

بهینه‌سازی استراتژی‌های نگهداری و تعمیر پل‌های بتنی راه‌آهن شمال و شمالشرق ۲ (محور زیرآب - گرگان) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه

مقاله پژوهشی

محمدجواد طاهری امیری، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی انوشیروان بابل، بابل، ایران
میلاذ همتیان، دانشجوی دکتری، گروه صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، ایران
فرشیدرضا حقیقی، استادیار، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی انوشیروان بابل، بابل، ایران
نبی الله کیا، دانش آموخته کارشناسی، موسسه آموزش عالی طبری بابل، بابل، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: haghghi@nit.ac.ir

دریافت: ۹۸/۱۱/۰۵ - پذیرش: ۹۹/۰۳/۱۰

صفحه ۲۷۱-۲۵۱

چکیده

امروزه حمل و نقل یکی از ارکان اصلی رونق اقتصادی در جهان محسوب می‌شود و یکی از مهم‌ترین ابزار حمل و نقل در ایران و جهان، راه‌آهن است که دلیل اصلی آن هزینه مناسب در مقابل قابلیت جابه‌جایی و انتقال حجم زیادی از مسافر و کالا می‌باشد. افزایش جمعیت و توسعه مراودات اقتصادی باعث شده تا میزان بهره‌برداری از زیرساخت‌های حمل و نقل و به خصوص راه‌آهن افزایش یابد. کشور ما نیز از این قاعده مستثنی نیست و با توجه به اینکه سامانه‌ی ریلی کشور از قدیمی‌ترین شریان‌های حمل و نقل می‌باشد، در معرض بحران استهلاک و تخریب قرار دارد. پل‌ها به عنوان مهم‌ترین زیرساخت راه و راه‌آهن، بیشترین آسیب‌پذیری را در پدیده‌ی افزایش بهره‌برداری دارند که در سال‌های اخیر نشانه‌هایی از این آسیب‌پذیری در نقاطی از سامانه‌ی ریلی کشور دیده شده و مسئولین امر را به فکر انداخته است. نکته‌ی حائز اهمیت این است که اگر تمهیدات تعمیر و نگهداری منظم و مقاوم‌سازی جهت افزایش ظرفیت این پل‌ها دیده نشود بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه استفاده شده است. همچنین با توجه به چهار سناریو جهت انتخاب تعداد پل‌های تحت تعمیر و ۱۶ حالت مسئله جهت حل توسط الگوریتم تعریف، عواقب جبران‌ناپذیری در پی خواهد داشت. تحقیق حاضر پیرو تمامی موارد مذکور و با هدف کمک به سیستم مدیریت پل ایران، با مطالعه‌ی موردی روی پل‌های بتنی قطعه‌ی زیرآب - گرگان محور گرمسار - گرگان راه‌آهن شمال و شمالشرق ۲ جمهوری اسلامی ایران به بهینه‌سازی اقدامات اصلاحی آن‌ها پرداخته است. برای بهینه‌سازی اقدامات اصلاحی از الگوریتم فراابتکاری شده، حالت‌های مناسب و بهینه در سناریوها و بودجه‌های مختلف، با هدف به کارگیری در استراتژی‌های تعمیر و نگهداری و کسب بیشترین اثربخشی معرفی شدند.

واژه‌های کلیدی: پل راه‌آهن، خرابی، تعمیر و نگهداری، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم فراابتکاری

۱- مقدمه

سیستم حمل و نقل، از شریان‌های حیاتی هر اجتماعی به شمار می‌آید و همان‌گونه که سیستم گردش خون در بدن آدمی از مهم‌ترین ارکان تحرک و پویایی شخص است و با بررسی ویژگی‌های آن می‌توان از ویژگی‌های صاحب آن تا اندازه‌ی زیادی آگاه شد، با مطالعه‌ی سیستم حمل و نقل جوامع، می‌توان به ویژگی‌های اقتصادی، سیاسی، اجتماعی، فرهنگی و حتی شخصی ساکنین آن جامعه آگاهی پیدا کرد (Joghataie, 2011). حمل و نقل یکی از پایه‌های اصلی توسعه پایدار و متوازن در جوامع بشری محسوب شده و در واقع شبکه‌های حمل و نقل با مؤلفه‌های مهمی همچون اقتصاد، امنیت و عدالت اجتماعی ارتباط تنگاتنگ دارند. در فرآیند توسعه اقتصادی و اجتماعی

کشورها، همبستگی مستقیم، میان گسترش حمل و نقل و دستیابی به نرخ رشد اقتصادی و اجتماعی کشورها وجود دارد. به عبارت دیگر، همراه با افزایش تولید ناخالص داخلی، میزان ارزش افزوده بخش حمل و نقل نیز افزایش می یابد و به همین دلیل است که توسعه و رشد اقتصادی، وابسته به توسعه بخش حمل و نقل است و فعالیت های حمل و نقل از جمله فعالیت های اساسی و زیربنایی برای رشد و تحول اقتصاد به حساب می آید. در این میان، پل ها نقش به سزایی در شبکه حمل و نقل زمینی ایفا می نمایند. پل ها از پرهزینه ترین و راهبردی ترین عناصر راه و راه آهن محسوب می شوند که با عبور از موانع طبیعی و مصنوعی احداث می گردند و مانند هر سازه دیگری و شاید بیش از بسیاری از آنها تحت تأثیر محیط قرار دارند و حتی با فرض طراحی صحیح و اجرای دقیق، عوامل بسیاری در دوام و سلامت آنها مؤثر است و از آنجاکه جزء سازه های پرهزینه و حساس محسوب می شوند؛ کوتاهی در نگهداری آنها در دوران بهره برداری، اثرات مخربی به دنبال خواهد داشت. به این ترتیب، تشخیص این محدودیت ها و بازرسی های مرتب و برنامه ریزی شده ی پل ها، برای پیش گیری از خرابی های جدی و خطر آفرین و همچنین جلوگیری از صرف هزینه های گزاف جبران این خرابی ها، بسیار ضروری است. پل ها نمی توانند برای همیشه باقی بمانند و هر شکل سازه ای که به کار رود و هر مصالحی که استفاده شود، دیر یا زود آثار فرسودگی در آن ظاهر می شود. عوامل زیادی مانند شکل سازه، مصالح ساختمانی، کیفیت ساخت، طراحی، اجراء، شرایط جوی، آبرستگی، حرارت، خستگی، زلزله، سیلاب، هوا، تراکم بارهای عبوری وارده وجود دارد که در چگونگی و میزان فرسودگی و زوال پل مؤثرند. تا قبل از دهه ۷۰ قرن ۱۹، غالباً هنگام ساختن پل ها، بدون توجه به هزینه نگهداری سالانه ای که در پیش خواهد داشت، ارزان ترین مصالح را انتخاب می کردند. پل های چوبی اولیه، پس از مدتی کاملاً از بین رفتند؛ اما انواع بسیاری از آنها که از مصالحی چون چدن، آهن معمولی، فولاد، ترکیب بتن و فولاد، بتن مسلح و بتن پیش تنیده ساخته شده بودند، باقی ماندند (Rayal, 2010). موضوع ارزش پل ها و خسارات ناشی از بی توجهی به نگهداری آنها یکی از مواردی است که باید به طور وسیع و گسترده مورد توجه مسئولان قرار گیرد. در بسیاری از موارد، استراتژی های درمانی به جای پیشگیری مورد استفاده قرار می گیرد که هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست و هم به لحاظ شرایط بهره برداری و عمر مفید سازه، عواقب ناخوشایندی را به دنبال خواهد داشت. مدیریت پل در کشورهای توسعه یافته، از

سال ها پیش مورد توجه قرار گرفته، به طوری که امروزه به عنوان یک سیستم در مدیریت نگهداری سازه ها از آن بهره گرفته می شود. در ایران نیز با وجود بیش از ۸۰۰۰ دستگاه پل، این امر حائز اهمیت فوق العاده ای است و بایستی با صرف به موقع منابع مالی، در حفظ و نگهداری این سرمایه های ملی کوشش نمود (Rayal, 2010)؛ بنابراین درست و سالم بودن و کارایی پل ها، نشان دهنده ی آگاهی مدیریت حمل و نقل به اهمیت پل ها از جنبه های مختلف است و از سوی دیگر وجود پل های فرسوده و تعمیر نشده حاکی از وجود ضعف در برنامه ریزی اجتماعی و اقتصادی است و این امر ممکن است ناشی از کم اطلاعی از فناوری مدیریت فنی پل ها و یا بی توجهی مدیران و برنامه ریزان در سطوح مختلف باشد که در هر دو صورت، نشان دهنده ی آن است که وضعیت موجود نیازمند بهبود است (Joghataie, 2011). رسیدگی به پل ها و تعمیر و نگهداری به موقع آنها، موجب افزایش عمر مفید پل ها می گردد. در این پژوهش، ابتدا عوامل مهم و حیاتی در خرابی پل های در حال بهره برداری راه آهن مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور انجام این تحقیق، پس از جمع آوری اطلاعات موجود در اداره کل راه آهن شمال و همچنین اداره کل خط و ابنیه فنی راه آهن جمهوری اسلامی ایران و مذاکره با کارشناسان متخصصان و اساتید این حوزه و همچنین بهره گیری از اطلاعات جمع آوری شده از وضعیت پل های قطعه ی زیر آب تا گرگان راه آهن محور شمال و انواع و میزان خرابی آنها توسط کارشناسان، وضعیت خرابی و نقایص هر یک از این پل ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس روش های مختلف نگهداری و تعمیر پل های بتنی راه آهن مورد بررسی قرار گرفت و به منظور شناسایی و ارزیابی میزان اثربخشی و هزینه ی تعمیر و نگهداری هر یک از روش ها، به صورت مجزا از کارشناسان و اساتید متخصص در این زمینه بهره گرفته شده است. در انتها میزان هزینه ترمیمی لازم برای هر یک از پل ها مشخص گردید و در ادامه با تولید یک مدل ریاضی که بتواند با رعایت محدودیت های مسئله، اهداف خود را که کمینه سازی هزینه و بیشینه سازی اثربخشی می باشد، محقق کند. در نهایت با بکارگیری یکی از روش های فرا ابتکاری حل مسئله و برنامه نویسی در نرم افزار MATLAB به تخصیص بهینه استراتژی های نگهداری و تعمیر مناسب برای این پل ها با توجه به بودجه ی محدود پرداخته شده است.

۲- پیشینه تحقیق

لی و کیم (۲۰۰۷) از الگوریتم ژنتیک برای اولویت‌بندی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری و انتخاب روش‌های بهینه‌ی تعمیر و تقویت عرشه‌ی پل‌های بتن مسلح در سیستم مدیریت پل استفاده کردند. در این تحقیق آمده است، همواره می‌توان انتخاب فعالیت‌های نگهداری را به عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه مدل کرده و از الگوریتم ژنتیک برای حل آن استفاده کرد. دو هدفی که این تحقیق برای مدل بهینه‌سازی خود در نظر گرفته است، به حداکثر رساندن دوره‌ی اثربخشی فعالیت تعمیر و نگهداری و به حداقل رساندن هزینه‌ی تعمیر و نگهداری در سطح شبکه‌ای از پل‌هاست (Lee & Kim, 2007). بوچینی و فرانگوپول (۲۰۱۱) به برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری بهینه‌ی شبکه‌ای از پل‌ها در قالب محاسبات احتمالی پرداختند. چارچوب محاسباتی این مقاله جهت بهینه‌سازی پارتو برای به‌کارگیری تعمیر و نگهداری پیشگیرانه‌ی پل‌های بزرگراهی شبکه‌ی حمل‌ونقل ارائه شده است. ویژگی پل‌ها توسط مشخصات شاخص قابلیت اطمینان غیرقطعی خودشان نشان داده شده است و شرایط در حال سرویس‌دهی و خارج از سرویس‌دهی پل‌ها با توجه به ساختار ارتباطی آن‌ها شبیه‌سازی شده است. سپس الگوریتم ژنتیک چندهدفه به‌عنوان ابزاری عددی برای حل مشکل بهینه‌سازی انتخاب شده است که در این الگوریتم دو هدف متضاد، به حداقل رساندن هزینه‌ی کل تعمیر و نگهداری فعلی و به حداکثر رساندن شاخص عملکرد شبکه هست که در نهایت توسط حواب‌های پارتو راه‌حل‌های بهینه‌ای پیش روی مدیران قرار می‌گیرند که بسته به عوامل اقتصادی و مهندسی، قابلیت انتخاب دارند. در پایان مقاله آمده است که باید نسبت به هزینه‌ها و اثرات مداخلات تعمیر و نگهداری در آینده دقت بیشتری به عمل بیاید تا از داده‌های واقعی استفاده شود (Boochini & Frangapol, 2011). اورسیسی و کریمونا (۲۰۱۱) به بهینه‌سازی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری برای مدیریت پل‌های ملی موجود در فرانسه پرداختند. مدل این مقاله براساس زنجیره‌ی مارکوف مجهز به داده‌های جمع‌آوری‌شده از وضعیت پل‌ها هست که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مدل‌های پیش‌بینی در تجزیه‌وتحلیل هزینه و استراتژی‌های مختلف تعمیر و نگهداری اشاره کرد. این تجزیه‌وتحلیل، به‌منظور بررسی سناریوهای مختلف تعمیر و نگهداری اداری راه فرانسه به‌کارگیری شده است که هدف آن تعریف فعالیت‌های تعمیر و نگهداری برای هر پل نیست، بلکه ارائه‌ی یک رویکرد کلی از ترکیب نتایج برنامه‌ی

نمرده‌ی در ارزیابی کیفیت سازه‌های مهندسی با منابع مالی جهت مدیریت پل‌های ملی به وزارت حمل‌ونقل هست. در نتیجه، چندین سناریوی آینده براساس به حداقل رساندن هزینه‌ی تعمیر و نگهداری سالانه، تعریف و محدودیت‌هایی برای هر سناریو و شاخص‌های کیفیت، معرفی و براساس آنچه در قوانین مالی معرفی‌شده ارزیابی می‌شود (Orcessi & Cremona, 2011). فرانگوپول و بوچینی (۲۰۱۲) چالش‌ها و دستاوردهای عملکرد، تعمیر و نگهداری و بهینه‌سازی شبکه‌ی پل را تحت عدم قطعیت مورد بررسی قرار داد. از این‌رو برای تحقق این هدف به مدل‌سازی رویدادهای طبیعی شدید، تعامل بین اجزای هر یک از اعضای شبکه (مثل پل) به‌صورت منحصربه‌فرد و به‌طورکلی تعامل اعضای شبکه باهم انجام می‌شود و در حوزه‌ی زمان بررسی می‌شود. سپس مسئله‌ی زوال سازه‌ای و اثرات آن بر عملکرد شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها مجموعه‌ای از مشکلات و برنامه‌های کاربردی منتخب در نظر گرفته شده و چالش‌های بیشتر شناسایی شده و برای تحولات در آینده پیشنهاد می‌شود (Frangopol & Boochini, 2012).

ژو و لیو (۲۰۱۳) با در نظر گرفتن معیارهایی چون شاخص‌های عملکرد، عمر سرویس‌دهی و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری چرخه‌ی عمر پل‌ها به بررسی بهینه‌سازی استراتژی تعمیر و نگهداری پل‌هایی با شایسته‌های بتن‌آرمه پرداختند. لازم به ذکر است که شاخص‌های قابلیت اطمینان و وضعیت پل به‌عنوان شاخص‌های عملکرد تعریف شده است و فرآیندهای خرابی برای شاخص‌های عملکرد با و بدون فعالیت‌های تعمیر و نگهداری توضیح داده می‌شود. بهینه‌سازی برنامه‌ی تعمیر و نگهداری چرخه‌ی عمر پل‌های روبه‌زوال در این مقاله به‌عنوان یک مسئله‌ی چندهدفه فرموله شده که توسط روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب بهبود می‌یابد و شاخص وضعیت، شاخص قابلیت اطمینان، عمر سرویس‌دهی و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری چرخه‌ی عمر به‌عنوان چهار تابع هدف به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از این است که به‌طورکلی مدل بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهاد شده در این مقاله می‌تواند رابطه‌ی بین عملکرد پل، طول عمر و هزینه را در نظر بگیرد و استراتژی تعمیر و نگهداری به‌دست آمده از این روش می‌تواند سازه‌ای با بهترین عملکرد و بیشترین طول عمر بر پایه‌ی هزینه‌ی تعمیر و نگهداری چرخه‌ی عمر کمتر ایجاد کند. همچنین معلوم شد که روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب این پتانسیل را دارد که برای پیدا کردن راه‌حل‌های جایگزین جهت تصمیم‌گیری در بخش‌های مختلف مدیریت پل به‌کارگیری شود (Zhu & Liu,

نظر به اینکه در دهه‌ی اخیر مشکلات اقتصادی گریبان‌گیر بسیاری از کشورهای درحال توسعه و حتی توسعه‌یافته شده است و بودجه‌ی کافی به امر تعمیر و نگهداری سازه‌های فنی جاده‌ای و ریلی اختصاص داده نمی‌شود، تحقیقات این دهه گرایش بیشتری به بهینه‌سازی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری و رسیدن به بیشترین کیفیت در قبال کمترین هزینه توسط الگوریتم‌های فراابتکاری، پیدا کرده است. این پژوهش نیز با در نظر گرفتن اهمیت پل‌های راه‌آهن در صنعت حمل‌ونقل کشور و پیرشدن بخش زیادی از آن‌ها و استفاده از نتایج تحقیقات اخیر، ابتدا به شناسایی و ارزیابی انواع خرابی‌ها و روش‌های تعمیر و نگهداری پل‌های بتنی راه‌آهن می‌پردازد و در ادامه با تولید یک مدل ریاضی به کمک توابع، محدودیت‌ها و پارامترهای مورد نظر و به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه یا MOPSO که کمتر مورد استفاده قرار گرفته است، به بهینه‌سازی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری این پل‌ها در شرایط محدودیت بودجه پرداخته خواهد شد.

۳- بهینه‌سازی چندهدفه گروه ذرات (MOPSO)

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه گروه ذرات توسط کوئلو در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید و در واقع این الگوریتم تعمیمی است از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO) که برای حل مسائل چندهدفه بکار می‌رود. در الگوریتم MOPSO یک مفهومی به نام آرشیو یا مخزن نسبت به الگوریتم PSO اضافه شده است که به تالار مشاهیر نیز معروف است. انتخاب بهترین جواب کلی و بهترین خاطره شخصی برای هر ذره، گام مهم و اساسی در الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه گروه ذرات است. هنگامی که ذرات می‌خواهند حرکتی انجام دهند، یک عضو از مخزن را به عنوان لیدر یا رهبر انتخاب می‌کنند. این لیدر حتماً باید عضو مخزن و همچنین نامغلوب باشد. اعضای مخزن بیانگر جبهه پارتو و شامل ذرات نامغلوب هستند. پس به جای G_{best} یکی از اعضای مخزن انتخاب می‌شود. به این دلیل در PSO مخزن وجود ندارد، زیرا در آن تنها یک هدف وجود دارد و یک ذره است که بهترین است. اما در MOPSO چند ذره وجود دارد که نامغلوب هستند و در مجموعه جواب جای دارند. برای مقایسه بهترین بردار خرد فردی به شکل زیر عمل می‌شود (Moshakhian & Najafi, 2015):

(۱) اگر موقعیت جدید بهترین خاطره را مغلوب کند، آنگاه موقعیت جدید جای بهترین خرد را می‌گیرد. به بیان ریاضی:

$$Pbest_i^{n+1} = X_i^{n+1}$$

(۲) اگر موقعیت جدید توسط بهترین خاطره مغلوب شد، کاری انجام نمی‌گیرد. به بیان ریاضی:

(2013). بارونه و همکارانش (۲۰۱۴) مقوله‌ی بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری چرخه‌ی عمر پل‌های روبه‌زوال را با توجه به نرخ پیش‌بینی‌شده‌ی سالانه برای شکست سیستم و هزینه‌ی تجمعی پیش‌بینی‌شده، مورد بررسی قرار دادند. در این روش اثرات سیستم سازه‌ای توسط مدل کردن سازه به عنوان سیستمی سری، موازی و یا سری- موازی در نظر گرفته شده که مؤلفه‌های آن در معرض پدیده‌ی زوال وابسته به زمان قرار گرفته است. همچنین گزینه‌های مختلف تعمیر و نگهداری در دسترس، بسته به وضعیت آسیب و نتایج هر بازرسی در نظر گرفته می‌شود. سپس برای هر جز، زمانی که بازرسی‌ها نشان دهد خرابی عضو به حد آستانه رسیده و یا از آن عبور کرده است، با هدف کاهش نرخ شکست سیستم، تعمیر و نگهداری ضروری یا پیشگیرانه، تجویز و اعمال می‌شود و در غیر این صورت هیچ‌گونه اقدام تعمیر و نگهداری انجام نمی‌شود. لازم به ذکر است که روش پیشنهاد شده جهت ارائه‌ی برنامه‌ی تعمیر و نگهداری و بازرسی بهینه، توسط کاهش توأمان نرخ پیش‌بینی‌شده‌ی شکست سیستم و هزینه‌ی بازرسی و تعمیر و نگهداری طول عمر سازه فرموله شده است و برای یک پل به صورت نمونه اعمال شده است (Barone et al, 2014). هو و همکاران (۲۰۱۵)، چگونگی پیدا کردن طرح بهینه‌ی تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان برای شبکه‌ای از پل‌های رو به وخامت در مقیاس بزرگ را نشان می‌دهد که هدف آن به حداقل رساندن اختلالی به نام مسافت اضافی سفر، ناشی از شکست بالقوه‌ی پل (بسته شدن پل) توسط سنجش هزینه‌ی واقعی کاربر و برنامه‌ریزی بلندمدت تحت محدودیت بودجه است. در این تحقیق ابتدا حدس زده شد و سپس تأیید شد که افزایش مورد انتظار در میزان خودرو- مایل بر اثر شکست‌ها می‌تواند توسط مجموع افزایش مورد انتظار این میزان در اثر هر شکست به صورت فردی تقریب زده شود که این امر اجازه می‌دهد تا یک مشکل در سطح شبکه به مشکلات هر پل تجزیه شود و به طور مؤثرتر حل شود. از نتایج این مقاله می‌توان به این مورد اشاره کرد که هزینه‌های کلی کاربران به طور مستقیم توسط افزایش زمان و مسافت سفر اندازه‌گیری می‌شود که این دو فاکتور مرتبط‌ترین معیار در مقایسه با تحقیقات گذشته است؛ بنابراین باید عنوان کرد که روش ارائه شده بسیار کارآمد بوده و قادر است به بهینه‌سازی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری شبکه‌ی بزرگی از هزاران پل که در طول دوره‌های متعدد روبه‌زوال رفته‌اند، پردازد (Hu et al, 2015). با توجه به مطالب گفته شده، در دو دهه‌ی اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در حوزه‌ی مدیریت پل و اقدامات تعمیر و نگهداری پل‌ها انجام شده و همچنین با

(۳) $Pbest_i^n = Pbest_i^{n+1}$ اگر هیچ کدام یکدیگر را مغلوب نکنند، به تصادف یکی از آنها به عنوان بردار بهترین موقعیت در نظر گرفته می‌شود. ترتیب اجرای این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

جدول ۱. وزن و قیمت واحد بسته‌های کاری پروژه

ردیف	عنوان بسته‌ی کاری	واحد	برآورد حجم کل کار	وزن بسته‌ی کاری	هزینه کلی بسته‌ی کاری (تومان)	هزینه واحد بسته‌ی کاری (تومان)
۱	شستشو و پاکسازی سطح	مترمربع	۲۰۰۰	۷,۸۴	۴۲۰۶۳۹۲۰۶	۲۱۰۳۲
۲	اجرای لایروبی	مترمکعب	۱۶۰۰۰	۶,۳۵	۳۴۰۶۹۶۲۹۶	۲۱۲۹۴
۳	ترمیم بتن	مترمربع	۱۲۰۰۰	۱۷,۶۷	۹۴۸۰۴۷۸۰۳	۷۹۰۰۴
۴	ترمیم سنگ	مترمربع	۱۵۰۰	۲,۱۷	۱۱۶۴۲۶۹۲۳	۷۷۶۱۸
۵	ترمیم ترک	متر طول	۸۰۰	۱۱,۴۳	۶۱۳۲۵۳۳۳۳	۷۶۶۵۶۷
۶	ترفیع قرنیز	متر طول	۵۰۰۰	۸,۷۵	۴۶۹۴۶۳۴۰۰	۹۳۸۹۳
۷	تفکیک بالاست روی پل‌ها	متر طول	۳۵۰۰	۴۵,۷۹	۲۴۵۶۷۶۹۰۳۸	۷۰۱۹۳۴

شرایط موجود تعیین می‌گردد. جدول ۱، وزن مربوط به بسته‌های کاری موجود در پروژه‌ی مذکور و قیمت واحد اجرا و تأمین مصالح هر بسته‌ی کاری را نشان می‌دهد.

۴-۲- دسته‌های تعمیراتی و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری

پل‌ها

به دلیل نیاز کلیه پل‌های این تحقیق به بسته‌های کاری پاکسازی سطح، لایروبی، ترمیم بتن، ترفیع قرنیز و تفکیک بالاست، این پنج بسته‌ی کاری در یک بسته‌ی کاری با عنوان ۵ اقدام مشترک تجمیع شده و بسته‌های کاری مورد نیاز جهت تعمیر ۱۷۲ پل مورد نظر به سه بسته‌ی کاری: ۵ اقدام مشترک، ترمیم ترک و ترمیم سنگ تبدیل شدند. در ادامه، با توجه به اینکه این پل‌ها به کدامیک از بسته‌های کاری ترمیم سنگ و ترمیم ترک نیازمند هستند، به ۴ دسته‌ی تعمیراتی تقسیم شده‌اند و هزینه‌ی منتج از اقدامات تعمیراتی بر روی آن‌ها براساس مبلغ واحد هر بسته‌ی کاری تعیین می‌گردد. به ترتیب جدول ۲ دسته‌های تعمیراتی و جدول ۳ هزینه‌ی نگهداری و تعمیر هر یک از پل‌ها را به تفکیک هر بسته‌ی کاری و به صورت کلی نشان می‌دهند و در نتیجه، هزینه‌ی کلی تعمیر و نگهداری این ۱۷۲ پل به دست می‌آید.

تعیین پارامترهای مورد نیاز برای اجرای الگوریتم چندهدفه گروه ذرات MOPSO: حداکثر تکرار برای اجرای الگوریتم، اندازه جمعیت، مقادیر C0, C1, C2 و میزان اعضای مخزن.

- (۱) جمعیت اولیه ایجاد می‌شود.
 - (۲) بهترین خرد فردی هر ذره تعیین می‌شود.
 - (۳) اعضای نامغلوب جمعیت جداسازی و در مخزن ذخیره می‌شوند.
 - (۴) هر ذره از میان اعضای مخزن یک لیدر (رهبر) انتخاب می‌کند و حرکت خود را انجام می‌دهد.
 - (۵) بهترین خرد فردی هر کدام از ذرات به روز می‌شوند.
 - (۶) اعضای نامغلوب جدید به مخزن افزوده می‌شوند.
 - (۷) اعضای مغلوب مخزن حذف می‌شوند.
- در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده است، از شماره ۱ به بعد الگوریتم تکرار می‌شود.

۴-۱- نتایج محاسباتی

۴-۱-۱- وزن بسته‌های کاری در بخش ترمیم

این وزن‌ها براساس چهار عامل سختی کار، ارزش مصالح مصرفی در آن بسته‌ی کاری، ارزش تجهیزات و ماشین‌آلات مورد نیاز در آن بسته‌ی کاری و حجم کار در آن بسته‌ی کاری و مقایسه‌ی بسته‌های کاری مختلف با یکدیگر و بحث و بررسی

۴-۳- تعریف مسئله

هدف نهایی این تحقیق، بهینه‌سازی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری پل‌ها می‌باشد. با توجه به ادبیات موضوع و بررسی‌های متعدد، مشخص شد بهینه‌سازی این تحقیق از نوع دو هدفه است. هدف اول، کمینه‌سازی هزینه و هدف دوم بیشینه‌سازی اثربخشی تمهیدات تعمیر و نگهداری بر روی پل‌ها است. این دو هدف کاملاً در تضاد یکدیگر هستند، طبیعتاً برای بیشینه‌سازی اثربخشی باید هزینه‌ی بیشتری انجام داد و از طرف دیگر، کم کردن هزینه منجر به کاهش اثربخشی می‌شود. پس باید یک تعادل بین این دو هدف برقرار و راه‌حل یا راه‌حلهایی جهت بهینه‌سازی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری پیدا شود. نکته‌ی دیگر در این مسئله، محدودیت بودجه‌ی در دسترس است. این بودجه حتماً از مقدار کل بودجه مورد نیاز جهت تعمیر و نگهداری تمامی پل‌ها کمتر است تا حل این مسئله معنای علمی پیدا کند، البته این مهم به حقیقت نیز نزدیک است، زیرا همواره بودجه‌ی در دسترس سازمان‌ها و مدیران کمتر از هزینه‌های پیش‌بینی شده‌ی آن‌هاست.

جدول ۲. دسته‌های تعمیراتی

شماره دسته	عنوان	تعداد پل‌های دسته
۱	پل‌های نیازمند به ۵ اقدام مشترک، ترمیم ترک و ترمیم سنگ	۴
۲	پل‌های نیازمند به ۵ اقدام مشترک و ترمیم ترک	۵۹
۳	پل‌های نیازمند به ۵ اقدام مشترک و ترمیم سنگ	۲۲
۴	پل‌های نیازمند به ۵ اقدام مشترک	۸۷

ترتیب قرارگیری پل‌ها در جدول، براساس نیازشان به تعمیر و نگهداری می‌باشد. ۴ پل به ۵ اقدام مشترک، ترمیم ترک و ترمیم سنگ، ۵۹ پل بر ۵ اقدام مشترک به ترمیم ترک، ۲۲ پل دیگر به ترمیم سنگ و ۵ اقدام مشترک و ۸۷ پل آخر نیز تنها به ۵ اقدام مشترک جهت تعمیر و نگهداری نیازمند هستند.

جدول ۳. هزینه‌ی تعمیر و نگهداری پل‌ها

ردیف	کیلومتر	هزینه ۵ اقدام مشترک (تومان)	هزینه ترمیم ترک (تومان)	هزینه ترمیم سنگ (تومان)	هزینه کل (تومان)
۱	۳۲۳+۲۲۰	۳۵۶۵۷۲۰۲,۰۸	۳۹۸۶۱۴۸,۴	۱۶۱۶۰۰۶,۷۶	۴۱۲۵۹۳۵۷,۲۴
۲	۳۶۴+۵۱۵	۹۷۴۲۷۰۸,۲	۱۵۳۳۱۳۴	۱۳۵۸۳۱,۵	۱۱۴۱۱۶۷۳,۷
۳	۴۷۹+۵۱۵	۱۴۵۶۰۵۴۰,۳۲	۷۷۴۲۳۲۶,۷	۱۷۶۰۳۷۶,۲۴	۲۴۰۶۳۲۴۳,۲۶
۴	۴۹۱+۸۸۰	۱۰۰۸۹۵۸۳,۷۲	۳۸۳۲۸۳,۵	۹۳۱۴۱۶	۱۱۴۰۴۲۸۳,۲۲
۵	۳۱۲+۴۸۰	۱۵۹۳۵۱۰۴۷,۴	۱۹۳۵۱۲۱۷,۳۵	-	۱۷۸۷۰۲۲۶۴,۷
۶	۳۱۷+۵۰۰	۴۶۶۱۳۵۶۳,۳	۷۶۶۵۶۷۰	-	۵۴۲۷۹۲۳۳,۳
.....
۱۶۸	۴۷۸+۴۰۰	۲۹۲۸۶۸۴۳,۲	-	-	۲۹۲۸۶۸۴۳,۲
۱۶۹	۴۸۰+۷۵۰	۸۵۰۴۳۷۳,۱۲	-	-	۸۵۰۴۳۷۳,۱۲
۱۷۰	۴۸۴+۳۲۰	۸۸۱۲۰۴۰,۸۴	-	-	۸۸۱۲۰۴۰,۸۴
۱۷۱	۴۸۵+۷۴۰	۹۳۴۲۳۹۰	-	-	۹۳۴۲۳۹۰
۱۷۲	۴۹۲+۶۰۰	۲۶۷۵۳۲۳۰,۴	-	-	۲۶۷۵۳۲۳۰,۴
		مجموع هزینه‌ی نگهداری و تعمیر پل‌ها: (تومان)			۲۸۹۳۴۵۲۲۰۷

ریاضی در نظر گرفته شده است تا علاوه بر تلاش در جهت تحقق دو هدف کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی اثربخشی، محدودیت‌هایی از قبیل کل بودجه‌ی در دسترس جهت تعمیر

به همین دلیل این کمبود بودجه، مدیران را بر آن می‌دارد تا به فکر بهینه‌سازی بودجه‌ی خود باشند تا بیشترین بهره‌وری را در تشکیلات خود داشته باشند. برای حل این مسئله، یک مدل

۴-۲-۴- متغیر مسئله

X_{ijk} : اگر حالت k ام برای تعمیر و نگهداری پل i ام از دسته j ام انتخاب گردد. در غیر این صورت.

۴-۳- توابع هدف

توابع هدف ۱ و ۲، به صورت برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح نوشته شده‌اند که تابع اول باید کمینه گردد، یعنی مجموع هزینه‌ی حالت‌های تعمیر و نگهداری پل‌ها به حداقل ممکن خود برسد و همچنین تابع هدف دوم بیشینه گردد، یعنی جمع اثربخشی (هزینه/عمر) این حالت‌های انتخابی به حداکثر مقدار ممکن برسد.

۴-۴- محدودیت‌های مسئله

محدودیت ۳ تضمین می‌نماید جمع هزینه‌ی تعمیر و نگهداری پل i ام از یک مقدار معینی بیشتر نشود؛ که این مقدار معین برابر با حاصل ضرب نسبت سهم هزینه‌ی واقعی تعمیر و نگهداری پل i ام به کل پل‌های مورد مطالعه در بودجه‌ی محدود مشخص شده می‌باشد.

محدودیت ۴ تضمین می‌کند جمع هزینه‌ی تعمیر و نگهداری کل پل‌ها از مقدار معینی (بودجه‌ی محدود) که برابر B_{total} است، بیشتر نشود.

محدودیت ۵ تعداد پل‌های انتخابی از هر دسته را محدود می‌کند که این تعداد باید بین بازه‌ی بسته‌ی L_j و U_j باشد.

۴-۴-۵- حالت‌های تعمیر و نگهداری (k)

در این تحقیق، هر پل با توجه به اینکه در کدام دسته‌ی تعمیراتی قرار داشته باشد، حالت‌های مختلف تعمیر و نگهداری می‌تواند روی آن صورت بگیرد. جدول ۴ حالت‌های تعمیر و نگهداری مختلف برای دسته‌ی چهارگانه را نشان می‌دهد.

پل‌ها، بودجه‌ی در دسترس برای تعمیر هر پل و تعداد پل‌های تحت تعمیر از هر دسته‌ی تعمیراتی را نیز رعایت کند. برای حل این مسئله، از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه استفاده شده است که در بخش‌های بعدی به طور کامل به جزئیات مدل ریاضی پیشنهادی و الگوریتم به کار برده شده در حل این مسئله پرداخته شده است.

۴-۴-۱- مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی پیشنهادی

مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی پیشنهادی این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

O. F.

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ijk} X_{ijk} \quad (1)$$

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_i a_{ijk} X_{ijk} \quad (2)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ijk} X_{ijk} \leq g_i B_{total} \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ijk} X_{ijk} \leq B_{total} \quad (4)$$

$$L_j \leq \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{ijk} \leq U_j \quad (5)$$

۴-۴-۱- نمادگذاری

i : پل $\{1, 2, \dots, 87\}$

j : دسته‌های تعمیراتی $\{1, \dots, 4\}$

K : حالت‌های تعمیر و نگهداری $\{1, \dots, 7\}$

۴-۴-۱- الف. پارامترهای مسئله:

C_{ijk} : هزینه حالت k ام تعمیر و نگهداری پل i ام از دسته‌ی j ام

d_i : وزن نهایی پل i ام در بخش اولویت‌بندی

a_{ijk} : اثربخشی (هزینه/عمر) حالت k ام تعمیر و نگهداری پل i ام

از دسته‌ی j ام

g_i : نسبت هزینه‌ی واقعی تعمیر و نگهداری پل i ام به کل پل‌های

مورد مطالعه (سهم هزینه پل i ام از کل بودجه)

L_j : کران پایین بازه‌ی تعداد انتخاب پل‌های دسته‌ی j ام

U_j : کران بالای بازه‌ی تعداد انتخاب پل‌های دسته‌ی j ام

B_{total} : کل بودجه‌ی در دسترس (بودجه‌ی محدود)

جدول ۴. حالت‌های تعمیر و نگهداری دسته‌های چهارگانه

حالت‌های تعمیر و نگهداری							عنوان دسته
۵ اقدام مشترک، ترمیم ترک و ترمیم سنگ	ترمیم ترک و ترمیم سنگ	۵ اقدام مشترک و ترمیم سنگ	۵ اقدام مشترک و ترمیم ترک	ترمیم سنگ	ترمیم ترک	۵ اقدام مشترک	
*	*	*	*	*	*	*	دسته ۱
-	-	-	*	-	*	*	دسته ۲
-	-	*	-	*	-	*	دسته ۳
-	-	-	-	-	-	*	دسته ۴

پل در پارامترهای ترک منفرد عمیق، طبله شدن بتن، وجود املاح و رطوبت، ترک گستره سطحی، خوردگی مقاطع فولادی، سنمت (سیمانی) شدن بالاست، آبستگي کف بستر، آبستگي کف بستر، رسوب بستر و اضمحلال سطحی سنگ مورد ارزیابی کارشناسان قرار گرفت. پس از ارزیابی‌های انجام شده و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، پل‌ها با توجه به معیارهای گفته شده از نظر نیاز به تعمیر و نگهداری مشخص شدند که نتایج اولویت‌بندی به صورت خلاصه در جدول ۵ نشان داده شده است.

۴-۴-۷- اثربخشی حالت تعمیر و نگهداری (a)

اثربخشی، کمیتی بدون واحد مشخص است که در بحث تعمیر و نگهداری می‌تواند از طریق درصد، میزان عمر، نسبت عمر به هزینه یا هر واحد دیگری معرفی شود. در این پژوهش، میزان اثربخشی، از طریق نسبت عمر (برحسب سال) به هزینه (برحسب تومان) تعیین می‌گردد و این نسبت برای حالت‌های مختلف تعمیر و نگهداری هر پل با توجه به دسته‌ی تعمیراتی که در آن قرار می‌گیرد و براساس تقسیم عمری که اعمال یک حالت تعمیر و نگهداری می‌تواند در شرایط ایده‌آل باعث حفظ شرایط فعلی و سرویس‌دهی پل گردد، به هزینه‌ای که جهت اعمال آن حالت تعمیر و نگهداری برای پل مورد نظر انجام می‌شود، به دست می‌آید. این نکته قابل ذکر است که مدت زمانی که یک تعمیر و نگهداری بتواند باعث حفظ شرایط سازه‌ای و سرویس‌دهی پل گردد، به کیفیت مصالح مصرفی، کیفیت و شرایط اجرا و ... بستگی دارد، اما با تمامی این موارد می‌تواند به صورت تقریبی و با نظرسنجی از کارشناسان امر، عددی برحسب سال برای آن در نظر گرفت که به ترتیب جدول ۶ میزان عمری که هر یک از

جدول ۵. نتایج بدست آمده از اولویت‌بندی پل‌ها

رتبه	بلاک	کیلومترژ	وزن نهایی
۱	شیرگاه- قائمشهر	۳۱۷+۵۰۰	۰,۰۷۹۹۶۸
۲	شیرگاه- قائمشهر	۳۱۴+۲۵۰	۰,۰۷۳۵۵
۳	بهشهر- بندرگز	۴۰۷+۴۲۰	۰,۰۳۶۱۹
۴	قائم‌شهر- ساری	۳۴۷+۸۵۰	۰,۰۳۴۱۶
۵	زیرآب- شیرگاه	۳۱۲+۲۰۰	۰,۰۳۳۴۱
.....
۱۶۹	ساری- نوبخت	۳۶۶+۳۴۰	۰,۰۰۰۳۷
۱۷۰	نکا- رستمکلا	۳۸۲+۳۲۰	۰,۰۰۰۳۷
۱۷۱	نکا- رستمکلا	۳۹۱+۷۷۰	۰,۰۰۰۳۷
۱۷۲	بهشهر- بندرگز	۴۳۶+۰۳۰	۰,۰۰۰۳۷

همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، در پل‌های دسته‌ی اول، ۷ نوع حالت تعمیر و نگهداری می‌تواند رخ دهد و در پل‌های دسته چهارم، تنها ۱ حالت تعمیر و نگهداری ممکن است اتفاق بیفتد و آن هم ۵ اقدام مشترک است.

۴-۴-۶- وزن اولویت‌بندی پل (d)

یکی از پارامترهای مدل ریاضی این تحقیق، **d** است که گویای وزن نهایی اولویت‌بندی پل می‌باشد، مطمئناً اگر پلی با اولویت بالاتر جهت تعمیر انتخاب شود، تأثیر بیشتری در افزایش اثربخشی استراتژی تعمیر و نگهداری خواهد داشت. به منظور محاسبه اولویت نگهداری و تعمیر پل‌ها خرابی‌های مربوط به هر

۹	۴۸۰	۱۱۶						
۱۷	+۳۲۰	۰,۰۳	-	-	-	-	-	-
۰	۴۸۴	۹۷۲						
۱۷	+۷۴۰	۰,۰۳	-	-	-	-	-	-
۱	۴۸۵	۷۴۶						
۱۷	+۶۰۰	۰,۰۱	-	-	-	-	-	-
۲	۴۹۲	۳۰۸						

حالت‌های تعمیر و نگهداری باعث حفظ شرایط فعلی و سرویس‌دهی پل می‌گردند را نشان می‌دهد و همچنین جدول ۷، میزان اثربخشی (a) هر یک از حالت‌های تعمیر و نگهداری برای این ۱۷۲ پل را نشان داده است.

جدول ۶. عمر حالت‌های مختلف تعمیر و نگهداری در دسته‌های تعمیراتی (سال)

دسته	دسته‌های تعمیراتی			حالت‌های تعمیر و نگهداری
	دسته اول	دسته دوم	دسته سوم	
۳۵	۳۰	۱۳	۱۳	۵ اقدام مشترک (k1)
-	-	۱۸	۱۵	ترمیم ترک (k2)
-	۲	-	۱	ترمیم سنگ (k3)
-	-	۳۵	۳۰	۵ اقدام مشترک و ترمیم ترک (k4)
-	۳۵	-	۱۵	۵ اقدام مشترک و ترمیم سنگ (k5)
-	-	-	۱۸	ترمیم ترک و ترمیم سنگ (k6)
-	-	-	۳۵	۵ اقدام مشترک، ترمیم ترک و ترمیم سنگ (k7)

جدول ۷. میزان اثربخشی حالت‌های مختلف تعمیر و نگهداری در

پل‌ها (a)

ردیف	حالت‌های تعمیر و نگهداری							کیلومتر تراژ
	K7	K6	K5	K4	K3	K2	K1	
۱	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۰	+۲۲۰
	۸۴۸	۲۱۳	۴۰۲	۷۵۷	۶۱۹	۷۶۳	۳۶۵	۳۲۳
۲	۰,۰۳	۰,۱۰	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۷	۰,۰۹	۰,۰۱	+۵۱۵
	۰۶۷	۷۸۵	۵۱۸	۶۶۱	۳۶۲	۷۸۴	۳۳۴	۳۶۴
۳	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	+۵۱۵
	۴۵۵	۸۹۴	۹۱۹	۳۴۵	۵۶۸	۹۳۷	۸۹۳	۴۷۹
۴	۰,۰۳	۰,۱۳	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۳۹	۰,۰۱	+۸۸۰
	۰۶۹	۶۹۱	۳۶۱	۸۶۵	۰۷۴	۱۳۶	۲۸۸	۴۹۱
۵	-	-	-	۰,۰۰	-	۰,۰۰	۰,۰۰	+۴۸۰
				۱۹۶		۹۳۰	۰۸۲	۳۱۲
.....
۱۶	-	-	-	-	-	-	۰,۰۱	+۴۰۰
۸							۱۹۵	۴۷۸
۱۶	-	-	-	-	-	-	۰,۰۴	+۷۵۰

جدول ۸. سهم هزینه‌ی هر پل از بودجه‌ی کل (g)

ردیف	کیلومتر تراژ	g
۱	۳۲۳+۲۲۰	۰,۰۱۴۳
۲	۳۶۴+۵۱۵	۰,۰۰۳۹
۳	۴۷۹+۵۱۵	۰,۰۰۸۳
۴	۴۹۱+۸۸۰	۰,۰۰۳۹
۵	۳۱۲+۴۸۰	۰,۰۶۱۸
.....
۱۶۸	۴۷۸+۴۰۰	۰,۰۱۰۱
۱۶۹	۴۸۰+۷۵۰	۰,۰۰۲۹
۱۷۰	۴۸۴+۳۲۰	۰,۰۰۳۰
۱۷۱	۴۸۵+۷۴۰	۰,۰۰۳۲
۱۷۲	۴۹۲+۶۰۰	۰,۰۰۹۲

۴-۴-۸- سهم هزینه‌ی هر پل (g)

با توجه به اینکه هزینه‌ی تعمیر و نگهداری هر پل و مجموع هزینه مورد نیاز جهت تعمیر و نگهداری این ۱۷۲ پل مشخص است، می‌توان از تقسیم این دو مقدار بر هم، سهم هزینه‌ی هر پل از بودجه‌ی کل را به دست آورد. مزیت این کار این است که یک روال منطقی در کاهش بودجه‌ی تخصیصی هر پل در شرایط محدودیت بودجه ایجاد می‌کند و با کاهش بودجه‌ی کل به هر مقدار، بودجه‌ی تخصیصی به هر پل به یک نسبت مشخص کاهش می‌یابد و پلی که بیشترین سهم را در بودجه‌ی کل برای تعمیر و نگهداری دارد، همواره به عنوان پرهزینه‌ترین پل مشخص است. این اقدام باعث جلوگیری از دخالت سلیقه شخصی مدیران در تخصیص بودجه می‌شود. در مدل ریاضی تعریف شده، محدودیتی وجود دارد که اجازه نمی‌دهد برای هر

تومان و ۱ میلیارد تومان، ۱۶ حالت مختلف برای مسئله‌ی این پژوهش مطرح می‌شود که براساس مشخصات هر حالت، ویژگی‌های مسئله تغییر کرده و جواب‌های مختلفی حاصل می‌شود. جدول ۱۰ حالت‌های مختلف مسئله‌ی تعریف شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. از این پس در ادامه‌ی این تحقیق، حالت‌های مختلف مسئله با عناوینی که در جدول ۱۰ آمده است، بیان می‌شوند.

جدول ۹. سناریوهای تعداد انتخاب پل از دسته‌های تعمیراتی

دسته سوم		دسته دوم		دسته اول	
(۲۵،۴۵)	(۱۰،۲۲)	(۳۱،۵۹)	(۱۵،۳۰)	(۱،۴)	(Lj, Uj)
(۲۵،۴۵)	(۱۰،۲۲)	(۱۵،۳۰)	(۱۵،۳۰)	(۱،۴)	سناریو ۱
(۴۶،۸۷)	(۱۰،۲۲)	(۱۵،۳۰)	(۱۵،۳۰)	(۱،۴)	سناریو ۲
(۲۵،۴۵)	(۱۰،۲۲)	(۳۱،۵۹)	(۳۱،۵۹)	(۱،۴)	سناریو ۳
(۴۶،۸۷)	(۱۰،۲۲)	(۳۱،۵۹)	(۳۱،۵۹)	(۱،۴)	سناریو ۴

جدول ۱۰. حالت‌های مختلف مسئله

ردیف	عنوان حالت	توضیحات
۱	1000s1	اعمال سناریو ۱ با بودجه‌ی ۱ میلیارد تومان
۲	1000s2	اعمال سناریو ۲ با بودجه‌ی ۱ میلیارد تومان
۳	1000s3	اعمال سناریو ۳ با بودجه‌ی ۱ میلیارد تومان
۴	1000s4	اعمال سناریو ۴ با بودجه‌ی ۱ میلیارد تومان
۵	1500s1	اعمال سناریو ۱ با بودجه‌ی ۱،۵ میلیارد تومان
۶	1500s2	اعمال سناریو ۲ با بودجه‌ی ۱،۵ میلیارد تومان
۷	1500s3	اعمال سناریو ۳ با بودجه‌ی ۱،۵ میلیارد تومان
۸	1500s4	اعمال سناریو ۴ با بودجه‌ی ۱،۵ میلیارد تومان
۹	2000s1	اعمال سناریو ۱ با بودجه‌ی ۲ میلیارد تومان
۱۰	2000s2	اعمال سناریو ۲ با بودجه‌ی ۲ میلیارد تومان

پل بیشتر از سهمش جهت تعمیر و نگهداری آن هزینه گردد. در جدول ۸، مقادیر مربوط به سهم هزینه‌ی هر پل از بودجه‌ی کل جهت تعمیر و نگهداری این ۱۷۲ پل نشان داده شده است.

۴-۹- کران بالا و کران پایین تعداد انتخاب پل از هر دسته‌ی تعمیراتی (Uj, Lj)

این دو پارامتر به محدودیت سوم مدل مربوط می‌شود و اجازه می‌دهد تا بازه‌ی مربوط به تعداد انتخاب پل از هر دسته‌ی تعمیراتی به صورت دلخواه انتخاب شود. این ویژگی اجازه می‌دهد تا تعداد انتخاب از دسته‌های تعمیراتی مهم‌تر را بیشتر کرده تا پل‌های بیشتری از آن دسته تعمیر شوند. از طرفی می‌توان در بحث اخذ خروجی از الگوریتم بهینه‌سازی تعریف شده براساس مدل، با تغییر میزان این دو پارامتر در دسته‌های تعمیراتی مختلف، حساسیت تعداد تعمیر و میزان هزینه را در برابر این تغییرات مشاهده کرده و به عددی بهینه و منطقی جهت کران بالا و پایین تعداد انتخاب از هر دسته‌ی تعمیراتی رسید.

۴-۵- حل مسئله توسط الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه و نرم‌افزار matlab

برای حل این مسئله، پس از کدنویسی در نرم‌افزار متلب، براساس مدل ریاضی تعریف شده و الگوریتم مورد نظر، حالت‌های مختلفی براساس بازه‌های مختلف تعداد انتخاب پل از دسته‌های تعمیراتی و سقف بودجه‌ی محدود در نظر گرفته شده، تعریف و طبق همین حالت‌ها خروجی‌های مطلوب از نرم‌افزار متلب گرفته شده است.

۴-۵-۱- سناریوهای تعداد انتخاب از دسته‌های تعمیراتی
براساس بازه‌های در نظر گرفته شده به وسیله‌ی کران پایین و بالا، تعداد پل‌های انتخابی از هر دسته جهت تعمیر و نگهداری، ۴ سناریو کلی برای حل مسئله تعریف شده است که جدول ۹ این ۴ سناریو را نشان می‌دهد.

۴-۵-۲- حالت‌های مختلف مسئله

با توجه به چهار سناریوی تعریف شده در قسمت قبل و ۴ بودجه‌ی محدود ۲،۵ میلیارد تومان، ۲ میلیارد تومان، ۱،۵ میلیارد

نرم افزار حاصل می شود که با بررسی و مقایسه آن ها با یکدیگر می توان به نتایج مختلفی دست پیدا کرد.

۴-۶-۱- مشخصات جواب های حاصل از حالت های مختلف مسئله

با توجه به اینکه پس از فرآیند حل مسئله توسط الگوریتم فراابتکاری بهینه سازی انبوه ذرات چندهدفه توسط نرم افزار متلب، برای هر یک از حالت های مسئله، جواب های متعدد هم ارزی تولید می گردد، لذا تنها مشخصات یکی از جواب های هر یک از ۱۶ حالت مسئله به ترتیب در جدول ۱۱ و ۱۲ آمده است.

۴-۶-۲- تغییرات هزینه نسبت به تغییرات بودجه محدود

برای نشان دادن تغییرات هزینه کل تعمیر و نگهداری نسبت به تغییر بودجه کل در دسترس، از میانگین هزینه ی سناریوهای مختلف در یک بودجه محدود استفاده شده و به صورت شکل ۱ نشان داده شده است. در این نمودار، محور افقی نشان دهنده ی میزان بودجه کل در دسترس و محور عمودی مقدار میانگین هزینه ی کل تعمیر و نگهداری منتج سناریوهای مختلف بودجه محدود مربوطه را نشان می دهد.

جدول ۱۲. تعداد پل های انتخاب شده از هر دسته ی تعمیراتی در

حالت های مختلف

ردیف	حالت مسئله	دسته ۱	دسته ۲	دسته ۳	دسته ۴
۱	1000s1	۱	۲۲	۱۳	۳۰
۲	1000s2	۳	۲۷	۱۳	۵۶
۳	1000s3	۲	۳۹	۹	۳۶
۴	1000s4	۳	۳۹	۱۳	۴۷
۵	1500s1	۳	۱۵	۱۲	۳۰
۶	1500s2	۲	۱۷	۱۱	۳۹
۷	1500s3	۲	۳۵	۱۳	۳۶
۸	1500s4	۳	۳۹	۱۳	۵۵
۹	2000s1	۱	۱۶	۱۱	۲۴
۱۰	2000s2	۳	۲۱	۱۰	۴۶
۱	2000s3	۲	۴۲	۱۰	۳۵

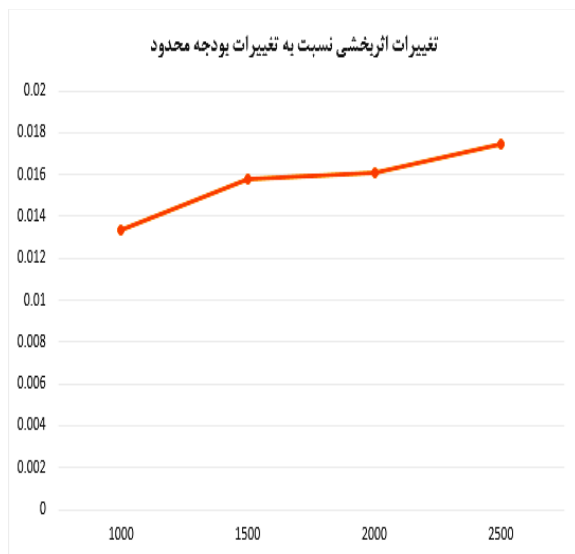
۱۱	2000s3	اعمال سناریو ۳ با بودجه ی ۲ میلیارد تومان
۱۲	2000s4	اعمال سناریو ۴ با بودجه ی ۲,۵ میلیارد تومان
۱۳	2500s1	اعمال سناریو ۱ با بودجه ی ۲,۵ میلیارد تومان
۱۴	2500s2	اعمال سناریو ۲ با بودجه ی ۲,۵ میلیارد تومان
۱۵	2500s3	اعمال سناریو ۳ با بودجه ی ۲,۵ میلیارد تومان
۱۶	2500s4	اعمال سناریو ۴ با بودجه ی ۲,۵ میلیارد تومان

جدول ۱۱. مشخصات جواب های حاصله در حالت های مختلف

ردیف	حالت مسئله	تعداد جواب های پارتو	میزان هزینه (تومان)	اثر بخشی	تعداد پل های انتخاب شده جهت تعمیر
۱	1000s1	۸	۴۷۷۲۸۹۹۸۳,۱	۰,۰۰۷۷۴	۴۸
۲	1000s2	۱۰	۶۵۷۰۷۵۷۳۴,۴	۰,۰۱۱۰۲	۶۴
۳	1000s3	۹	۹۱۳۳۶۰۴۶۳,۴	۰,۰۱۷۹۰	۸۰
۴	1000s4	۸	۹۸۰۷۴۱۷۳۰,۹	۰,۰۱۶۷۵	۹۹
۵	1500s1	۱۲	۵۶۱۸۹۶۹۹۲,۷	۰,۰۱۰۹۰	۵۲
۶	1500s2	۱۰	۹۰۴۲۴۷۶۳۲	۰,۰۱۴۴۴	۸۰
۷	1500s3	۱۰	۱۱۰۶۶۹۴۳۴	۰,۰۱۸۲۵	۸۹
۸	1500s4	۸	۱۲۷۱۸۲۹۰,۳	۰,۰۱۹۴۸	۱۰۶
۹	2000s1	۸	۶۷۷۴۰۹۷۹۵	۰,۰۱۴۴۳	۶۰
۱۰	2000s2	۱۲	۶۹۰۵۴۸۹۷۵,۵	۰,۰۱۰۵۴	۶۹
۱۱	2000s3	۱۳	۱۰۵۰۶۹۱۶۵۵	۰,۰۱۸۰۱	۸۶
۱۲	2000s4	۱۰	۱۳۹۴۵۱۴۰۵۳	۰,۰۲۱۲۶	۱۱۰
۱۳	2500s1	۸	۶۷۲۵۳۹۰۴۲,۳	۰,۰۱۶۰۳	۶۶
۱۴	2500s2	۶	۱۴۲۲۰۷۴۲۶۶	۰,۰۱۶۵۸	۹۹
۱۵	2500s3	۱۱	۱۱۰۳۲۹۶۳۴۵	۰,۰۱۷۲۰	۸۶
۱۶	2500s4	۸	۱۳۵۲۰۸۷۴۰,۵	۰,۰۱۹۹۲	۱۰۲

۴-۶-۳- خروجی های حل مسئله

با توجه به ابزار مربوطه در نرم افزار متلب و ورودی های مربوط به حالت های مختلف مسئله، خروجی های متعددی از این



شکل ۲. تغییرات اثربخشی نسبت به بودجه محدود

۴-۶-۴- تغییرات تعداد کل پل‌های انتخاب شده جهت تعمیر

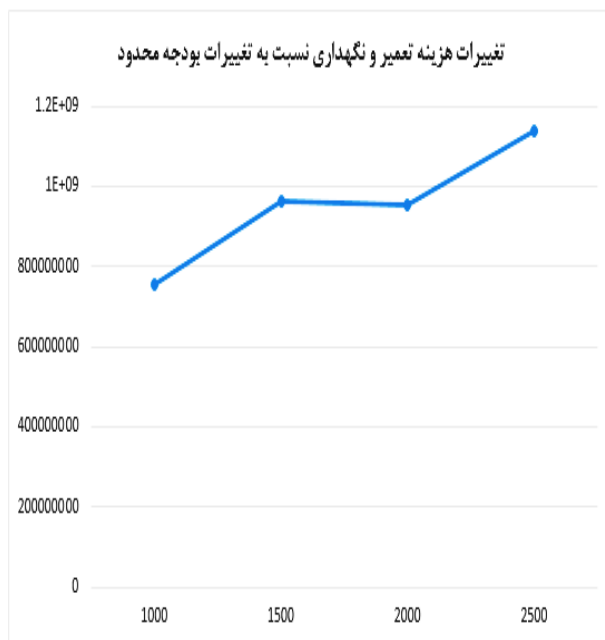
و نگهداری نسبت به تغییرات بودجه محدود

این تغییرات نیز از طریق میانگین تعداد پل‌های انتخابی در سناریوهای مختلف بودجه محدود مربوطه و براساس تغییرات بودجه محدود مشخص می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. تغییرات تعداد کل پل‌های انتخاب شده نسبت به بودجه محدود

۵۴	۱۱	۳۹	۲	2000s4	۱۲
۲۲	۱۱	۱۳	۲	2500s1	۱۳
۳۵	۱۱	۱۶	۲	2500s2	۱۴
۲۸	۱۵	۳۴	۳	2500s3	۱۵
۴۷	۱۶	۳۴	۲	2500s4	۱۶



شکل ۱. تغییرات هزینه تعمیر و نگهداری نسبت به بودجه محدود

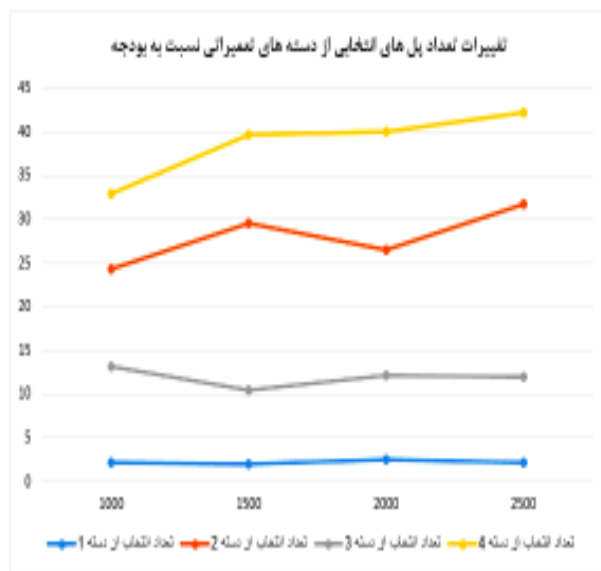
۴-۶-۳- تغییرات اثربخشی نسبت به تغییرات بودجه محدود

برای نشان دادن تغییرات اثربخشی منتج از استراتژی‌های تعمیر و نگهداری نسبت به تغییر بودجه محدود، از میانگین اثربخشی سناریوهای مختلف در یک بودجه محدود استفاده شده و به صورت شکل ۲ نشان داده شده است. در این نمودار، محور افقی نشان‌دهنده میزان بودجه محدود و محور عمودی مقدار میانگین اثربخشی سناریوهای تعمیر و نگهداری بودجه محدود مربوطه را نشان می‌دهد.

۴-۶-۵- تغییرات تعداد پل‌های انتخابی از هر دسته تعمیراتی

نسبت به تغییرات بودجه محدود

تعداد پل‌های انتخابی از هر دسته تعمیراتی با توجه به جدول ۱۱ و محاسبه میانگین سناریوهای مختلف بودجه محدود مربوطه تعیین می‌گردد و نسبت به تغییرات بودجه محدود بررسی می‌شود. شکل ۴ این بررسی را بهتر نشان می‌دهد.



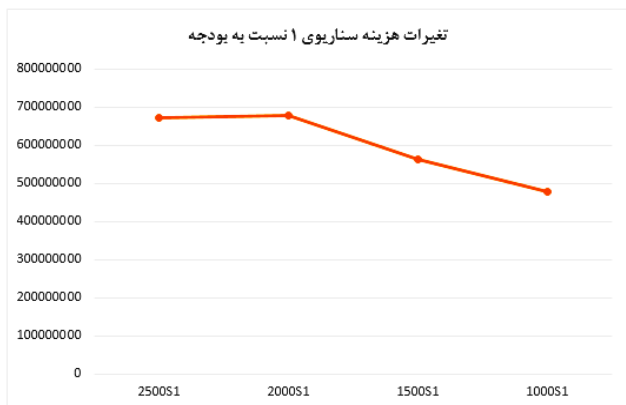
شکل ۴. تغییرات تعداد پل‌های انتخابی از دسته‌های تعمیراتی نسبت به بودجه محدود

۴-۶-۶- تغییرات رفتار سناریوهای مختلف نسبت به بودجه

در این بخش، تغییرات هزینه‌ی تعمیر و نگهداری، اثربخشی و تعداد پل‌های انتخاب شده در سناریوهای ۴ گانه نسبت به تغییرات بودجه محدود، مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۶-۶- الف. سناریوی اول (s1)

در این بخش به ترتیب به تغییرات هزینه، اثربخشی و تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر سناریو اول در بودجه‌های محدود مختلف پرداخته شده است.



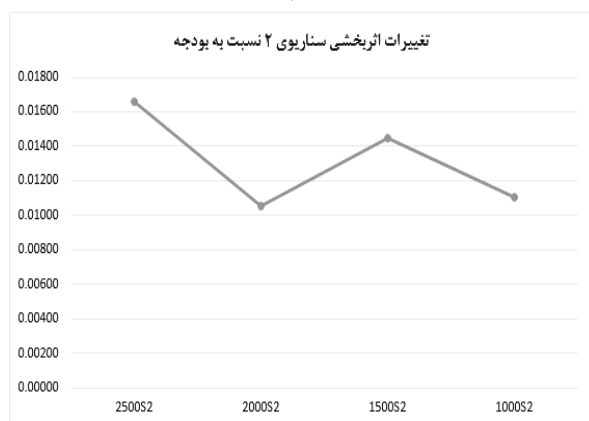
شکل ۵- تغییرات هزینه‌ی تعمیر و نگهداری سناریوی ۱ نسبت به بودجه محدود

این نمودار نشان می‌دهد با کاهش بودجه محدود تا سقف ۲ میلیارد تومان، تغییری در هزینه‌ها انجام نمی‌شود، اما به مرور با کاهش آن تا سقف ۱ میلیارد تومان هزینه‌های تعمیر و نگهداری هم با شیب نسبتاً تندی کاهش می‌یابد. این موضوع یک رفتار کاملاً طبیعی و منطقی است که الگوریتم تعریف شده به درستی نشان می‌دهد. شکل ۶ یک روند نزولی کاهش اثربخشی را نشان می‌دهد و بیان می‌کند با کاهش سقف بودجه و به تبع آن کاهش هزینه، بدیهی است که اثربخشی تعمیر و نگهداری پل‌ها نیز کاهش می‌یابد که این موضوع پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر است. رفتار نزولی اثربخشی و هزینه، نشان از ارتباط نزدیک این دو مقوله با یکدیگر دارد، پس باید همواره با در نظر گرفتن اهداف و بودجه‌ی سرمایه‌گذار یا کارفرما به دنبال راه‌حلی منطقی جهت ایجاد تعادل بین این دو بود.

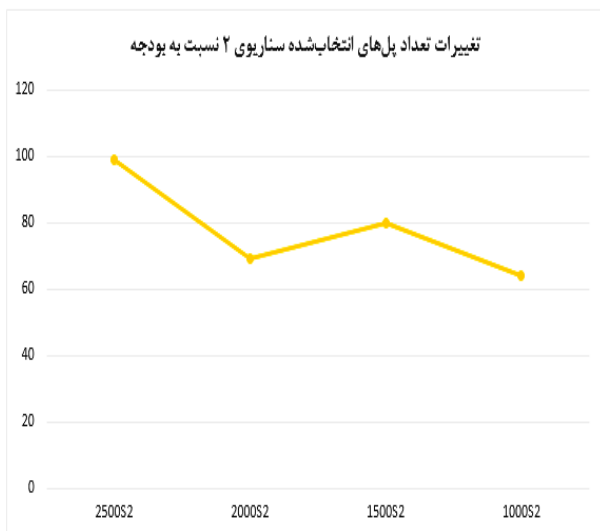


شکل ۶. تغییرات اثربخشی سناریوی ۱ نسبت به بودجه محدود

تومان به ۱,۵ میلیارد تومان، هزینه تعمیر افزایش یافته و این افزایش هزینه باعث شده تا اثربخشی نیز افزایش نسبتاً زیادی پیدا کند. این رفتار سناریوی ۲ در تغییرات بودجه نشان می‌دهد که محدودیت بودجه ۱,۵ میلیارد تومان گزینه مناسبی برای اعمال سناریوی ۲ در استراتژی‌های تعمیر و نگهداری این پل‌هاست. رفتار نشان داده شده در شکل ۱۰ قابل پیش‌بینی بود، زیرا افزایش نسبتاً زیاد اثربخشی مطمئناً با افزایش تعداد پل‌های تعمیر شده همراه است. اگرچه این افزایش چشمگیر نیست ولی شاهدی دیگر بر بهتر بودن انتخاب بودجه ۱,۵ میلیاردی نسبت به بودجه ۲ میلیاردی در سناریوی دوم است.

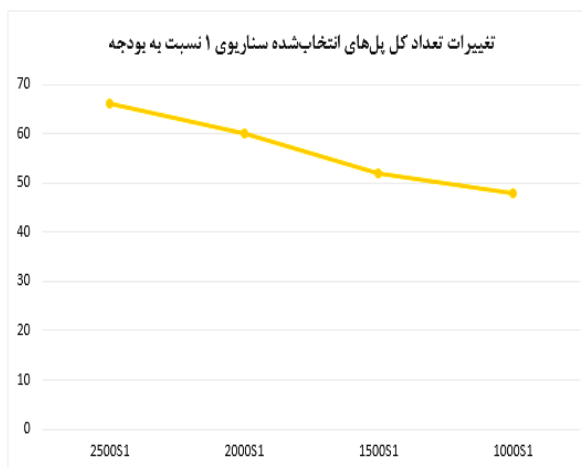


شکل ۹. تغییرات اثربخشی سناریوی ۲ نسبت به بودجه محدود



شکل ۱۰. تغییرات تعداد پل‌های انتخابی در سناریوی ۲ نسبت به

بودجه محدود



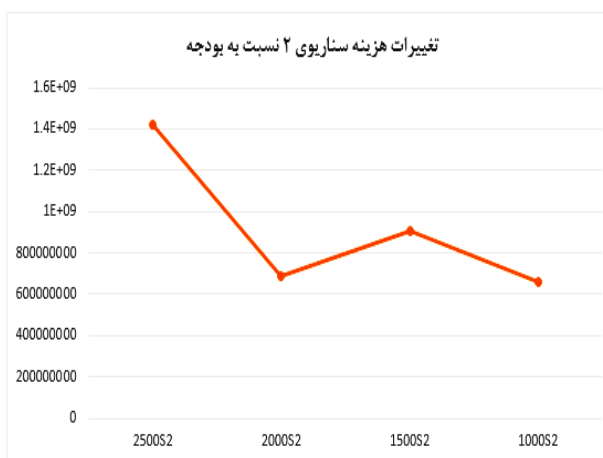
شکل ۷. تغییرات تعداد پل‌های انتخابی در سناریوی ۱ نسبت به

بودجه محدود

شکل ۷ گویای کاهش تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر در سناریوی ۱ با کاهش بودجه محدود است؛ که بیشترین کاهش با توجه به شیب نمودار مربوط به کاهش بودجه از ۲ میلیارد تومان به ۱,۵ میلیارد تومان است.

۴-۶-۶-ب. سناریوی دوم (S2)

در این بخش به ترتیب به تغییرات هزینه، اثربخشی و تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر سناریو دوم در بودجه‌های محدود مختلف پرداخته شده است.



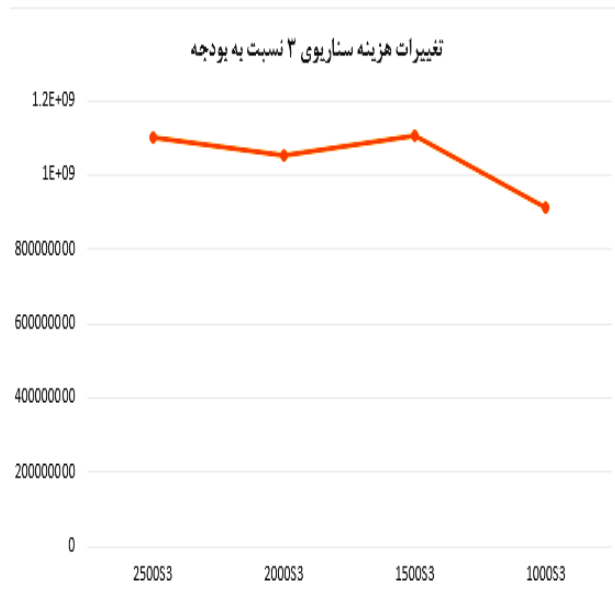
شکل ۸. تغییرات هزینه تعمیر و نگهداری سناریوی ۲ نسبت به

بودجه محدود

شکل ۸ رفتاری نسبتاً متفاوت نسبت به نمودار شکل ۵ از خود نشان داده است و نشان می‌دهد که با کاهش بودجه از ۲ میلیارد

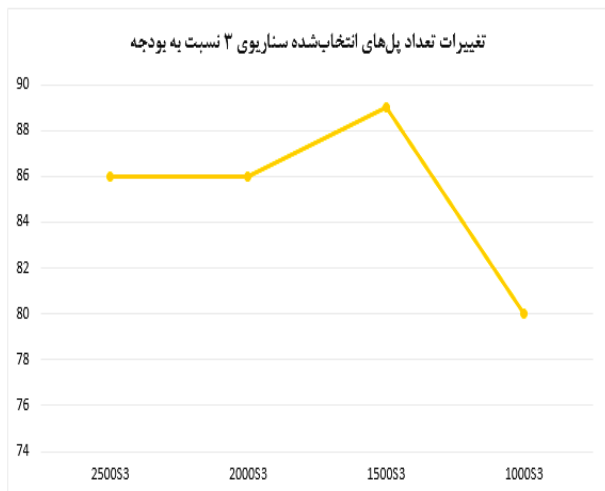
۴-۶-۶-ج. سناریوی سوم (s3)

در این بخش به ترتیب به تغییرات هزینه، اثربخشی و تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر سناریوی سوم در بودجه‌های محدود مختلف پرداخته شده است.



شکل ۱۱. تغییرات هزینه‌ی تعمیر و نگهداری سناریوی ۳ نسبت به بودجه محدود

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که الگوریتم نتوانسته از بودجه‌ی ۲,۵ میلیاردی در سناریوی سوم استفاده‌ی مطلوب را انجام دهد و علیرغم داشتن بیشترین سقف بودجه، کمترین اثربخشی را تولید کرد و باز هم سناریوی سوم بیشترین اثربخشی خود را در بودجه‌ی ۱,۵ میلیاردی تجربه می‌کند.



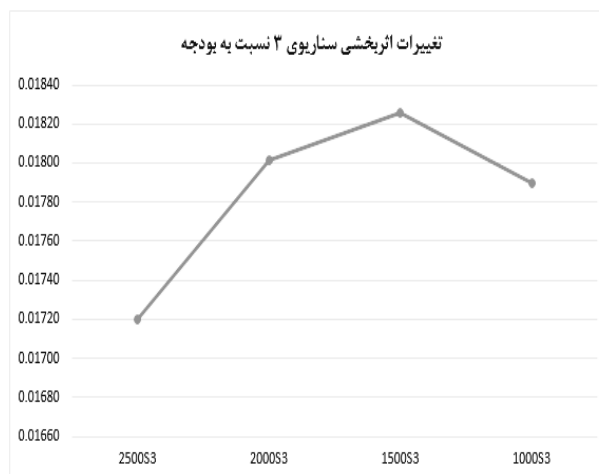
شکل ۱۳. تغییرات تعداد پل‌های انتخابی در سناریوی ۳ نسبت به بودجه محدود

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که چرا بیشترین اثربخشی و هزینه، سهم بودجه‌ی ۱,۵ میلیارد شد. سناریوی سوم توسط سقف بودجه‌ی ۱,۵ میلیاردی بیشترین پل را مورد تعمیر قرار می‌دهد و به همین دلیل بیشترین اثربخشی و هزینه را به خود اختصاص می‌دهد. نکته‌ی دیگری که در رفتار سناریو ۳ مشاهده می‌شود و در شکل ۱۲ نیز مشخص است، برتری سناریوی ۳ در استفاده از بودجه‌ی ۲ میلیاردی است، زیرا سناریوی ۳ در بودجه‌ی ۲ میلیاردی علاوه بر صرف هزینه‌ی کمتر با تعمیر تعداد پل‌های نسبتاً مشابه، به اثربخشی بیشتری دست پیدا کرده است.

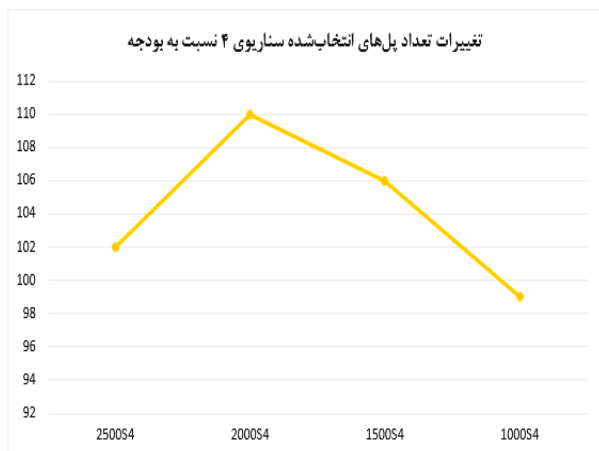
۴-۶-۶-د. سناریوی چهارم (s4)

در این بخش به ترتیب به تغییرات هزینه، اثربخشی و تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر سناریوی چهارم در بودجه‌های محدود مختلف پرداخته شده است.

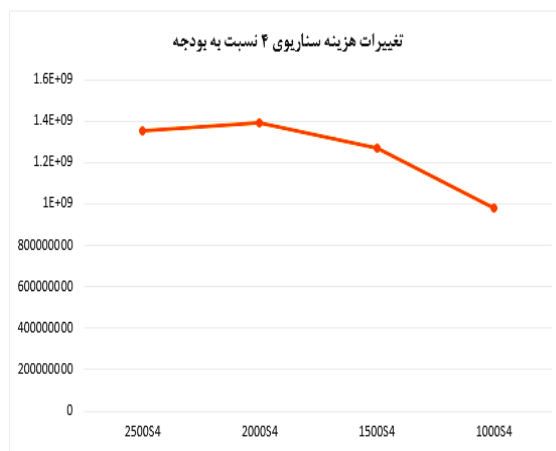
نمودارهای مربوط به سناریوی سوم رفتارهای متفاوتی را نشان می‌دهد که می‌تواند در انتخاب بهترین بودجه‌ی محدود در اعمال سناریوی سوم به تصمیم‌گیرندگان کمک کند. نکته‌ی قابل توجه در شکل ۱۱ این است که با وجود کاهش ۱ میلیاردی بودجه از ۲,۵ میلیارد به ۱,۵ میلیارد، هزینه‌ی تعمیر برخلاف تصور افزایش داشته است.



شکل ۱۲. تغییرات اثربخشی سناریوی ۳ نسبت به بودجه محدود



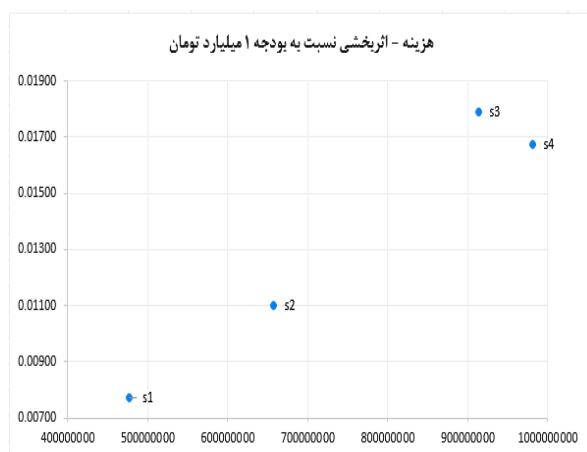
شکل ۱۶. تغییرات تعداد پل‌های انتخابی در سناریوی ۴ نسبت به بودجه محدود



شکل ۱۴. تغییرات هزینه‌ی تعمیر و نگهداری سناریوی ۴ نسبت به بودجه محدود

۴-۶-۷- تغییرات هزینه - اثربخشی سناریوهای مختلف در بودجه‌های محدود

شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ به ترتیب تغییرات هزینه - اثربخشی سناریوهای مختلف را در بودجه‌های محدود مربوطه نشان می‌دهد. این بررسی کمک می‌کند تا سناریوهای بهینه جهت اقدامات تعمیر و نگهداری در بودجه‌های مختلف شناسایی و انتخاب شوند. در این نمودار، محور افقی، میزان هزینه و محور عمودی، میزان اثربخشی سناریوها را در شرایط محدودیت بودجه مورد نظر نشان می‌دهند.



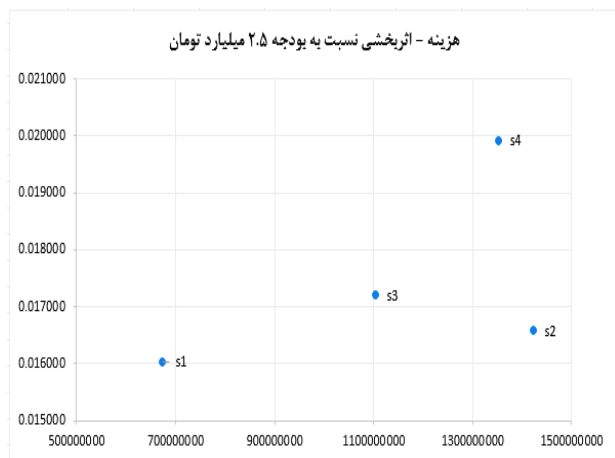
شکل ۱۷. تغییرات هزینه - اثربخشی سناریوها در بودجه‌ی ۱ میلیارد تومان

در سناریوی ۴، این بودجه‌ی ۲ میلیارد تومان است که خود را به عنوان بهترین سقف بودجه نشان می‌دهد و مشخص می‌شود که سناریوی چهارم با وجود افزایش ناچیز هزینه در بودجه‌ی ۲ میلیاردی، تعداد پل‌های بیشتری را تعمیر کرده و اثربخشی بیشتری را کسب می‌کند. موارد ذکر شده در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ کاملاً مشخص است.



شکل ۱۵. تغییرات اثربخشی سناریوی ۴ نسبت به بودجه محدود

نکته‌ی قابل توجه در شکل ۱۸، اثربخشی بیشتر سناریو ۱ نسبت به سناریو ۲ می‌باشد، درحالی‌که هزینه‌ی کمتری برای تعمیر پل‌ها دارد؛ و این نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن سناریوی ۱ در مقایسه با سناریوی ۲ برای انتخاب، جهت اعمال در استراتژی‌های تعمیر و نگهداری است.



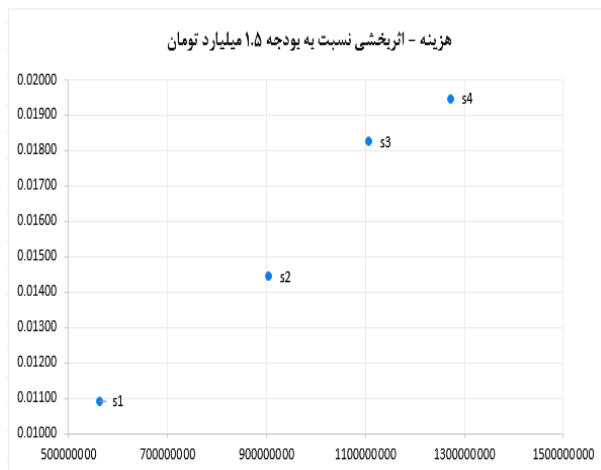
شکل ۲۰. تغییرات هزینه - اثربخشی سناریوها در بودجه‌ی ۲,۵ میلیارد تومان

در شکل ۲۰ هم تغییرات متفاوتی دیده می‌شود. سناریو ۳ با وجود افزایش هزینه بسیار زیاد، پیشرفت چشمگیری در افزایش اثربخشی ندارد و سناریوی ۲ نیز با اینکه هزینه‌ی بیشتری را انجام می‌دهد، نه تنها افزایش اثربخشی را به دنبال ندارد، بلکه منجر به کاهش اثربخشی نیز می‌شود و باز هم این سناریوی ۴ است که با هزینه‌ی کمتر نسبت به سناریوی ۲، خود را به عنوان سناریوی با کسب بیشترین اثربخشی در بودجه ۲,۵ میلیارد تومان معرفی می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

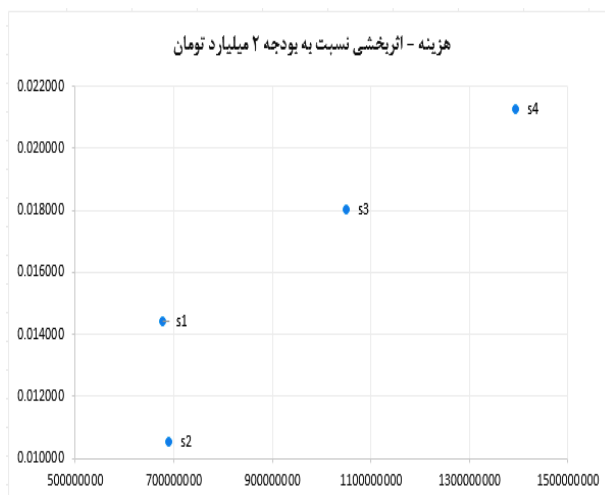
پس از بررسی و آنالیز مقادیر به دست آمده، نکات و نتایجی به شرح ذیل بیان می‌گردد:
با توجه به جدول ۱۱، بیشترین اثربخشی بدون در نظر گرفتن هزینه به ترتیب مربوط به حالت‌های 2000s4، 1500s4 و 2500s4 می‌باشد. این در حالی است که بیشترین تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر و نگهداری نیز به ترتیب به همین حالت‌ها تعلق دارد.

با توجه به تعیین بودجه‌ی محدود برای مسئله، هدف استفاده‌ی بهینه از کل بودجه و رسیدن به بیشترین اثربخشی در چارچوب کمترین هزینه ممکن است. با توجه به این تفاسیر و شکل ۱۷، سناریوی ۳ بهترین گزینه در بودجه محدود ۱ میلیارد تومان است.



شکل ۱۸. تغییرات هزینه - اثربخشی سناریوها در بودجه‌ی ۱,۵ میلیارد تومان

روند تغییرات هزینه - اثربخشی در بودجه محدود ۱,۵ میلیارد تومان نشان می‌دهد که سناریوی چهارم از بیشترین اثربخشی برخوردار است و درعین حال، بیشترین هزینه را نیز جهت تعمیر پل‌ها خواهد داشت.



شکل ۱۹. تغییرات هزینه - اثربخشی سناریوها در بودجه‌ی ۲ میلیارد تومان

تومان سعی در تعمیر و نگهداری این پل‌ها داشته باشد باز هم اختیار دارد بین تعداد پل‌های انتخابی بیشتر جهت تعمیر و نگهداری و اثربخشی بیشتر یک گزینه را انتخاب کند که طبیعتاً منطقی حکم می‌کند که اثربخشی بیشتر در اولویت انتخاب قرار بگیرد. جدول ۱۱ کمک می‌کند تا اثربخش‌ترین سقف بودجه‌ی محدود را در سناریوهای مختلف بدون در نظر گرفتن تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر و نگهداری و بودجه‌ی در دسترس سرمایه‌گذار و کارفرما انتخاب کرد. در سناریوی ۱ و ۲، بودجه‌ی ۲٫۵ میلیارد تومان اثربخش‌ترین بودجه جهت تعمیر پل‌ها می‌باشد؛ اما در سناریوی ۳ این بودجه‌ی ۱٫۵ میلیارد تومان است که خود را به عنوان بهترین گزینه جهت کسب بیشترین اثربخشی معرفی می‌کند، این یعنی افزایش بودجه به ۲ و ۲٫۵ میلیارد هیچ‌گونه توجیه اقتصادی و لزوم فنی ندارد. همچنین در سناریوی ۴ نیز این موضوع صدق می‌کند و بودجه‌ی محدود ۲ میلیارد تومان، بیشترین اثربخشی را در پیاده‌سازی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری به وجود می‌آورد و نیازی به افزایش بودجه‌ی در دسترس به ۲٫۵ میلیارد نمی‌باشد. تمامی این موارد نتایجی است که می‌تواند در توجیه کارفرمایان و سرمایه‌گذاران جهت استفاده از بهینه‌ترین گزینه کمک کند. شکل ۱ تغییرات هزینه نسبت به تغییرات بودجه‌ی محدود را نشان می‌دهد. روندی صعودی در این نمودار مشاهده می‌شود که کاملاً منطقی و معمول است، زیرا طبیعتاً با افزایش سقف بودجه، میزان هزینه‌ی تعمیر و نگهداری این پل‌ها نیز افزایش می‌یابد. نکته‌ی قابل توجه در این نمودار، روند ثابت بین میانگین هزینه‌ی سناریوهای بودجه ۱٫۵ میلیارد تومانی و ۲ میلیارد تومانی دیده می‌شود که این موضوع حکایت از این دارد که هزینه‌ی کلی تعمیر و نگهداری پل‌ها با افزایش سقف بودجه، تغییر چندانی نخواهد کرد و سرمایه‌گذاران یا کارفرمایان که بحث کاهش هزینه‌ها برای آن‌ها بسیار مهم است، جهت تخمین بودجه‌ی مورد نیاز برای تعمیر و نگهداری می‌توانند از بین این دو عدد از بودجه‌ی ۱٫۵ میلیاردی جهت تعمیر و نگهداری این پل‌ها استفاده کنند. روند نمودار شکل ۲ نیز مشابه روند نمودار شکل ۱ می‌باشد. این نمودار تمامی ویژگی‌های نمودار شکل ۱ را دارا می‌باشد و نتیجه‌ی گرفته شده در قسمت قبل را تأیید می‌کند، زیرا نمودار شکل ۲ نشان می‌دهد افزایش ۵۰۰ میلیون تومانی سقف بودجه‌ی محدود از ۱٫۵ به ۲

با توجه به جدول ۱۱ برای سناریوی ۴ و در مقایسه بین حالت 2000s4 و 2500s4، با وجود اینکه به ترتیب ۵۰۰ میلیون تومان به میزان بودجه‌ی محدود اضافه می‌شود، اما تعداد کل پل‌های انتخابی جهت تعمیر و اثربخشی، کاهش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد در صورتی که سرمایه‌گذار و کارفرما تمایل به استفاده از سناریوی ۴ داشته باشد، بودجه‌ی ۲ میلیارد تومان می‌تواند بهترین گزینه جهت تعمیر بیشترین تعداد پل و کسب بیشترین اثربخشی باشد. نتیجه‌گیری قبل در مورد حالت 1500s3 و 2000s3 نیز صدق می‌کند، چنانچه سناریوی ۳ برای تعمیر و نگهداری این پل‌ها مورد نظر باشد، می‌توان بودجه‌ی محدود ۱٫۵ میلیارد تومان را پیشنهاد داد و از صرف هزینه‌های بدون هدف جهت تعمیر و نگهداری این پل‌ها جلوگیری کرد. یکی از نتایج کلی که می‌توان از جدول ۱۱ گرفت این است که در بودجه‌های محدود، سناریوهای ۳ و ۴ از بیشترین اثربخشی برخوردار هستند و دلیل اصلی این موضوع بازه‌ای است که برای کران بالا و پایین تعداد انتخاب از دسته‌های دوم و چهارم در نظر گرفته شده است. بازه‌های مشخص شده برای انتخاب پل از دسته‌های تعمیراتی در سناریوها، به نوعی است که حداکثر تعداد پل‌های انتخاب شده در سناریوهای اول تا چهارم به ترتیب ۱۰۱، ۱۴۳، ۱۱۰ و ۱۷۲ پل می‌باشد. با در نظر داشتن این موضوع و توجه به جدول ۱۰ در بودجه‌ی محدود ۱ میلیارد تومان، گرچه سقف تعداد انتخاب در سناریوی ۴ بیشتر از سناریوی ۳ است، اما اثربخشی سناریوی ۳ بیشتر از سناریوی ۴ می‌باشد و از طرفی تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر در سناریوی ۴ بیشتر از سناریوی ۳ است. در این حالت، سرمایه‌گذار یا کارفرما می‌تواند بین اثربخشی بیشتر اقدامات تعمیر و نگهداری و تعداد بیشتر پل‌های تعمیر شده یک کدام را انتخاب کند. اما با توجه به اهمیت اثربخشی و ارتباط مستقیم آن با عمر و سرویس‌دهی پل، با داشتن بودجه‌ی محدود ۱ میلیارد تومان، سناریوی ۳ گزینه‌ی بهتری جهت تعمیر و نگهداری این پل‌هاست.

نکته‌ی قبل در مورد بودجه‌ی ۲ میلیاردی هم صدق می‌کند. در بودجه ۲ میلیارد تومان، اثربخشی 2000s1 بیشتر از 2000s2 است، ولی در تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر و نگهداری حالت 2000s2 بیشتر از 2000s1 است. این موضوع نشان می‌دهد اگر سرمایه‌گذار یا کارفرمایی با بودجه‌ی محدود ۲ میلیارد

توجه در این بررسی این است که هزینه، اثربخشی و تعداد کل پل‌های انتخابی این سناریو در بودجه‌ی محدود ۱,۵ میلیارد، بیشتر از ۲ و ۲,۵ میلیارد می‌باشد. این به این معنی است که بودجه‌ی ۱,۵ میلیارد تومان بهترین گزینه جهت تعیین بودجه‌ی محدود برای اعمال سناریوی ۳ به عنوان استراتژی تعمیر و نگهداری این پل‌ها می‌باشد. در نمودار شکل‌های ۱۴ تا ۱۶، مشاهده می‌شود که این بودجه‌ی ۲ میلیاردی است که خود را با هزینه، اثربخشی و تعداد پل‌های انتخابی بیشتر نسبت به بودجه‌های دیگر به عنوان بهترین و بهینه‌ترین بودجه‌ی محدود جهت اجرای سناریوی چهارم برای استراتژی‌های تعمیر و نگهداری این پل‌ها معرفی می‌کند. شکل‌های ۱۷ تا ۱۹، تغییرات هزینه- اثربخشی سناریوها نسبت به تغییرات بودجه‌ی محدود را نشان می‌دهد که می‌تواند به انتخاب بهترین سناریو در بودجه‌های محدود متفاوت کمک کند. با توجه به این نمودارها در بودجه‌ی محدود ۱ میلیارد تومان، سناریوی ۳ و در بودجه‌ی ۱,۵ و ۲,۵ میلیارد تومان، سناریوی ۴ دارای بیشترین اثربخشی می‌باشد که می‌توان با در نظر گرفتن بودجه‌ی محدود کارفرمایان یا سرمایه‌گذاران به عنوان بهترین گزینه به آن‌ها پیشنهاد شود.

۶- مراجع

-جغتایی، ع. الف، (۱۳۹۰)، "راهنمای اصول مدیریت فنی نگهداری پل‌ها"، چاپ اول، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.

-موشخیان، س. و نجفی، ا. ع، (۱۳۹۴)، "بهینه‌سازی سبد سرمایه‌گذاری با استفاده از الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات برای مدل احتمالی چند دوره‌ای میانگین- نیم‌واریانس- چولگی"، مجله مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار، شماره‌ی بیست و سوم، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران مرکزی.

-Barone, G., Frangopol, D, M. and Soliman, M., (2014), "Optimization of Life-Cycle Maintenance of Deteriorating Bridges with Respect to Expected Annual System Failure

میلیارد تومان، افزایش چشمگیری در میانگین اثربخشی سناریوها به وجود نمی‌آورد.

با توجه به جدول ۱۲ و نمودار شکل ۴، بیشترین تعداد پل‌های تعمیر شده از دسته‌ی تعمیراتی ۴ در حالت 1000s2 قرار دارند، این در حالی است که بیشترین تعداد پل‌های تعمیر شده از دسته‌های ۳ و ۲ به ترتیب در حالت‌های 2500s4 و 2000s3 اتفاق می‌افتد و اگر هدف کارفرما یا سرمایه‌گذار تعمیر و نگهداری بیشترین تعداد پل از یک دسته‌ی خاص باشد، می‌تواند یکی از حالت‌های زیر را جهت پایه‌گذاری برای اعمال استراتژی‌های تعمیر و نگهداری خود استفاده کند.

روند تغییرات نمودار شکل ۳ که تعداد کل پل‌های انتخابی در بودجه‌های مختلف را نشان می‌دهد، مشابه روند تغییرات نمودارهای شکل ۱ و ۲ می‌باشد. البته این نمودار نشان می‌دهد که با وجود اینکه بودجه‌ی ۲ میلیاردی محدودیت کمتری برای هزینه‌ی تعمیر و نگهداری دارد، اما میانگین تعداد کل پل‌های انتخابی در سناریوهای آن به مقداری هر چند کم از میانگین تعداد کل پل‌های انتخابی جهت تعمیر در بودجه‌ی ۱,۵ میلیاردی کمتر است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی مطلوبیت نسبی بودجه‌ی محدود ۱,۵ میلیارد نسبت به ۲ میلیارد از نظر تعداد کل پل‌های انتخابی جهت تعمیر و نگهداری است. یکی دیگر از نتایجی که می‌توان از نمودار شکل ۴ گرفت این است که با توجه به گسترده‌تر بودن بازه‌ی انتخاب از دسته‌های تعمیراتی دوم و چهارم، تغییرات تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر و نگهداری این دسته‌ها بیشتر است. نمودار شکل‌های ۵، ۶ و ۷ تغییرات هزینه، اثربخشی و تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر سناریوی ۱ نسبت به تغییرات بودجه‌ی محدود را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد کاهش بودجه‌ی محدود، باعث ایجاد روند کاهشی اثربخشی و تعداد پل‌های انتخابی جهت تعمیر می‌گردد، ولی هزینه افزایشی ناچیز خواهد داشت. نمودار شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب همین تغییر رفتار را برای سناریوی ۲ نشان می‌دهند که با وجود کاهش بودجه‌ی محدود از ۲ میلیارد به ۱,۵ میلیارد، هزینه، اثربخشی و تعداد کل پل‌های انتخابی جهت تعمیر افزایش می‌یابند؛ و این موضوع گواه دیگری بر مناسب‌تر بودن حالت 1500s2 نسبت به 2000s2 است. نمودار شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳، تغییرات رفتار سناریوی سوم را بررسی می‌کند. نکته‌ی قابل

- Lee, C. K. and Kim, S. K., (2007), "GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks", Elsevier BV, Journal of Automation in Construction, Vol. 16, No. 2, pp. 153- 164.
- Orcesi, A. D., and Cremona, C. F., (2011), "Optimization of Maintenance Strategies for the Management of the National Bridge Stock in France", ASCE, Journal of Bridge Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 44- 52.
- Rayal, M.J., (2012), "Bridge Management", 2nd ed., Taylor & Francis.
- Zhu, J. and Liu, B., (2013), "Performance Life Cost-Based Maintenance Strategy Optimization for Reinforced Concrete Girder Bridges", ASCE, Journal of Bridge Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 172- 178.
- Rate and Expected Cumulative Cost", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 140, No. 2, 04013043.
- Bocchini, P. and Frangopol, D. M., (2011), "A probabilistic computational framework for bridge network optimal maintenance scheduling", Elsevier BV, Journal of Reliability Engineering & System Safety, Vol. 96, No. 2, pp. 332- 349.
- Frangopol, D. M. and Bocchini, P., (2012), "Bridge network performance, maintenance and optimisation under uncertainty: accomplishments and challenges", Informa UK Limited, Journal of Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 8, No. 4, p.p. 341- 356.
- Hu, X., Daganzo, C. and Madanat, S., (2015), "A reliability-based optimization scheme for maintenance management in large-scale bridge networks", Elsevier BV, Transportation Research Part C: Emerging, Vol. 55, pp. 166- 178.

Optimization of Maintenance and Repair Strategies for Concrete Bridges of North and Northeastern Railways 2 (Zirab-Gorgan Axis) by Multi Objective Particle Swarm Optimization

Mohammad Javad Taheri Amiri, Ph.D. Student, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Milad Hematian, Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Mazandaran, Iran.

Farshid Reza Haghighi, Assistant Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Nabiollah Kiya, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Tabari University of Babol, Babol, Iran.

E-mail: haghighi@nit.ac.ir

Received: January 2020-Accepted: July 2020

ABSTRACT

Today's transportation is one of the main elements of economic prosperity in the world and railway is one of the most important methods of transportation in Iran and in the world, which the main reason of its utilization is the appropriate cost against the capability of a great mass of goods and a large number of passenger's transportation. Population growth and development of economic relations have led to increase utilization of transportation infrastructures, especially railways. Our country is not an exception and knowing that the railway system is one of the oldest transportation arteries, it is in danger of amortization and destruction. Bridges, as the most important road and railway infrastructure, have the most vulnerable in utilization increase phenomena that some signs of vulnerability are seen in parts of the railway system in recent years, and set the authorities thinking. The important point is that if regular maintenance and retrofitting programs in order to increase the capacity of these bridges are not arranged, it will lead to irreparable consequences. In order to help Iran bridge management system with considering all above issues, the present study prioritizes the need for maintenance and also optimization of corrective actions of the bridges of Zirab – Gorgan part in Garmsar – Gorgan line of north and north-east 2 Islamic Republic of Iran railway by the study on them. To do that, the multi – objective particle swarm optimization Meta-heuristic algorithm is used for the optimization of corrective actions. Also considering the four scenarios to select the number of bridges under repair and 16 conditions of problem to be solved by the defined algorithm, the proper and optimized conditions is introduced in different scenarios and budgets to use in maintenance strategies and the most effectiveness achievement.

Keywords: Bridge, Railway, Destruction, Maintenance, Multi – objective Optimization, Meta-heuristic Algorithm