



## کمینه کردن انتشار گاز دی اکسید کربن در برنامه ریزی تعمیر و نگهداری شبکه بزرگ مقیاس رویه‌های راه

حامد ناصری، الهه صفری قلعه کلی، سینا محمدزاده سالیانی، فریدون مقدس نژاد<sup>\*</sup>، امیر گل‌رو

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

### تاریخچه داوری:

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

### کلمات کلیدی:

الگوریتم چرخه آب  
سیستم مدیریت روسازی  
شبکه بزرگ مقیاس  
محیط زیست

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

### ۱- مقدمه

مدیریت روسازی، کمک کردن به مسئولان و تصمیم‌گیران جهت تصمیم‌گیری درباره نوع روش تعمیر و نگهداری در زمان مناسب می‌باشد [۴].

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

در جوامع پیشرفته، زیرساخت‌های حمل و نقلی یک نقش اساسی را در اقتصاد و جابه‌جایی انسان و کالا بازی می‌کنند [۱]. روند رو به افزایش و توسعه شبکه‌های راه، منجر به افزایش مسئولیت در برابر نگهداری این زیرساخت‌ها می‌شود [۲]. سیستم مدیریت روسازی<sup>۱</sup> (PMS) یک روند استراتژیک و سیستماتیک برای نگهداری و بهبود بخشیدن به وضعیت شبکه راه‌ها می‌باشد [۳]. هدف اصلی سیستم

<sup>۱</sup> Pavement Management System

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir



می‌شود. روش‌های تعمیر و نگهداری روسازی راه‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: روش‌های نگهداری پیشگیرانه، نگهداری و بهسازی [۷].

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

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

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

مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌های مختلف ابتکاری و فراابتکاری نیز در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲، ۱۳]. به عنوان مثال، الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات<sup>۱</sup> (PSO) جواب‌های بهتری از الگوریتم ژنتیک ارائه می‌دهد [۱۲]. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات از لحاظ سرعت همگرایی و حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد [۱۲، ۱۳].

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

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

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

1 Particle Swarm Optimization

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

## ۲- متدولوژی

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

### ۲-۱- شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI)

در مقاله تورس ماکی و همکاران (۲۰۱۸)، هدف اصلی، تحلیل اثرات زیست‌محیطی و بودجه در دسترس در طراحی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری می‌باشند. در ابتدا، این مقاله مروری بر روش‌های تعمیر و نگهداری موجود دارد. سپس عملیات تعمیر و نگهداری با ملاحظه سطوح ظرفیت بودجه و ارزیابی تکنیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی بهینه‌سازی می‌شود. مطالعه موردی روی شبکه روسازی شهری در چایل<sup>۱</sup> انجام گردید. نتیجه نشان داده است که افزایش ۲ درصدی در مقدار بودجه نگهداری روسازی راه، باعث اتخاذ تصمیم‌های عاقلانه تری در زمینه کاهش آلاینده‌های محیط زیست شده است. مانند بازیافت سرد درجا و تعمیر تمام عمق دال‌ها که انتشار گازهای گلخانه‌ای در آن‌ها کمتر از راهکارهای دیگر می‌باشد [۱۸].

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

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

با توجه به مقالات ذکر شده در بالا، در زمینه سیستم مدیریت روسازی کارهای خوبی انجام گردیده، اما حل یک شبکه حاوی قطعات زیاد (بزرگ مقیاس) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در حل بیشتر شبکه‌های روسازی، از الگوریتم‌های قدیمی‌تر استفاده شده است و فقدان استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید در حوزه مدیریت

<sup>1</sup> Chile

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## ۲-۲- مدل ریاضی مسأله

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

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

در این فرمول،  $IRI_{i,y}$  بیانگر شاخص ناهمواری بین‌المللی قطعه

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

### ۳- مطالعه موردی

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

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

$$\max Cost_y - \min Cost_y \leq A \times \max Cost_y, \quad (6)$$

$$\forall y \in \{1, 2, \dots, x\}$$

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

### ۳-۲ الگوریتم مورد استفاده

مسائل بهینه‌سازی گسسته (عدد صحیح) با تعداد گزینه‌های انتخابی زیاد و متغیرهای تصمیم فراوان، زیر مجموعه‌ی مسائل ان-پی سخت می‌باشند و با استفاده از روش‌های ریاضیاتی قطعی، شامل روش‌های عددی و تحلیلی قابل حل نمی‌باشند [۲۶]. از این رو، مسأله برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری راه‌ها در شبکه‌های بزرگ مقیاس، یک مسأله ان-پی سخت می‌باشد؛ زیرا انواع مختلفی از عملیات‌های ترمیمی برای هر قطعه در هر سال می‌تواند انتخاب شوند. همچنین، تعداد قطعات در سطح شبکه‌های بزرگ مقیاس بسیار زیاد می‌باشند. در این پژوهش، هدف معرفی یک سری راهکار برای شبکه‌ی راه‌های کشور ایران در یک دوره‌ی زمانی طولانی می‌باشد و به دلیل پیچیدگی این مسأله، الگوریتم چرخه‌ی آب<sup>۱</sup> (WCA) برای یافتن جواب این مسأله استفاده می‌شود. الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم‌های بسیار مفید و قدرتمند می‌باشند که برای حل مسائل عدد صحیح با پیچیدگی محاسباتی بالا طراحی شده‌اند و در حل مسائل مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بررسی مقالات در حوزه‌های مختلف مهندسی عمران نشان از عملکرد بسیار خوب این الگوریتم‌ها دارد.

الگوریتم چرخه‌آب، یک الگوریتم فراابتکاری است که به طور

<sup>1</sup> Water Cycle Algorithm

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

Table 1. M&R activities and their corresponding IRI drop, unit cost, and unit CO<sub>2</sub> emission.

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

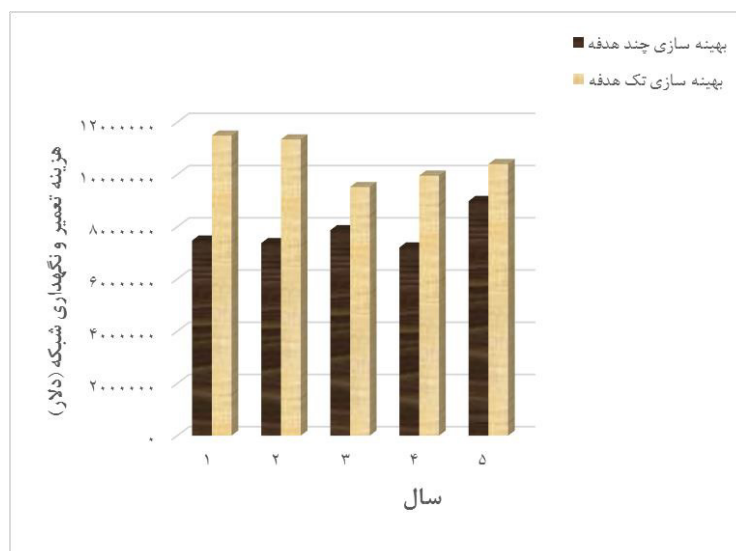
مورد استفاده قرار گرفت که در جدول ۱ نشان داده شده است. در مورد بعضی از قطعات راه‌ها، به دلیل شرایط قابل قبول قطعه، نیازی به هیچ یک از اقدامات زیر نمی‌باشد. به همین دلیل یکی از راهکارهای تعمیر و نگهداری که در جدول ۱ ذکر شده است، "هیچ اقدامی انجام نشود" است. با انتخاب این راهکار، هیچ هزینه‌ای پرداخت نمی‌شود و همچنین هیچ تغییری در مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی مشاهده نخواهد شد. به علاوه، در صورت انتخاب این گزینه مقدار انتشار گاز دی‌اکسید کربن صفر می‌باشد. در جدول زیر، انواع عملیات‌های تعمیر و نگهداری، کاهش در مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی، هزینه اجرا و همچنین مقدار دی‌اکسید کربن منتشر شده نشان داده شده است. هر کدام از عملیات‌های تعمیر و نگهداری موجب کاهش مقدار شاخص در شاخص ناهمواری بین‌المللی می‌گردد. این مقدار کاهش در عملیات‌های تعمیر و نگهداری گوناگون متفاوت اند. در جدول ۱، مقدار کاهش در مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی در اثر راهکارهای مختلف تعمیر و نگهداری، بیان شده است. با توجه به اینکه تعمیر و نگهداری روسازی در بیشتر موارد اکثر بودجه سازمان‌های راهداری را مصرف می‌کند، هزینه هر کدام از راهکارهای تعمیر و نگهداری یکی از عوامل مهم در انتخاب آن‌ها می‌باشد [۳۲]. در این جدول هزینه راهکارها بر اساس دلار در هر متر مربع بیان شده است. هزینه‌های سالیانه راهکارها، مجموع هزینه‌های واحد راهکارها در هر سال بر اساس مساحت قطعات تعمیر شده در هر سال محاسبه می‌گردد.

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

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

### ۳-۱- عملیات‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها

برای حل این مسأله، ۶ مورد عملیات تعمیر و نگهداری مرسوم که برای تعمیر و نگهداری راه‌های شریانی مورد استفاده قرار می‌گیرد



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

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

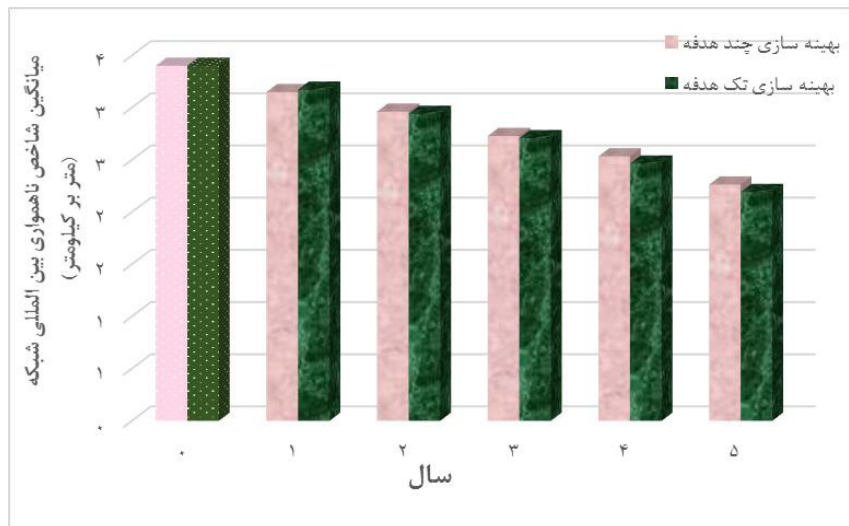
احتمالاً به دلیل پیچیدگی‌های محاسباتی در این مدل نسبت به بهینه‌سازی تک‌هدفه می‌باشد. برای محاسبه سرعت اجرای الگوریتم چرخه‌آب، زمان متوسط اجرا در یک سیستم core i7-6700 HQ با ۱۶ گیگابایت رم و سی پی یو ۲/۴ گیگاهرتز محاسبه گردیده است. همان‌گونه که قبلاً اشاره گردید، مسأله ۲ بار با توابع هدف مختلف حل شده است. در شکل ۱ هزینه تعمیر و نگهداری شبکه بر حسب دلار در ۵ سال نشان داده شده و با هم مقایسه می‌گردند. در مسأله ۲ تابع هدف، هزینه به مراتب کمتری مشاهده می‌شود. در روش بهینه‌سازی تک‌تابع‌هدفه، هزینه در دوره ۵ ساله تحلیل ۵۲/۷ میلیون دلار و در روش بهینه‌سازی چندهدفه، ۳۸/۹ میلیون دلار برآورد گردیده‌اند. مقدار هزینه در دوره ۵ ساله تحلیل، با استفاده از روش تک‌تابع‌هدفه، ۱/۵ برابر هزینه با استفاده از روش چندتابع‌هدفه می‌باشد. همچنین از نتایج حاصله می‌توان دریافت که در روش تک‌هدفه حدود ۱۵٪ و در روش چندهدفه ۴۰٪ از بودجه اختصاص یافته در ۵ سال را می‌توان ذخیره نمود. با توجه به شکل ۱، در روش بهینه‌سازی تک‌هدفه هزینه‌های تعمیر و نگهداری در ۵ سال، تقریباً حالت نزولی دارد. اما در روش بهینه‌سازی چندهدفه، هزینه‌ها در ۴ سال اول نزدیک به هم بوده و در سال پنجم، مقداری بیشتر دارد. با توجه به محدودیت ذکر شده در بالا، قابل مشاهده است که در هر دو مدل، هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری شبکه کمتر از بودجه سالیانه آن می‌باشد (۱۲ میلیون و ۲۰۰ هزار دلار).

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

#### ۴- نتایج و بحث

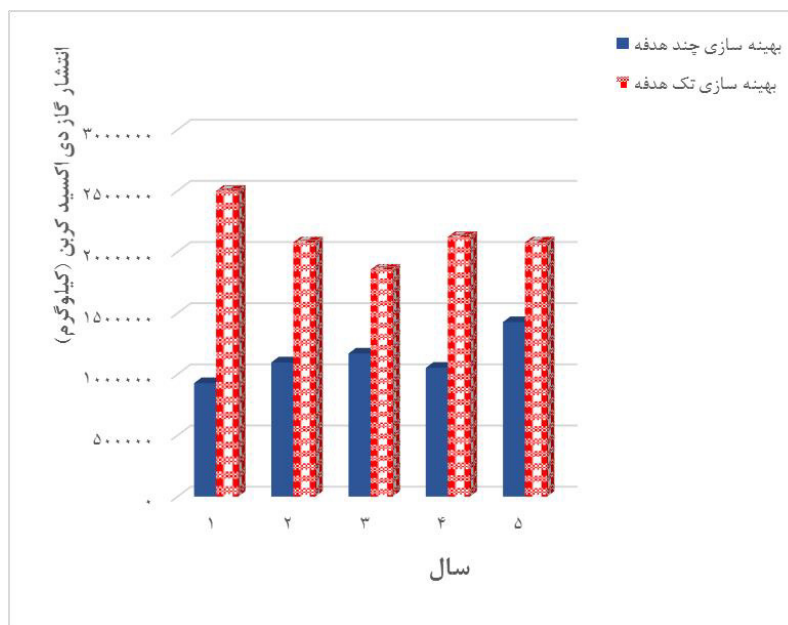
همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، الگوریتم استفاده شده در این مسأله الگوریتم چرخه‌ی آب می‌باشد. این الگوریتم برای ارتقای شرایط شبکه و هر قطعه از راه استفاده شده است. برای دستیابی به این اهداف، ابتدا مدل بهینه‌سازی طراحی شده و سپس در نرم‌افزار مطلب نسخه ۲۰۱۹-الف اجرا گردید. بعد از انتخاب پارامترهای الگوریتم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

زمان اجرای الگوریتم نیز یکی از فاکتورهای مهم برای ارزیابی عملکرد الگوریتم می‌باشد. زیرا بر روی همگرایی جواب‌ها تأثیر می‌گذارد. مرتبه همگرایی یکی از پارامترهای مهم برای مسائل بهینه‌سازی می‌باشد که در این مسأله زمان اجرا به عنوان مرتبه همگرایی در نظر گرفته شد. نتایج این الگوریتم نشان‌دهنده سریع بودن آن است که می‌تواند مسأله ان-پی سخت را برای بهینه‌سازی تک‌هدفه در ۶۱۸/۶۷ ثانیه و برای بهینه‌سازی چندهدفه در ۶۶۸/۶۳ ثانیه حل کند. بیشتر بودن زمان اجرا در بهینه‌سازی چندهدفه،



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

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



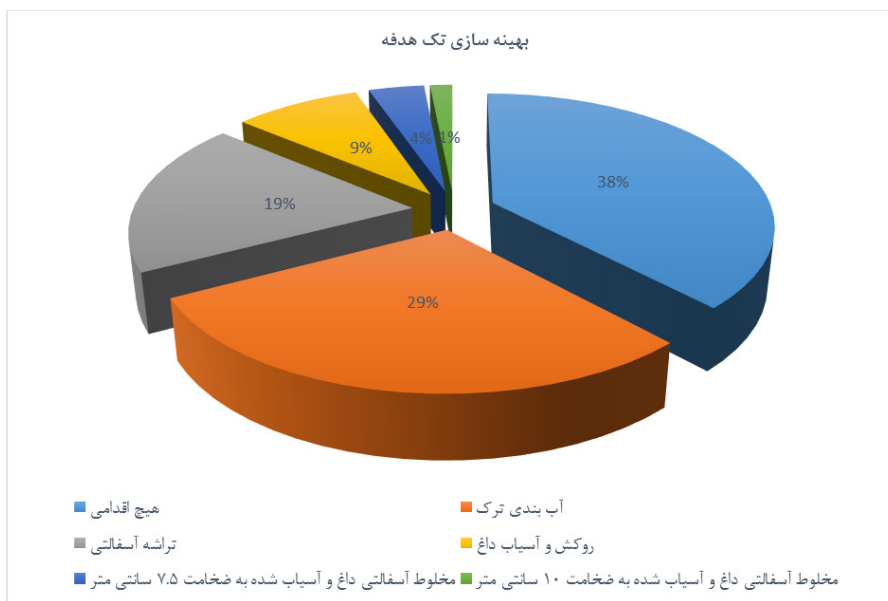
شکل ۳. گاز دی‌اکسید کربن منتشر شده در سالهای مختلف دوره تحلیل با دو روش بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه

Fig. 3. Total CO<sub>2</sub> emission in the analysis period presented by multi-objective and single-objective approaches

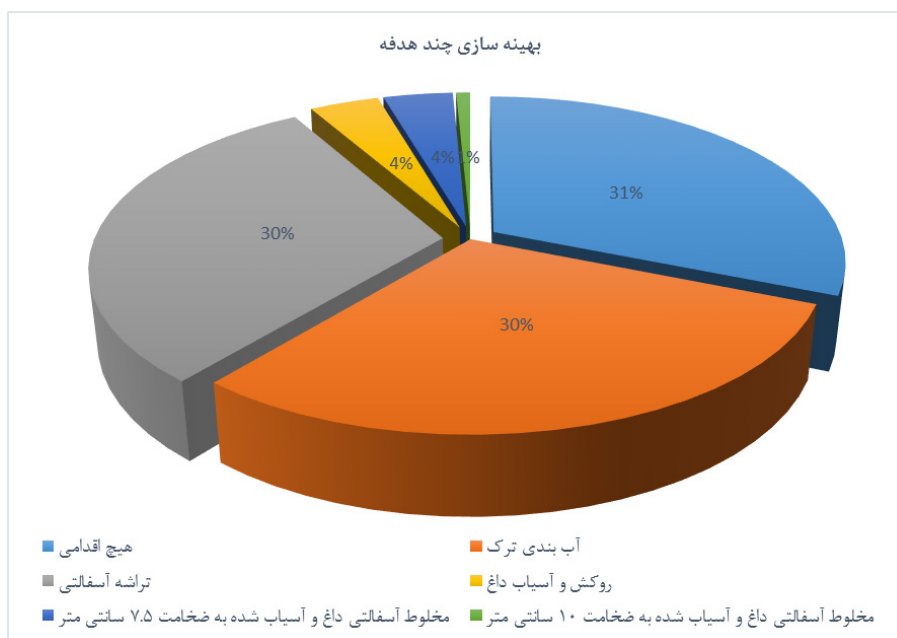
مقدار میانگین شاخص ناهمواری بین‌المللی شبکه به مدت ۵ سال حاصل از دو مدل نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، میانگین شاخص ناهمواری بین‌المللی در دوره ۵ ساله تحلیل، حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. همچنین، در مقایسه بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه، مشخص است که بهینه‌سازی تک‌هدفه شاخص ناهمواری بین‌المللی بهتری را از خود به نمایش

یکی دیگر از اهداف مهم در حل این مسأله، کمینه کردن مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی شبکه می‌باشد. همان‌طور که در محدودیت‌ها ذکر گردید، حداکثر مقدار شاخص ناهمواری بین‌المللی در کشور ما می‌تواند ۳/۵ باشد. با توجه به شکل ۲، در هر دو مدل این محدودیت رعایت گردیده و جواب‌های حاصله مطابق اهداف سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای می‌باشد. همچنین در این شکل،





(الف)



(ب)

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

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

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

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

امروزه مسائل زیست‌محیطی به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های جوامع بشری تبدیل شده است. در نتیجه یکی از مهم‌ترین عوامل

نتایج به دست آمده با نتایج به دست آمده توسط سایر محققین نیز یکسان می‌باشد [۲۲، ۳۷].

### ۵- نتیجه‌گیری

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

- با در نظر گرفتن مقدار بودجه‌ی اختصاص یافته برای تعمیر و نگهداری هر سال، نوسانات بودجه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده و اختلاف مقدار بیشینه و کمینه بودجه اختصاص یافته کمتر از ۲۰٪ شده است، که باعث ایجاد منطقی تر شدن مدل می‌شود و نتایج قابلیت اجرایی پیدا می‌کند. همچنین بودجه‌ی اختصاص داده شده برای تعمیر و نگهداری این شبکه در طی ۵ سال ۶۱ میلیون دلار تخمین زده شده است که در برنامه‌ریزی تک‌هدفه به طور تقریبی ۱۵٪ و در دوهدفه ۴۰٪ از بودجه ذخیره گردیده است.

- میانگین شاخص ناهمواری بین‌المللی در شبکه در سال اول ۳/۴ می‌باشد. این مقدار به طور یکنواخت کاهش پیدا می‌کند و در ۵ سال آینده در بهینه‌سازی تک‌هدفه به ترتیب به ۳/۱۷، ۲/۹، ۲/۷، ۲/۵، ۲/۲ و در دو هدفه به ترتیب به ۳/۱۴، ۲/۹۶، ۲/۷۲، ۲/۵ و ۲/۲۶ کاهش پیدا می‌کند. لذا می‌توان گفت که میانگین شاخص ناهمواری بین‌المللی در دوره‌ی ۵ ساله حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد.

- در بهینه‌سازی تک‌هدفه، مقادیر دی‌اکسید کربن منتشر شده در سال‌های اول تا پنجم به ترتیب به ۲/۵، ۲/۰۷، ۱/۸۶، ۲/۱، ۲/۰۸، ۲/۰۵ میلیون کیلوگرم و در بهینه‌سازی چندهدفه ۰/۹۲، ۱/۰۹، ۱/۱۷، ۱/۰۵، ۱/۰۴ میلیون کیلوگرم می‌باشد. در بهینه‌سازی تک‌هدفه، در مجموع ۵ سال دوره تحلیل، حدود ۱۰/۶ میلیون کیلوگرم دی‌اکسید کربن آزاد می‌کند. در حالی که در بهینه‌سازی چندهدفه، این مقدار به ۵/۶ میلیون کیلوگرم می‌رسد. در نتیجه، مقدار دی‌اکسید کربن آزاد

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

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

- costs, *Transportation research record*, 5(1)228 (2012) 47-55.
- [7] C. Torres-Machi, E. Pellicer, V. Yepes, A. Chamorro, Towards a sustainable optimization of pavement maintenance programs under budgetary restrictions, *Journal of cleaner production*, 148 (2017) 102-90.
- [8] M. Hafez, K. Ksaibati, R.A. Atadero, Applying large-scale optimization to evaluate pavement maintenance alternatives for low-volume roads using genetic algorithms, *Transportation Research Record*, 52(2672) (2018) 215-205.
- [9] A. Khavandi Khiavi, H. Mohammadi, Multiobjective optimization in pavement management system using NSGA-II method, *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 2(144) (2018) 04018016.
- [10] A.V. Moreira, T.F. Fwa, J.R. Oliveira, L. Costa, Coordination of user and agency costs using two-level approach for pavement management optimization, *Transportation Research Record*, 1(2639) (2017) 118-110.
- [11] P. Saha, K. Ksaibati, Optimization model to determine critical budgets for managing pavement and safety: Case study on statewide county roads, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2(145) (2019) 04018088.
- [12] N.R. Tayebi, F.M. Nejad, M. Mola, Comparison between GA and PSO in analyzing pavement management activities, *Journal of Transportation Engineering*, 1(140) (2014) 104-99.
- [13] A.G. Matin, R.V. Nezafat, A. Golroo, A comparative study on using meta-heuristic algorithms for road maintenance planning: Insights from field study in a developing country, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(4) (2017) 486-477.
- [14] K. Ahmed, B. Al-Khateeb, M. Mahmood, A chaos with discrete multi-objective particle swarm optimization for pavement maintenance, *J. Theor. Appl. Inf. Technol*, 8(96) (2018) 2326-2317.
- [15] T.R. Panda, A.K. Swamy, An improved artificial bee colony algorithm for pavement resurfacing problem, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5(11) (2018) 516-509.
- شده با استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه ۲ برابر بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه، در حفظ محیط زیست به نتایج بسیار بهتری دست یافته‌ایم.
- در بررسی نتایج ناشی از نوسان هزینه‌ها، در جواب بهینه ارائه شده توسط ساها و سیبیتی (۲۰۱۵) تقریباً ۶۳/۲٪ می‌باشد [۱۱]. میزان تغییرات هزینه در مقاله حافظ و همکاران (۲۰۱۸) در رویکرد اول و دوم به ترتیب ۸۵/۳٪ و ۱۸۹٪ می‌باشد [۸]. همچنین، این مقدار در تحقیق پیس و همکاران (۲۰۱۶) بیش از ۵۰٪ می‌باشد که مقدار قابل توجهی می‌باشد [۳۳]. در مقاله وو و همکاران (۲۰۱۷) مقدار کمینه و بیشینه هزینه در دوره تحلیل ۰ و ۵/۵ میلیون دلار معرفی شده است [۲۴]. لذا در این پژوهش، برای منطقی‌تر شدن نتیجه بدست آمده از پارامتری به نام A با مقدار ۲۰٪ جهت محدود کردن نوسان هزینه‌ها استفاده شده است که می‌توان آن را یکی از مؤثرترین محدودیت‌های در نظر گرفته شده در مدل نامید.

## مراجع

- [1] France-Mensah, W.J. O'Brien, Budget allocation models for pavement maintenance and rehabilitation: Comparative case study, *Journal of Management in Engineering*, 2(34) (2018) 05018002.
- [2] R. Spielhofer, A. Weninger-Vycudil, M. Oldfield, G. Mladenović, P. Lepert, J. Pohu, H. Litzka, Cross-asset risk assessment on network level, *Transport Research Arena Tra2016*, 14 (2016) 41-32.
- [3] P. Saha, K. Ksaibati, A risk-based optimization methodology for managing county paved roads, in: *The 94th Transportation Research Board Annual Meeting 2015*, Citeseer, 2015.
- [4] A. Osorio, A. Chamorro, S. Tighe, C. Videla, Calibration and validation of condition indicator for managing urban pavement networks, *Transportation Research Record*, 1(2455) (2014) 36-28.
- [5] S. Woo, H. Yeo, Optimization of pavement inspection schedule with traffic demand prediction, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 218 (2016) 103-95.
- [6] S. Islam, W.G. Buttlar, Effect of pavement roughness on user

- [26] C.H. Papadimitriou, On the complexity of integer programming, *Journal of the ACM (JACM)*, 4(28) (1981) 768-765.
- [27] A. Sadollah, H. Eskandar, A. Bahreininejad, J.H. Kim, Water cycle algorithm for solving multi-objective optimization problems, *Soft Computing*, 9(19) (2015) 2603-2587.
- [28] Sadollah, H. Eskandar, J.H. Kim, Water cycle algorithm for solving constrained multi-objective optimization problems, *Applied Soft Computing*, 27 (2015) 298-279.
- [29] H. Eskandar, A. Sadollah, A. Bahreininejad, M. Hamdi, Water cycle algorithm–A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems, *Computers & Structures*, 110 (2012) 166-151.
- [30] A. Sadollah, H. Eskandar, H.M. Lee, J.H. Kim, Water cycle algorithm: a detailed standard code, *Software X*, 5 (2016) 43-37.
- [31] Sadollah, H. Eskandar, A. Bahreininejad, J.H. Kim, Water cycle algorithm with evaporation rate for solving constrained and unconstrained optimization problems, *Applied Soft Computing*, 30 (2015) 71-58.
- [32] Q. Dong, B. Huang, Evaluation of effectiveness and cost-effectiveness of asphalt pavement rehabilitations utilizing LTPP data, *Journal of Transportation Engineering*, 6(138).
- [33] V. Yepes, C. Torres-Machi, A. Chamorro, E. Pellicer, Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid greedy randomized adaptive search procedure algorithm, *Journal of Civil Engineering and Management*, 4(22) (2016) 550-540.
- [34] Y. Li, S. Madanat, A steady-state solution for the optimal pavement resurfacing problem, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 6(36) (2002) 535-525.
- [35] Y. Ouyang, S. Madanat, Optimal scheduling of rehabilitation activities for multiple pavement facilities: exact and approximate solutions, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 5(38) (2004) 365-347.
- [36] J. Chehovits, L. Galehouse, Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete pavements, in: *Proceedings on the 1st International Conference of Pavement Preservation*, 2010,
- [16] C. Torres-Machí, A. Chamorro, E. Pellicer, V. Yepes, C. Videla, Sustainable pavement management: Integrating economic, technical, and environmental aspects in decision making, *Transportation Research Record*, 1(2523) (2015) 63-56.
- [17] R.B. Mallick, A. Veeraragavan, Sustainable pavements in India-the time to start is now, *New Building Materials and Construction World (NBM&CW) Magazine*, 3(16) (2010) 140-128.
- [18] C. Torres-Machi, A. Osorio-Lird, A. Chamorro, C. Videla, S.L. Tighe, C. Mourgues, Impact of environmental assessment and budgetary restrictions in pavement maintenance decisions: Application to an urban network, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59 (2018) 204-192.
- [19] S. Chan, B. Lane, T. Kazmierowski, W. Lee, Pavement preservation: A solution for sustainability, *Transportation research record*, 1(2235) (2011) 42-36.
- [20] F. Giustozzi, M. Crispino, G. Flintsch, Multi-attribute life cycle assessment of preventive maintenance treatments on road pavements for achieving environmental sustainability, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4(17) (2012) 419-409.
- [21] P. Lu, D. Tolliver, Pavement treatment short-term effectiveness in IRI change using long-term pavement program data, *Journal of transportation engineering*, 11(138) (2012) 1302-1297.
- [22] M.Y. Shahin, *Pavement management for airports, roads, and parking lots*, Springer New York, 20.
- [23] A. Osorio-Lird, A. Chamorro, C. Videla, S. Tighe, C. Torres-Machi, Application of Markov chains and Monte Carlo simulations for developing pavement performance models for urban network management, *Structure and Infrastructure Engineering*, 14.
- [24] D. Wu, C. Yuan, H. Liu, A risk-based optimization for pavement preventative maintenance with probabilistic LCCA: a Chinese case, *International Journal of Pavement Engineering*, 1(18) (2017) 25-11.
- [25] Iran's Road Maintenance and Transportation Organization." <http://www.rmto.ir>, Access on: Nov, 2018.

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

pp. 42-27.

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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

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

DOI: [10.22060/ceej.2020.17650.6632](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17650.6632)



