باشند.

مجموعه‌ای از سناریوها مانند شکل ۱ بیان می‌شود.

در مورد عدم قطعیت بودجه، در پژوهش‌های 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 می‌شود. 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 می‌کند. در واقع مدل، پروژه‌های با اولویت بالا را در این بخش تعیین می‌کند. بخش اضافی بودجه به صورت غیرقطعی و در چند سناریو ( $\tilde{B}_t^s$ ) در نظر گرفته می‌شود. یک متغیر تصمیم با توجه به تحقق سناریوهای مختلف، در مورد بخش عدم قطعیت بودجه تصمیم‌گیری می‌کند. 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  $\prod_{t=1}^T N_t$  می‌باشد. به عبارت دیگر تعداد گره‌های درخت سناریو در مرحله پایانی برابر این تعداد است.

با توجه به مطالب ذکرشده، مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای عدد صحیح مسأله مدیریت عملیات نت روسازی به صورت معادلات (۱۱) تا (۲۰) تا بیان می‌شود:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S p^s |IR_{it}^s - IR_t^*| \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K A_i C_{ikt} (x_{ikt} + y_{ikt}^s) \leq B_t^{min} + \tilde{B}_t^s \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (12)$$

$$IR_{it}^s = IR_{i0} \exp(\beta t) + \sum_{j=1}^t \sum_{k=1}^{K-1} (x_{ikt} + y_{ikt}^s) e_{ik} \exp(\beta(t-j)) + \\ (IR_{new} - IR_{i0} \exp(\beta t))(x_{ikt} + y_{ikt}^s) \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (13)$$

$$IR_{it}^s \geq IR_{min} \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (14)$$



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

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

### 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<sup>۱</sup> (GAMS) و با استفاده از یک کامپیوتر لپ‌تاپ 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. داده‌های 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 می‌شود.

#### ۵-۱-۱- مشخصات قطعات و وضعیت اولیه آن‌ها

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 سیاست‌های نگهداری، هزینه و میزان تأثیر آن‌ها

در این پژوهش گزینه‌های عملیات نت شبکه روسازی به پنج گروه تقسیم بندی می‌شوند. 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 سیاست‌ها، 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 نمی‌شود. عملیات نت هر یک از ۴ سیاست باقیمانده به شرح زیر می‌باشند:

- پیشگیرانه: درزگیری، فاگ سیل<sup>۲</sup>، چپ سیل<sup>۳</sup>، میکروسرفیسینگ<sup>۴</sup> و اسلاری سیل<sup>۵</sup>
- 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 لایه‌های آسفالتی، ترمیم اساس و اجرای لایه‌های آسفالتی

میانگین جهش عملکردی شاخص بین‌المللی ناهمواری از پژوهش‌های 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 ( $IRI_{new} = 1/5$ )

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 ( $B_t^S$ ) برابر با ۲۴۰ و ۶۰۰ میلیون تومان می‌باشند.

#### 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 می‌شوند. همچنین در هر سال، تنها یک عملیات نت برای هر قطعه انتخاب می‌شود.

#### ۵-۱-۶- سایر محدوده‌های 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 محدوده‌های تعریف شده توسط بانک جهانی برای راه‌های 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 جاده‌ای ایران در سال پایانی دوره برنامه‌ریزی برابر ۲/۲ متر بر کیلومتر لحاظ شده است [۱].

#### ۵-۲- نتایج مدل قطعی

حل مسائل قطعی و تصادفی توسط حل‌کننده  $CPLEX$  در نرم‌افزار  $GAMS$  صورت گرفته است. جواب بهینه بدست آمده از وضعیت قطعات روسازی در سال‌های 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

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

هزینه بر اساس هزینه نوع عملیات نت به واحد طول یا مساحت روسازی مورد نظر، محاسبه می‌شود. در این پژوهش هزینه هر یک از عملیات از پایگاه داده سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای 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  $\beta$  در مدل منحنی اضمحلال معادله (۱) در مطالعات لی و مدن، اوپانگ و مدن 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  $\beta$  در مدل منحنی روند برابر ۰/۰۵ لحاظ شده است.

#### ۵-۱-۴- بودجه

بودجه در تمامی سال‌ها 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 جاده‌ای 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 می‌شود. 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 می‌شود. همچنین حداقل بودجه برابر دو سوم بودجه اختصاص

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			
		بازسازی	بهسازی نوع ۲	بهسازی نوع ۱	پیشگیرانه
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	



۰/۰۳۱۲۵/ اتفاق می افتد.

جواب بهینه بدست آمده از مسأله برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای در مورد وضعیت قطعات روسازی با توجه به سال‌ها 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 سال‌هایی که عملیاتی برای آن‌ها 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.

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 سال‌های اول تا سوم عملیاتی انجام نشده، در سال چهارم 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 سال‌های 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=۳<sup>۵</sup> 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

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

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

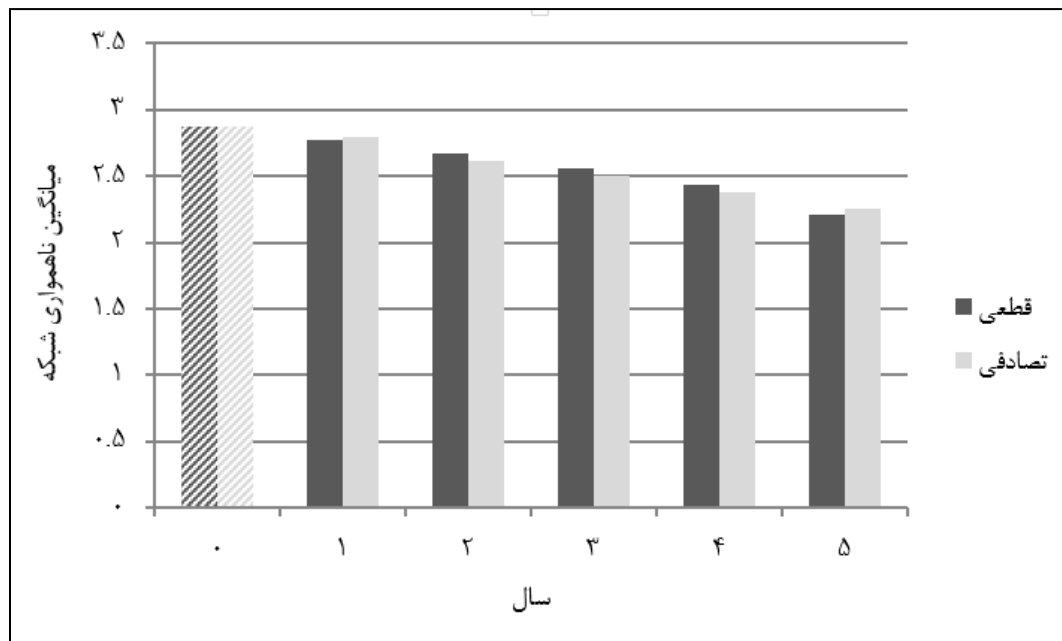






جدول ۹. درصد هریک از عملیات تخصیص داده شده به قطعات شبکه در کل طول دوره برنامه‌ریزی  
**Table 9. The percentage of each treatment assigned to pavement sections in the analysis period**

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



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

شبکه از ۲/۸۷ متر بر کیلومتر در سال صفر به ۲/۲۵ متر بر کیلومتر در سال پایانی می‌رسد. 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

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 می‌دهد 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

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
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 گام‌های صورت گرفته در یک سیستم مدیریت روسازی است. روش‌های مختلف بهینه‌سازی، با استفاده از تحلیل عملکرد روسازی و محاسبه هزینه‌های نگهداری و ترمیم، بر اساس بهینه‌کردن اهداف تصمیم‌گیران، مناسب‌ترین رویکرد نگهداری را برای اجرا انتخاب می‌کنند. به علاوه، بودجه نگهداری راه‌ها 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 می‌باشد. این مسأله به کمک روش برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای 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 می‌باشد که در مورد عملیاتی که اولویت بالایی دارند تصمیم‌گیری می‌کند و بخش اضافی بودجه به صورت چند سناریو به حداقل بودجه اضافه می‌شود. مهم‌ترین ویژگی این رویکرد، تعیین عملیات مشخص در هر سال برای هر یک از قطعات شبکه علاوه بر در نظر گرفتن عدم قطعیت ذکر شده می‌باشد و لذا از بودجه موجود به صورت بهینه استفاده می‌شود. این موضوع برای سازمان‌های متولی راه می‌تواند 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 می‌کند که برای سناریوهای مختلف بهینه باشد. مقایسه نوع عملیات پیشنهاد شده توسط مدل‌های تصادفی و قطعی مؤید این نکته است که مدل تصادفی در طول دوره برنامه‌ریزی منابع بیشتری را به عملیات پیشگیرانه اختصاص می‌دهد؛ 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 می‌رسد. 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 می‌کند. 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 می‌رسد. لذا نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مدل تصادفی با وجود در نظر گرفتن عدم قطعیت بودجه، به خوبی وضعیت قطعات شبکه را کنترل می‌کند.

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

- 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. Damjanovic, 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, *Transportation Engineering Journal*, 7 (2015) 523-540.
- [20] T. Watanatada, C.G. Harral, W.D.D. Paterson, A.M., A. Bhandari, K. Tsunokawa, The Model., *Highway Design*
- 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

- 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).
- 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

### پیوست ۱: نمادگذاری

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

مجموعه ها	
مجموعه قطعات شبکه روسازی، $I = \{1,2,3, \dots, I\}$	$I$
مجموعه دوره زمانی برنامه ریزی، $T = \{1,2,3, \dots, T\}$	$T$
مجموعه عملیات نت، $K = \{1,2,3, \dots, K\}$ ، که عملیات $K$ بیشترین تأثیر و در عین حال بیشترین هزینه را دارا می باشد.	$K$
مجموعه سناریوها در حالت عدم قطعیت، $S = \{1,2,3, \dots, S\}$	$S$
پارامترها	
ناهمواری اولیه قطعه $i$	$IR_{i0}$
ناهمواری قطعه $i$ در زمان $t$	$IR_{it}$
ناهمواری مجاز حداقل برای هر قطعه شبکه در هر مقطع زمانی	$IR_{min}$
ناهمواری مجاز حداکثر برای هر قطعه شبکه در هر مقطع زمانی	$IR_{max}$
ناهمواری قطعه پس از انجام عملیات بازسازی	$IR_{new}$
ناهمواری ایده آل مدنظر در سال پایانی دوره برنامه ریزی	$IR_i^*$
ناهمواری متوسط تمامی قطعات شبکه در سال $t$	$\overline{IR}_t$
حداقل ناهمواری متوسط مورد نیاز قطعات شبکه در سال $t$	$IR_t^{network}$
مساحت قطعه $i$	$A_i$
متوسط سالیانه حجم ترافیک روزانه قطعه $i$	$AADT_i$
نرخ اضمحلال قطعه $i$ در مدل منحنی روند	$\beta$
نرخ اضمحلال قطعه $i$ در مدل منحنی روند برای سناریوی $S$	$\beta^S$
بودجه موجود برای مدیریت عملیات نت در سال $t$	$B_t$
حداقل بودجه در سال $t$ که قطعاً محقق می شود.	$B_t^{min}$
بودجه اضافی با توجه به سناریوی $S$ در سال $t$	$\overline{B}_t^S$

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

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](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17502.6583)

