نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۱۰، سال ۱۴۰۱، صفحات ۳۷۲۳ تا ۳۷۴۲
DOI: 10.22060/ceej.2022.17603.6622

بهینه‌سازی هزینه چرخه عمر پل‌ها با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان پل‌ها (مطالعه موردی پل‌های مسیر ساری به محمودآباد)

محمدجواد طاهری امیری*[۱]، میلاد همتیان[۲]، شروین روشن قلب[۳]

۱- گروه عمران، موسسه آموزش عالی پردیسان فریدون‌کنار، مازندران، ایران
۲- دانشگاه علوم و فنون مازندران، مازندران، ایران
۳- موسسه آموزش عالی طبری بابل، مازندران، ایران.

خلاصه: تعمیر و نگهداری جهت اطمینان از ایمنی و سرویس‌دهی پل‌ها همواره امری ضروری بوده است. با افزایش تعداد پل‌ها، هزینه‌های تعمیر و نگهداری بخش بزرگی از هزینه‌های پل را به خود اختصاص داده و تأثیر قابل توجهی بر محیط زیست خواهد داشت. پل‌ها مانند هر سازه دیگر و شاید بیش از بسیاری از آن‌ها تحت تاثیر محیط قرار دارند و از آنجا که جز سازه‌های پرهزینه و حساس محسوب می‌شوند، کوتاهی در نگهداری آن‌ها اثرات مخربی به دنبال دارد. پل‌ها به منظور سرویس‌دهی مناسب در کل دوره‌ی عمرشان، به تعمیر و نگهداری مستمر نیاز دارند. از این رو در این تحقیق مسئله نگهداری و تعمیرات پل‌های شهری استان مازندران با در نظر گرفتن هزینه چرخه عمر و قابلیت اعتماد پل‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دو هدفه شامل حداقل‌سازی هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و هزینه‌های کاربر و حداکثرسازی قابلیت اطمینان پل توسعه داده شده است. به منظور حل مسئله پیشنهادی یک الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه توسعه داده شده است. همچنین بر روی نرخ خرابی پل‌ها تحلیل حساسیت انجام گرفته است. نتایج نشان داده است که با افزایش نرخ خرابی، مجموع هزینه‌های چرخه عمر افزایش و قابلیت اطمینان پل کاهش یافته است که این امر نشان دهنده عملکرد درست الگوریتم پیشنهادی این تحقیق می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۰۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

کلمات کلیدی:
پل
تعمیر و نگهداری
هزینه چرخه عمر
قابلیت اطمینان
الگوریتم فراابتکاری

۱- مقدمه

پل‌ها از عناصر کلیدی بزرگراه‌های هر کشوری می‌باشند و احداث آن‌ها نسبت به بقیه اجزای راه پرهزینه‌تر می‌باشد. خسارت‌های موجود در پل همراه با افزایش بارهای ترافیکی و شرایط ناملایم محیطی و موقعیت قرارگیری پل‌ها و در نتیجه بدتر شدن سریع اجزای سازه پل نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری فوری دارد. پل‌ها مانند هر سازه دیگر و شاید بیش از بسیاری از آن‌ها تحت تاثیر محیط قرار دارند وحتی با فرض طراحی صحیح و اجرای دقیق، عوامل بسیاری در دوام و سلامت آن‌ها موثر است و از آنجا که جز سازه‌های پرهزینه و حساس محسوب می‌شود، کوتاهی در نگهداری آن‌ها اثرات مخربی به دنبال خواهد داشت. به این ترتیب بازرسی‌های مرتب برای جلوگیری از صرف هزینه‌های گزاف، جبران این خرابی‌ها بسیار ضروری است. متاسفانه بسیاری از سیاست‌گذاران و متولیان پل در سراسر جهان از جمله ایران در حالی که نیاز به بازرسی و نگهداری منظم پل‌ها را در طول عمر مفید آن‌ها تصدیق می‌کنند، لیکن نیاز به برنامه‌ریزی اولیه در مراحل تصمیم‌گیری و طراحی بر پایه اصول اساسی که دوام و پایداری پل‌ها را در بلند مدت تضمین کند، درک نمی‌کنند. در بیشتر موارد، مسئولان از نگهداری پل در دوران بهره‌برداری چشم‌پوشی کرده و به استراتژی درمان به جای پیشگیری روی آوردند [۱]. پل‌ها نمی‌توانند برای همیشه باقی بمانند و هر شکل سازه‌ای که به کار می‌رود و هر مصالحی که برای ساخت آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، دیر یا زود آثار فرسودگی در آن‌ها ظاهر می‌شود. عوامل زیادی مانند شکل سازه، مصالح ساختمانی، کیفیت ساخت، طراحی، اجرا، شرایط جوی، آب‌شستگی، حرارت، خستگی، زلزله، سیلاب، هوا، تراکم بارهای عبوری وارده وجود دارد که در چگونگی و میزان فرسودگی در زوال پل موثرند. تا قبل از دهه هفتاد قرن ۱۹، غالبا هنگام ساختن پل‌ها، بدون توجه به هزینه‌های نگهداری سالانه‌ای که در پیش خواهد داشت، ارزان‌ترین مصالح را انتخاب می‌کردند، پل‌های چوبی اولیه، پس از مدتی کاملا از بین می‌رفتند. 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. تعداد پل‌هایی که در کشورهای مختلف نیاز به

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jvd.taheri@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

تعمیر و نگهداری ویژه دارند روز به روز بیشتر می‌شود و به دلیل اینکه هزینه مستقیم کارهای مهندسی مورد نیاز بسیار بالا است، لذا نیاز به استفاده از روش‌های منطقی‌تر در تصمیم‌گیری‌های مربوط به تخصیص بودجه‌های موجود با حصول اطمینان از اقتصادی بودن آن‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه پل‌ها مدام تحت بارگذاری می‌باشند و از سوی دیگر در معرض عوامل خارجی مانند: عوامل جوی و حوادث طبیعی می‌باشند، بحث نگهداری از آن‌ها اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. امروزه با استفاده از سامانه‌های نگهداری به صورت سیستماتیک، به مسئله‌ی نگهداری از پل‌ها پرداخته می‌شود. به طور کلی برنامه‌های نگهداری و تعمیر را می‌توان به ۲ گروه تقسیم کرد: ۱) نگهداری و تعمیر پیشگیرانه ۲) نگهداری و تعمیر ضروری. از طرفی فعالیت‌های پیشگیرانه برای حفظ شرایط سازه و اجزای آن در حالت فعلی و ممانعت از ایجاد ناکارآیی سازه‌ای انجام می‌شود که به ۲ گروه: الف) برنامه‌ریزی شده و ب) واکنشی تقسیم می‌شوند [۲]. فرآیند نگهداری و تعمیر شامل اقدامات مختلفی نظیر بازرسی، نگهداری و تعمیر پیشگیرانه و نگهداری و تعمیر ضروری و غیره است که این اقدامات توسط مشاوران و پیمانکاران مربوطه در زمان‌های مناسب انجام می‌شود [۳]. در این پژوهش، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نگهداری پل با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های چرخه عمر و کاربری مورد بررسی قرار خواهد گرفت به طوری که قابلیت اطمینان به سازه‌های پل‌های مورد بررسی را در حداکثر شرایط خود نگاه دارد که در این مطالعه پل‌های محور ساری به محمودآباد مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای این منظور یک مدل ریاضی توسعه داده شده و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه حل گردیده است.

۲- ادبیات موضوع

مطالعات مختلفی در حوزه بهینه‌سازی چرخه عمر پل انجام پذیرفته که در ادامه به برخی از مرتبط‌ترین آن‌ها اشاره شده است. رضوانی و رجایی (۱۳۸۸) در مقاله‌ای تحت عنوان بهره‌وری هزینه‌ی بهسازی زیرساخت‌های راه‌آهن با استفاده از اطلاعات مربوط به هزینه‌های تعمیر و نگهداری در خطوط ریلی کشور، شامل هزینه‌های تعمیر و نگهداری جاری، تعمیر و نگهداری بر مبنای بهسازی و همچنین تناژ ناخالص عبوری در محورهای مختلف، استراتژی بهسازی هر محور در مقابل هزینه‌ی واحد تعمیر و نگهداری آن در ۵ سال منتهی به ۱۳۸۶ را محاسبه کردند. نتایج حاصل از مقایسه‌ی این دو پارامتر بیانگر آن هستند که در خطوط ریلی کشور با افزایش میزان استراتژی بهسازی، هزینه‌ی واحد تعمیر و نگهداری کاهش قابل‌ملاحظه‌ای خواهد داشت که این امر با توجه به وسعت کشور و همچنین نیاز روزافزون به صنعت ریلی و تقاضا برای آن می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای در منابع کشور گردد. در ادامه‌ی این مقاله پس از مشخص شدن این مهم که افزایش میزان استراتژی بهسازی منجر به کاهش هزینه‌ی واحد تعمیر و نگهداری خواهد شد، سه مدل هزینه‌ی تعمیر و نگهداری در کشور، مربوط به سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت، مدل مربوط به سال ۱۳۸۵ به علت قابلیت اعتماد بالاتر نسبت به سایر مدل‌ها به عنوان مدل هزینه‌ی تعمیر و نگهداری کشور ارائه گردید [۴].

نصر آزادانی و همکاران (۱۳۸۸) با نگاهی متفاوت به مقوله‌ی نگهداری و تعمیر، به وسیله‌ی مطالعه‌ی موردی برخی از پروژه‌های نگهداری و تعمیر پل‌های شهر تهران به بررسی مشکلات موجود بر سر راه اقدامات نگهداری و تعمیر پل‌ها پرداختند. بدین منظور پرسش‌نامه‌هایی تهیه شد و بین برخی مدیران پروژه‌های نگهداری و تعمیر توزیع گردید و مشکلات مطرح شده از طریق دو پارامتر میزان اهمیت و سهولت رفع آن مورد پرسش قرار گرفت. سپس برای رسیدن به یک اولویت‌بندی مناسب، پارامتر دیگری به نام شدت اثر تعریف شد که از حاصل ضرب ۲ پارامتر میزان اهمیت و سهولت رفع به دست می‌آید. بر این اساس هر مشکلی که دارای شدت اثر بیشتری باشد، اولویت بیشتری برای رفع دارد [۵].

طاهری امیری و همکاران (۱۳۹۷) به تخصیص بهینه اقدامات اصلاحی پل‌های استان مازندران با در نظر گرفتن محدودیت بودجه پرداختند. در این تحقیق، پل‌های استان مازندران از لحاظ خرابی با دیدگاه تعمیر و نگهداری مطالعه شده و وضعیت خرابی و نقص‌های هر یک از این پل‌ها و همچنین وضعیت این پل‌ها در برابر عواملی همچون بار ترافیکی و دیگر متغیرهای موثر مورد بررسی قرار گرفته است. پس از انجام بازدیدهای میدانی و جمع‌آوری نتایج مورد نیاز، ابتدا پل‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی نقص، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تحلیل سلسله مراتبی اولویت‌بندی شده و سپس بر اساس سطح بودجه در دسترس، اقدامات اصلاحی بر روی هر پل مشخص شد. به این منظور ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی ارائه شده و سپس به منظور حل مسئله ابعاد بالا یک الگوریتم فرابتکاری ژنتیک برای پیدا کردن اقدامات اصلاحی بهینه در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی و توسعه داده شد؛ نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی عملکرد مناسبی در حل مسئله داشته است. به منظور بررسی صحت الگوریتم پیشنهادی، چندین سطح بودجه در نظر گرفته شده و روند تغییرات میزان اقدامات اصلاحی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخص

گردید که با افزایش سطح بودجه، میزان اثر بخشی از طریق افزایش تعداد اصلاحات با هزینه بیشتر، افزایش می‌یابد [۶].

سیدی مرغکی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری پل‌ها پرداختند. در این تحقیق، پس از دسته‌بندی بخش‌های مختلف پل و شناسایی برخی از آسیب‌ها و خرابی‌ها، به ارائه راهکارهای پیشگیری از خرابی‌ها و تعمیر و نگهداری پل‌ها پرداخته شده است [۷].

طاهری امیری و همکاران (۱۳۹۹) به بهینه‌سازی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات پل‌های راه‌آهن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه پرداختند. در این تحقیق، پس از جمع‌آوری اطلاعات موجود در اداره کل راه‌آهن شمال و همچنین اداره کل خط و ابنیه فنی راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران و مذاکره با کارشناسان، متخصصان و اساتید این حوزه و همچنین بهره‌گیری از اطلاعات جمع‌آوری شده از وضعیت پل‌های قطعه‌ی زیر آب تا گرگان راه‌آهن محور شمال و انواع و میزان خرابی آن‌ها توسط کارشناسان، وضعیت خرابی و نقایص هر یک از این پل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس روش‌های مختلف نگهداری و تعمیر پل‌های بتنی راه‌آهن مورد بررسی قرار گرفت و به منظور شناسایی و ارزیابی میزان اثربخشی و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری هر یک از روش‌ها، 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 پل‌ها مشخص گردید و در ادامه با تولید یک مدل ریاضی که بتواند با رعایت محدودیت‌های مسئله، اهداف خود را که کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی اثربخشی می‌باشد، محقق کند. در نهایت با به کارگیری یکی از روش‌های فرا ابتکاری حل مسئله و برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB به تخصیص بهینه استراتژی‌های نگهداری و تعمیر مناسب برای این پل‌ها با توجه به بودجه‌ی محدود پرداخته شده است [۸].

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 شاهتیرهای بتن‌آرمه پرداختند. لازم به ذکر است که شاخص‌های قابلیت اطمینان و وضعیت پل به عنوان 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 رو به زوال در این مقاله به عنوان یک مسئله‌ی چند هدفه فرموله شده که توسط روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[1](NSGA) و نخبه‌گرایی کنترل شده بهبود می‌یابد و شاخص وضعیت، شاخص قابلیت اطمینان، عمر سرویس‌دهی و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری چرخه‌ی عمر به عنوان چهار تابع هدف به صورت جداگانه در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از این است که به طور کلی مدل بهینه‌سازی چند هدفه پیشنهاد شده در این مقاله می‌تواند رابطه‌ی بین عملکرد پل، طول عمر و هزینه را در نظر بگیرد و استراتژی تعمیر و نگهداری به دست 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 NSGA این پتانسیل را دارد که برای پیدا کردن راه‌حل‌های جایگزین جهت تصمیم‌گیری در بخش‌های مختلف مدیریت پل به کارگیری شود [۹].

بارونه و همکاران (۲۰۱۴) مقوله‌ی بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری چرخه‌ی عمر پل‌های رو به زوال را با توجه به نرخ پیش‌بینی شده‌ی سالانه برای شکست سیستم و هزینه‌ی تجمعی پیش‌بینی شده، 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 پیش‌بینی شده‌ی 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 [۱۰].

هو و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیق خود، 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 بلند مدت تحت محدودیت بودجه هست. در این تحقیق ابتدا حدس زده شد و سپس تائید 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

1 Non dominate Sorting Genetic Algorithm

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 [۱۱].

ژانگ و وانگ (۲۰۱۷) در تحقیق خود، به اولویت‌بندی تعمیر شبکه پل تحت محدودیت بودجه، پرداختند. این مطالعه یک مدل تصمیم برای کمک به مسئولان پل در تعیین یک برنامه تنظیم اولویت‌بندی تعمیر و نگهداری ترجیح داده شده برای یک شبکه پل تخلیه در یک جامعه که بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های حمل و نقل در محدودیت‌های بودجه در مقیاس منطقه‌ای را توسعه می‌دهد. این مطالعه با استفاده از روش‌های تحلیل شبکه، اصول پایه ساختاری و الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری برای ادغام پارامترهای توصیفی مانند: ظرفیت پل، رتبه‌بندی شرایط، تقاضای ترافیک و محل‌پل، با هدف هزینه تعمیر و نگهداری، در نظر گرفته شد [۱۲].

دیونگ و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیق خود، یک مدل بهینه‌سازی چرخه عمر با استفاده از روند نیمه مارکوف برای نگهداری پل‌های بزرگراه ارائه دادند. با توجه به انواع خطرات مربوط به چرخه عمر، ساخت و ساز، تخریب مواد، شرایط محیطی بد، افزایش ترافیک و ظرفیت ناکافی، درصد زیادی از پل‌ها در سیستم بزرگراه ایالات متحده از استانداردهای پذیرفته شده کمتر است. اکثر سازمان‌های بزرگراه فاقد بودجه مناسب هستند و بنابراین نیاز به روش‌های مؤثر برای تخصیص منابع محدود به طور مؤثر و مقرون به صرفه است. این مقاله یک مدل بهینه‌سازی چرخه عمر با استفاده از یک روند نیمه مارکوف را ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که چگونه روش پیشنهادی می‌تواند آژانس‌های بزرگراه را برای تصمیم‌گیری‌های کمی و صریح‌تری برای نگهداری پل کمک کند [۱۳].

وراوجوویک (۲۰۱۸) در تحقیق خود، در مورد تعمیر و نگهداری پل ویجیکا در یوگوسلاوی بحث کرده است. این پل در سال‌های دهه ۱۹۷۰ توسط کارشناسان برجسته اتحادیه راه آهن یوگسلاوی به روش منحصر به فردی طراحی شده است و در سال ۱۹۷۳ با فن‌آوری جدید GP Mosto-gradnja با سیستم کنترل داخلی مجهز شد که نقش آن کنترل پیوسته و ثابت در رفتار ستون‌های بالا از پل در طول دوره عمر مفید پل است [۱۴].

ژی و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیق خود به بهینه‌سازی قابلیت اطمینان بر پایه استراتژی نگهداری پل با توجه به LCA و LCC پرداختند. برای بررسی اثربخشی روش پیشنهادی بهینه‌سازی، یک پل مورد انتخاب قرار گرفت و احتمال تخریب تجمعی، هزینه چرخه زندگی و چرخه عمر محیط زیست پل با طرح‌های تعمیر و نگهداری مختلف محاسبه شد. یک طرح تعمیر و نگهداری مطلوب از پل مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه بین طرح‌های بهینه و طرح بدون PM انجام شد. می‌توان نتیجه گرفت که PM در مدیریت پل بسیار مهم است. انتخاب زمان اولیه و فاصله زمانی PM به طور منطقی می‌تواند اثرات محیطی چرخه زندگی پل را به طور موثر کاهش دهد [۱۵].

طاهری امیری و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله خود پس از شناسایی خطرات موثر بر روی پل‌ها، خطرات بحرانی را با روش FMEA تعیین کردند. پس از تشخیص عوامل بحرانی، هر یک از آن‌ها در جزئیات مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در نهایت، سه پل در بابلسر (ایران) واقع در رودخانه بابلرود و همچنین نقش ترافیکی آن‌ها بین دو طرف شهر مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، نقش آن‌ها در ترافیک نیز یکی دیگر از موارد مورد علاقه در مورد تخریب هر یک از این پل‌ها، ارتباط به هر دو طرف شهر با مشکلات جدی است. همچنین خطرات شناسایی شده برای هر یک از این پل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است تا مشخص شود کدام یک از آن‌ها در شرایط مناسب نیست و در صورت لزوم آن‌ها باید حفظ و تقویت شوند. برای انجام این کار، در این تحقیق با استفاده از روش AHP، ANP و TOPSIS، این پل‌ها اولویت‌بندی شدند. نتایج نشان داد که اولین پل در این شهر نسبت به سایر نقاط بدتر است و باید در اسرع وقت تعمیر، نگهداری یا تقویت شود [۱۶]. جدول ۱ خلاصه برخی از مطالعات انجام گرفته در این حوزه را نشان می‌دهد.

در مطالعات پیشین در تعداد محدودی از آن‌ها تابع هدف قابلیت اطمینان سیستم به طور همزمان با حداقل‌سازی هزینه‌های چرخه عمر در نظر گرفته شده است. علاوه بر این در این تعداد محدود نیز هزینه کاربر مدنظر قرار نگرفته، در حالی که در این تحقیق، حداقل‌سازی هزینه چرخه عمر شامل هزینه نگهداری و تعمیرات و هزینه کاربر و حداکثرسازی قابلیت اطمینان سیستم بررسی شده است، بدین منظور با توجه به شبکه پل، یک تابع احتمال برای قابلیت اطمینان سیستم فرمول‌بندی شده است.

۳- بهینه‌سازی چند هدفه گروه ذرات (MOPSO)[1]

الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه گروه ذرات توسط کوئلو در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید و در واقع این الگوریتم تعمیمی است از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO)[2] که برای حل مسائل چند هدفه به کار می‌رود. در الگوریتم MOPSO یک مفهومی به نام آرشیو یا مخزن نسبت به الگوریتم PSOاضافه شده است که به تالار مشاهیر نیز معروف است.

1 Multi-objective particle swarm optimization
2 Particle swarm optimization

جدول ۱. خلاصه مطالعات حوزه بهینه‌سازی چرخه عمر

Table 1. Summary of studies in the field of life cycle optimization

ردیف	محقق	هدف مطالعه	روش تحقیق
۱	ژو و لیو (۲۰۱۳)	مسئله بهینه‌سازی استراتژی نگهداری و تعمیرات پل با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان و وضعیت پل	ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی توسعه الگوریتم NSGA
۲	بارونه و همکاران (۲۰۱۴)	مسئله بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات چرخه عمر پل‌های رو به زوال با توجه به نرخ پیش‌بینی شده سالانه برای شکست سیستم	ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی
۳	هو و همکاران (۲۰۱۵)	ارائه استراتژی بهینه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان	ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی
۴	ژانگ و وانگ (۲۰۱۷)	اولویت‌بندی برنامه نگهداری و تعمیرات پل در شرایط محدودیت بودجه	ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی الگوریتم فراابتکاری
۵	دیونگ و همکاران (۲۰۱۷)	ارائه مدل بهینه‌سازی چرخه عمر با استفاده از روند نیمه مارکوف برای نگهداری پل‌های بزرگراه	ارائه مدل ریاضی مبتنی بر زنجیره مارکوف
۶	وراوجوویک (۲۰۱۸)	ارائه مدل نگهداری و تعمیر پل راه آهن	رویکرد تحلیلی
۷	ژی و همکاران (۲۰۱۸)	بهینه‌سازی قابلیت اطمینان مبتنی بر استراتژی نگهداری پل با در نظر گرفتن LCA و LCC	ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی
۸	طاهری امیری و همکاران (۲۰۱۹)	شناسایی خطرات موثر بر روی پل‌ها با استفاده از روش FMEA	روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره AHP، ANP و TOPSIS

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 حتما باید عضو مخزن و همچنین نامغلوب باشد. اعضای مخزن بیانگر جبهه پارتو و شامل ذرات نامغلوب هستند. پس به جای Gbest 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 [۱۷]:

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

$$Pbest_i^{(n+1)} = X_i^{(n+1)} \quad (۱)$$

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

$$Pbest_i^{n} = Pbest_i^{(n+1)} \quad (۲)$$

۳- 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:

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 (سرعت و موقعیت آن به روز می‌شود.)

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.

۸- در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده است، از شماره ۱ به بعد الگوریتم تکرار می‌شود.

۴- تعریف مسئله

در این مطالعه مسئله برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات با هدف حداقل‌سازی هزینه چرخه عمر شامل هزینه نگهداری و هزینه کاربر و

جدول ۲. اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله

Table 2. Indices, parameters and variables of the problem

اندیس	تعریف	اندیس	تعریف
J	شماره پل	A_a	نرخ تصادف در زمان انجام تعمیر
I	نرخ بهره	A_n	نرخ نرمال تصادف
K	شماره تعمیر	C_a	هزینه تصادف
T	دوره (سال)	X_{jkt}	اگر k امین تعمیر روی پل j در دوره t انجام شود ۱ و در غیر این صورت ۰
IC_j	شرایط اولیه پل j	ET_{jk}	زودترین زمان k امین تعمیر روی پل j
UB	حد بالای حداقل شرایط قابل قبول	LT_{jk}	دیرترین زمان k امین تعمیر روی پل j
LB	حد پایین حداقل شرایط قابل قبول	E_{jk}	اثر k امین تعمیر روی پل j
r_j	نرخ خرابی پل j	$Year_{jk}$	زمان اعمال k امین تعمیر روی پل j
$\varnothing^{-1}$	معکوس تابع احتمال تجمعی توزیع نرمال استاندارد	NR_j	تعداد کل تعمیرات انجام شده روی پل j
c_{jk}	هزینه تعمیر نوع k برای پل j	LCC	هزینه چرخه عمر
$traffic_j$	حجم ترافیک پل j	AC_{jt}	هزینه نگهداری و تعمیر پل j در سال t
$Effect_{jk}$	**اثر k امین تعمیر روی پل j**	UC_t	**هزینه کاربر در سال t**
D_{jk}	مدت زمان k امین تعمیر روی پل j	UC_{jt}	هزینه کاربر پل j در سال t
L_j	طول پل j	DOC	هزینه تاخیر وسیله نقلیه
S_a	سرعت ترافیک در زمان انجام تعمیر	VOC	هزینه عملیاتی وسیله نقلیه
S_n	سرعت نرمال ترافیک	AC	هزینه تصادف وسیله نقلیه
R_p	ارزش زمان کاربر به ازای هر ساعت	P_C	احتمال اتصال بین مبدا و مقصد
R_c	هزینه عملیاتی وسیله نقلیه به ازای هر ساعت	R	قابلیت اطمینان

حداکثرسازی قابلیت اطمینان پل‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این دو هدف کاملاً در تضاد با یکدیگر هستند، طبیعتاً برای بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان پل باید هزینه بیشتری انجام داد و از طرف دیگر کم کردن هزینه، منجر به کاهش قابلیت اطمینان پل می‌شود. بنابراین باید یک تعادل بین این دو هدف برقرار و راه حل یا راه‌حل‌هایی جهت بهینه‌سازی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری پیدا شود. به منظور حل مسئله پیشنهادی، یک الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه توسعه داده شده است که در ادامه جزئیات مدل ریاضی پیشنهادی و الگوریتم حل این مسئله بیان می‌شوند.

۴- ۱- نمادگذاری

در این بخش، اندیس‌ها پارامترها و متغیرهای مسئله بیان شده است.

۴- ۲- مدل ریاضی پیشنهادی

همانطور که اشاره گردید در این مطالعه مسئله بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات پل با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دو هدف در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل حداقل‌سازی هزینه‌های چرخه عمر پل‌ها است که مطابق رابطه (۳) از مجموع هزینه‌های نگهداری

و تعمیرات و کاربر به دست می‌آید و حداکثرسازی قابلیت اطمینان پل است که از رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$Min\ LCC = \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{NR_j}\frac{AC_{jt}}{(1+i)^t}+\sum_{t=1}^{T}\frac{UC_t}{(1+i)^t} \quad (۳)$$

$$UC_t = \max_j\left[UC_{jt}\right] \quad (۴)$$

$$UC_{jt} = \sum_{k=1}^{NR_j}(DOC+VOC+AC)\times traffic_j \times D_{jk}\times X_{jkt} \quad (۵)$$

$$DOC = \left(L/S_a - L/S_n\right)\times R_p \quad (۶)$$

$$VOC = \left(L/S_a - L/S_n\right)\times R_c \quad (۷)$$

$$AC = L\times(A_a - A_n)\times C_a \quad (۸)$$

$$AC_{jt} = \sum_{k=1}^{NR_j} c_{jk}\times X_{jkt} \quad (۹)$$

$$ET_{j1} = (IC_j - UB)/r_j \quad (۱۰)$$

$$LT_{j1} = (IC_j - LB)/r_j \quad (۱۱)$$

$$\sum_{t=ET_{jk}}^{LT_{jk}}\sum_{k=1}^{NR_j}X_{jkt} = 1 \qquad \forall j,k \quad (۱۲)$$

$$E_{jk} = \sum_{t=ET_{jk}}^{LT_{jk}}\sum_{k=1}^{NR_j}X_{jkt}\times Effect_{jk} \quad (۱۳)$$

$$Year_{jk} = \sum_{t=ET_{jk}}^{LT_{jk}}\sum_{k=1}^{NR_j}X_{jkt}\times t \quad (۱۴)$$

$$ET_{jk} = \frac{(E_{j,k-1}-UB)}{r_j}+Year_{j,k-1} \quad (۱۵)$$

$$LT_{jk} = \frac{(E_{j,k-1}-LB)}{r_j}+Year_{j,k-1} \quad (۱۶)$$

$$Max\ R = \varnothing^{-1}(P_C) \quad (۱۷)$$

$$P_C = \left[1-(1-P_{G_1})(1-P_{G_2})\right]\times\left[1-(1-P_{G_3})(1-P_{G_4})\right] \quad (۱۸)$$

رابطه (۳) نحوه محاسبه هزینه چرخه عمر را نشان می‌دهد که از مجموع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و هزینه‌های کاربری در دوره عمر پل به دست می‌آید. رابطه (۴) نحوه محاسبه هزینه کاربر را نشان می‌دهد که معادل حداکثر هزینه کاربر میان پل‌های مختلف می‌باشد. رابطه (۵) نحوه محاسبه هزینه کاربر بازای هر پل را نشان می‌دهد که از مجموع هزینه‌های تاخیر وسیله نقلیه، هزینه عملیاتی وسیله نقلیه و هزینه تصادف به دست می‌آید که نحوه محاسبه هر یک از آن‌ها به ترتیب در رابطه‌های (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده است. رابطه (۹) نحوه محاسبه هزینه نگهداری و تعمیرات بازای هر پل را نشان می‌دهد که از مجموع هزینه‌های تعمیرات و نگهداری انجام شده برای یک پل در دوره افق برنامه‌ریزی به دست می‌آید. رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب زودترین و دیرترین زمان اولین تعمیر روی هر پل را نشان می‌دهد. رابطه (۱۲) تضمین می‌کند که تنها یک نوع تعمیر در یک زمان خاص روی پل انجام شود. رابطه (۱۳) اثر k امین تعمیر روی هر پل را محاسبه می‌نماید. رابطه (۱۴) نیز زمان اعمال k امین تعمیر را برای هر پل محاسبه می‌نماید. رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) نیز به ترتیب نحوه محاسبه زودترین و دیرترین زمان k امین تعمیر روی هر پل را نشان می‌دهند. رابطه (۱۷) نحوه محاسبه قابلیت اطمینان سیستم را نشان می‌دهد. رابطه (۱۸) احتمال اتصال شبکه را محاسبه می‌نماید.

۴- ۳- معرفی مطالعه موردی

پل‌هایی که در این تحقیق از آن استفاده شده، شامل ده پل می‌باشد که یک شبکه پل را تشکیل می‌دهد. محل قرارگیری پل‌ها در مسیر راه ساری

جدول ۳. پل‌های مورد مطالعه در این تحقیق

Table 3. The bridges studied in this research

ردیف	نام پل	نام مسیر
۱	پل جویبار	ساری-بابلسر
۲	پل بهنمیر	ساری-بابلسر
۳	پل قدیم بابلسر	بابلسر-محمودآباد
۴	پل بابلسر	بابلسر-محمودآباد
۵	پل فریدون‌کنار	بابلسر-محمودآباد
۶	پل سرخرود	بابلسر-محمودآباد
۷	پل کمربندی آمل	محمودآباد- بابل
۸	پل موزیرج	محمودآباد- بابل
۹	پل تلار	بابل -ساری
۱۰	پل سیاهرود	بابل –ساری

تا محمودآباد می‌باشد، که این مسیر شامل مبدا (ساری) و مقصد (محمودآباد) است که از دو طرف بهم متصل می‌شوند. با توجه به اینکه مسیر پر رفت و آمدی می‌باشد، در صورت خرابی هر یک از پل‌های شبکه، مشکلات زیادی به وجود می‌آید. اهمیت یک پل و یا گروه، به عملکرد کل شبکه پل بستگی دارد. با بررسی و انتخاب روش نگهداری و تعمیر هر یک از پل‌ها، قابلیت اعتماد هر یک از پل‌ها افزایش یافته تا قابلیت اتصال شبکه بهبود یابد. از این رو، اطلاعات مربوط به شناسنامه فنی، بازرسی عمومی و بازرسی اصلی پل‌ها، انجام برداشت‌های میدانی، جمع‌آوری شده که نام مجموعه پل‌های مورد بررسی در جدول ۳ نشان داده شده است.

۴- ۳- ۱- شبکه پل

در این پژوهش، فرض بر این است که پل‌های بزرگراه، تنها عناصر آسیب‌پذیر شبکه حمل و نقل هستند. جاده‌ها که پیوند دهنده هر دو پل است، هرگز شکست نمی‌خورد. در این حالت، عملکرد طول عمر شبکه از نظر قابلیت اعتماد اتصال مبدا به مقصد مورد بررسی قرار گرفته است. شبکه شامل ۱۰ پل می‌باشد که قرارگیری پل‌ها در شبکه و نام آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. دو پل به عنوان گروه ۱، دو پل به عنوان گروه ۲، دو پل به عنوان گروه ۳ و چهار پل به عنوان گروه ۴ هستند. موقعیت پل‌ها در شبکه به صورت شکل ۱ می‌باشد.

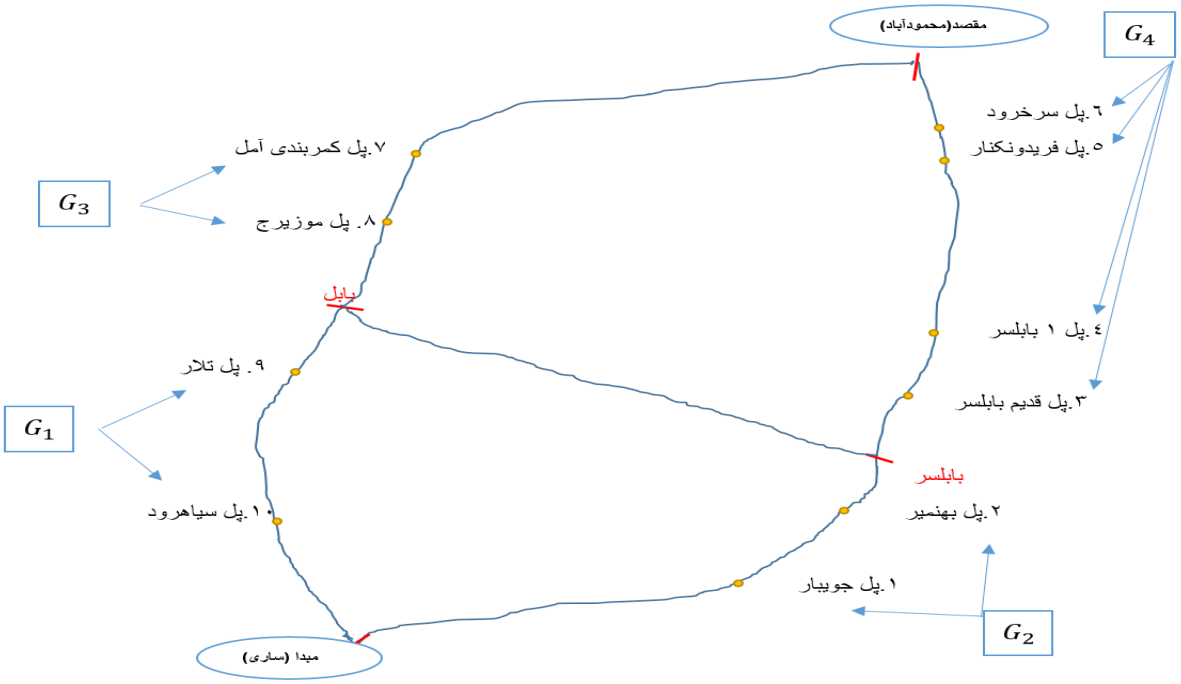
۴- ۳- ۲- شبکه پل به صورت شماتیک

موقعیت قرارگیری پل‌ها در شبکه به صورت شماتیک به صورت شکل ۲ می‌باشد که در آن مبدا، ساری و مقصد، محمودآباد در نظر گرفته شده است. پل‌ها در شبکه به چهار گروه دسته‌بندی شده است که پل‌های گروه ۱ شامل پل تلار و پل سیاهرود، پل‌های گروه ۲ شامل پل جویبار و پل بهنمیر، پل‌های گروه ۳ شامل پل کمربندی آمل و پل موزیرج، پل‌های گروه ۴ شامل پل قدیم بابلسر و پل ۱ بابلسر و پل فریدون‌کنار و پل سرخرود می‌باشد که در جدول ۴ نیز به تفکیک نشان داده شده‌اند.

۴- ۳- ۳- تحلیل نقص‌های موجود در پل‌ها و روش‌های ترمیم آن‌ها

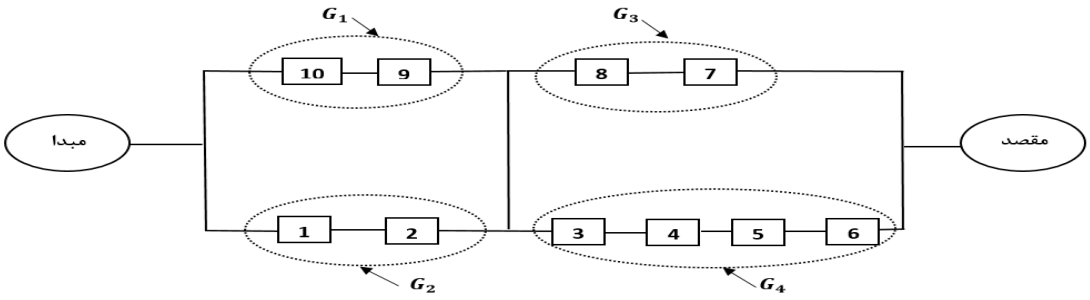
در بازرسی‌هایی که بر روی این ده پل صورت گرفته شده است، نوع خرابی آن‌ها مشخص شده و بر اساس نوع خرابی‌هایی که دارد، تعمیرات مربوط به هر کدام از خرابی‌ها با توجه به شدت خرابی‌ها در جدول ۵ گزارش شده است.

با توجه به انواع خرابی‌های ذکر شده، طبق نظر کارشناسان در حوزه‌ی پل، نوع خرابی برای پل‌های بتنی مورد مطالعه در تحقیق در نظر گرفته شده، که میزان و حجم این خرابی‌ها و میزان قابلیت اعتماد و هزینه‌های هر کدام از پل‌ها در جدول ۶ مشخص شده است.



شکل ۱. شبکه پل مورد مطالعه

Fig. 1. The bridge network studied



شکل ۲. شماتیک پل‌ها

Fig. 2. Schematic of the bridge

جدول ۴. دسته‌بندی پل‌ها در شبکه

Table 4. Classify bridges in the network

ردیف	گروه	تعداد پل	نام پل‌ها
۱	G_1	۲	پل سیاهرود
			پل تلار
۲	G_2	۲	پل جویبار
			پل بهنمیر
۳	G_3	۲	پل موزیرج
			پل کمربندی آمل
۴	G_4	۴	پل قدیم بابلسر
			پل ۱ بابلسر
			پل فریدون‌کنار
			پل سرخرود

۴- ۳- ۴- مقداردهی سایر پارامترهای ورودی مسئله

در این مطالعه موردی، مقدار شرایط اولیه پل‌ها برابر ۳/۵ و حد بالا و پایین حداقل شرایط قابل قبول به ترتیب برابر ۳ و ۱/۵ در نظر گرفته شده است. مقادیر برخی دیگر از پارامترهای ورودی به شرح جدول ۷ می‌باشد.

همچنین مقادیر پارامترهای مرتبط با پل‌ها در جدول ۸ گزارش شده‌اند.

۴- ۳- ۵- ۵-۳-۴-احتمال اتصال گروه پل‌ها

در ادامه بر اساس پل‌هایی که در یک مسیر و در یک گروه قرار گرفته‌اند، احتمال اتصال هر یک محاسبه شده و در ادامه گزارش شده‌اند.

۴- ۴- نتایج محاسباتی

۴- ۴- ۱- طراحی الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه (MOPSO)

به دلیل پیچیدگی زیاد و امکان نداشتن حل دقیق برای این مسئله، نیاز به الگوریتمی است که بتواند جوابی نزدیک به جواب دقیق را بدهد، بنابراین بهترین گزینه، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری است که از رفتارهای موجود در طبیعت، الهام گرفته شده است و جوابی نزدیک به جواب بهینه را ایجاد می‌کند. روش‌های مختلفی برای الگوریتم‌های فراابتکاری وجود دارد که از میان آن‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه برای این تحقیق استفاده شده است. بعد از کدنویسی بر اساس مدل ریاضی تعریف شده در نرم‌افزار متلب و با استفاده از الگوریتم مورد نظر، خروجی‌های مطلوبی دریافت شده که به صورت زیر شرح داده شده است. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات پیشنهادی به صورت جدول ۱۳ در نظر گرفته شده‌اند.

۴- ۴- ۲- نمایش جواب‌های پارتو

مسئله فوق در نرم‌افزار MATLAB 2014b پیاده‌سازی شده و خروجی‌های زیر به دست آمده است. در مرحله اول از آنجایی که مسئله پیشنهادی چند هدفه بوده، جواب‌های پارتو به دست آمده در جدول ۱۴ گزارش شده است.

همانطور که در جدول ۱۲ نشان داده شده است هفت جواب پارتو به دست آمده که دارای مجموع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و کاربری و قابلیت اطمینان متفاوتی می‌باشند. مشاهده می‌شود که با افزایش قابلیت اطمینان هزینه چرخه عمر نیز افزایش یافته است. بدین ترتیب تصمیم گیرنده با توجه به اولویت مدنظر خود یکی از این جواب‌ها با قابلیت اطمینان و هزینه چرخه عمر را به دلخواه انتخاب خواهد نمود. شکل ۳ نیز جواب‌های پارتو به دست آمده را نمایش می‌دهد.

۴- ۴- ۳- تحلیل حساسیت پارامتر نرخ خرابی (r_j)

در این بخش یکی از پارامترهای اصلی مسئله یعنی نرخ خرابی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین ترتیب که مقدار این پارامتر از ۰/۱ تا ۰/۹ تغییر داده شده و اثر آن بر دو تابع هدف هزینه چرخه عمر و قابلیت اطمینان تحلیل

جدول ۵. معیار میزان خرابی [۶]

Table 5. Failure rate Criterion

نوع خرابی	شدت	واحد	توضیحات	روش ترمیمی
قلوه شدگی	کم	متر مربع	کرمو شدن یا پوسته شدن بتن در حالی که تمام کاور آسیب ندیده باشد	استفاده از ترمیم کننده بتن
	متوسط	متر مربع	از بین رفتن کاور به طوری که آرماتورها مشخص شوند	استفاده از ترمیم کننده ویژه بتن
	زیاد	متر مکعب	خرابی بتن دور آرماتور	استفاده از ملات اپوکسی
ترک خوردگی	کم	متر طول	سطحی غیرسازه‌ای	استفاده از ترمیم کننده ویژه بتن
	متوسط	متر طول	عمیق غیرسازه‌ای	استفاده از ماستیک پلی یورتان
	زیاد	متر طول	سازه‌ای	استفاده از ملات اپوکسی
فرسودگی سطح	کم	متر مربع	ترک سطحی و خطی آسفالت	استفاده از ماسه و قیر ترمیمی
	متوسط	متر مربع	ترک‌های روی سطح که باید به صورت موردی برداشت و اصلاح گردد	تخریب بخش آسیب دیده و آسفالت مجدد
	زیاد	متر مربع	خرابی آسفالت که نیاز به تعویض کلی آسفالت دارد	تخریب کل آسفالت و اجرای مجدد
آسیب نرده	کم	متر طول	آسیب نرده‌های فولادی	صافکاری، جوش قطعات و سپس رنگ‌آمیزی و گالوانیزه کردن آن
	متوسط	متر طول	آسیب نرده‌های فولادی	نیاز به تعویض بخشی از نرده است
	زیاد	متر طول	نرده ندارد یا نیاز به تعویض کلی است	احداث نرده فلزی
خرابی درز انقطاع	کم	متر طول	شل شدن پیچ و پرچ‌های درز	پیچ و پرچ‌های شل درز باز و دوباره تنظیم شود و پوشش گردد
	متوسط	متر طول	خرابی درزهای انقطاع بتنی	اجرای پوشش درز با ماستیک پلی یورتان
	زیاد	متر طول	نداشتن درز یا خرابی کلی درز	تعویض کامل یا اجرای کامل درز
آسیب تکیه‌گاه	کم	متر مربع	از بین رفتن کاور به طوری که آرماتورها مشخص شوند	استفاده از ترمیم کننده ویژه بتن
	متوسط	متر مکعب	خرابی بتن دور آرماتور	استفاده از ملات اپوکسی
	زیاد	متر مکعب	خرابی در سطح و عمق زیاد	استفاده از بتن تقویتی یا پدستال
پوسیده شدن	کم	متر طول	پوشش نرده	استفاده از رنگ‌های الاستیک
	متوسط	متر مربع	دیواره‌های نگهبان فلزی	استفاده از رنگ‌های اپوکسی
	زیاد	متر مربع	پوشش اسکلت فلزی	استفاده از رنگ‌های اپوکسی
فرسایش فونداسیون	کم	متر مربع	از بین رفتن کاور به طوری که آرماتورها مشخص شوند	استفاده از ترمیم کننده ویژه بتن
	متوسط	متر مکعب	خرابی بتن دور آرماتور	استفاده از ملات اپوکسی
	زیاد	متر مکعب	خرابی در سطح و عمق زیاد	استفاده از بتن تقویتی یا پدستال
خرابی زهکش	کم	عدد	گرفتگی لوله	تمیز کردن سیستم تخلیه آب عرشه با استفاده از فشار آب یا میلهٔ گمانه زنی.
	متوسط	متر مربع	اشکال در شیب‌بندی و جمع‌شدگی آب	اجرای شیب‌بندی مجدد
	زیاد	-	نبود سیستم زهکش	اجرای سیستم زهکشی

جدول ۶. میزان خرابی هر یک از پل‌ها و قابلیت اعتماد پل‌ها(ادامه دارد)

Table 6. Classify bridges in the network(Continude)

ردیف	نام پل	نوع خرابی	درجه ضعف	میزان خرابی	واحد	هزینه واحد (هزار ریال)	اثر تعمیر ($Effect_{jk}$)	هزینه هر خرابی (c_{jk})	هزینه کل خرابی برای هر پل (هزار ریال)
۱	پل جویبار	ترک خوردگی	کم	۲,۵	متر طول	۹۰	۰/۳۵	۷۸/۷۵	۲۲۱۴۶/۷۵
		فرسودگی سطح	کم	۱۸	متر مربع	۱۲۰	۰/۰۴	۱۰۸	
		آسیب تکیه‌گاه	متوسط	۵	متر مکعب	۹۴۰۰	۰/۴۵	۲۱۱۵۰	
		فرسایش فونداسیون	کم	۱۲	متر مربع	۴۵۰	۰/۱۵	۸۱۰	
۲	پل بهنمیر	خرابی درز انقطاع	متوسط	۲۰	متر طول	۷۵۰	۰/۴۹	۷۵۰۰	۸۳۰۰
		خرابی زهکش	کم	۸	عدد	۲۰۰	۰/۵	۸۰۰	
۳	پل قدیم بابلسر	فرسودگی سطح	کم	۱۸	متر مربع	۱۲۰	۰/۱۲	۲۸۰/۸	۱۳۵۲۶/۸
		آسیب نرده	متوسط	۲۰	متر طول	۱۹۵۰	۰/۰۷	۲۷۳۰	
		خرابی درز انقطاع	متوسط	۲۰	متر طول	۷۵۰	۰/۱۴	۲۱۰۰	
		پوسیده شدن	کم	۸۰	متر طول	۲۷۰	۰/۳۳	۷۱۲۸	
		فرسایش فونداسیون	کم	۱۲	متر مربع	۴۵۰	۰/۲	۱۰۸۰	
		خرابی زهکش	کم	۸	عدد	۲۰۰	۰/۱۳	۲۰۸	
۴	پل ۱ بابلسر	قلوه شدگی	متوسط	۲۸	متر مربع	۴۵۰	۰/۲	۲۵۲۰	۱۸۸۸۲
		ترک خوردگی	متوسط	۱۲	متر طول	۱۲۰	۰/۳	۴۳۲	
		فرسودگی سطح	زیاد	۱۸۰	متر مربع	۶۷۰	۰/۰۴	۶۰۳۰	
		خرابی درز انقطاع	متوسط	۲۰	متر طول	۷۵۰	۰/۱	۱۵۰۰	
		پوسیده شدن	زیاد	۱۲۰	متر طول	۲۷۰	۰/۲۵	۸۱۰۰	
		خرابی زهکش	زیاد	۱۲	عدد	۲۵۰	۰/۱	۳۰۰	
۵	پل فریدون‌کنار	فرسودگی سطح	کم	۱۸	متر مربع	۱۲۰	۰/۲۷	۵۸۳/۲	۱۱۹۷۷/۲
		پوسیده شدن	کم	۸۰	متر طول	۲۷۰	۰/۴۵	۹۹۳۶	
		فرسایش فونداسیون	کم	۱۲	متر مربع	۴۵۰	۰/۲۷	۱۴۵۸	
۶	پل سرخرود	فرسودگی سطح	کم	۱۸	متر مربع	۱۲۰	۰/۰۷	۱۷۲/۸	۳۲۱۶/۸
		خرابی درز انقطاع	متوسط	۲۰	متر طول	۷۵۰	۰/۱۴	۲۱۰۰	
		آسیب تکیه‌گاه	کم	۲,۵	متر مکعب	۴۵۰	۰/۶۴	۷۲۰	
		خرابی زهکش	کم	۸	عدد	۲۰۰	۰/۱۴	۲۲۴	
۷	پل کمربندی آمل	قلوه شدگی	کم	۲۶	متر مربع	۴۵۰	۰/۱۴	۱۷۵۵	۱۰۵۰۶/۵
		ترک خوردگی	متوسط	۱۲	متر طول	۱۲۰	۰/۳۵	۵۰۴	
		فرسودگی سطح	زیاد	۱۸۰	متر مربع	۶۷۰	۰/۰۵	۶۰۳۰	
		خرابی درز انقطاع	کم	۱۲	متر طول	۳۰۰	۰/۰۵	۱۸۰	
		آسیب تکیه‌گاه	کم	۲,۵	متر مکعب	۴۵۰	۰/۳	۳۳۷/۵	
		پوسیده شدن	زیاد	۱۲۰	متر مربع	۲۷۰	۰/۰۵	۱۶۲۰	
		خرابی زهکش	کم	۸	عدد	۲۰۰	۰/۰۵	۸۰	
۸	پل موزیرج	قلوه شدگی	متوسط	۲۸	متر مربع	۴۵۰	۰/۲	۲۵۲۰	۱۵۸۲۷
		ترک خوردگی	کم	۲,۵	متر طول	۹۰	۰/۲	۴۵	

جدول ۶. میزان خرابی هر یک از پل‌ها و قابلیت اعتماد پل‌ها(ادامه دارد)

Table 6. Classify bridges in the network(Continude)

		فرسودگی سطح	زیاد	۱۸۰	متر مربع	۶۷۰	۰/۰۷	۹۶۴۸
		خرابی درز انقطاع	کم	۱۲	متر طول	۳۰۰	۰/۰۴	۱۴۴
		آسیب تکیه‌گاه	کم	۲,۵	متر مکعب	۴۵۰	۰/۲۴	۲۷۰
		پوسیده شدن	زیاد	۱۲۰	متر مربع	۲۷۰	۰/۰۸	۲۵۹۲
		فرسایش فونداسیون	کم	۱۲	متر مربع	۴۵۰	۰/۰۸	۴۳۲
		خرابی زهکش	متوسط	۱۰	متر مربع	۲۲۰	۰/۰۸	۱۷۶
۹	پل تلار	قلوه شدگی	متوسط	۲۸	متر مربع	۴۵۰	۰/۲	۲۵۲۰
		ترک خوردگی	متوسط	۱۲	متر طول	۱۲۰	۰/۲	۲۸۸
		فرسودگی سطح	زیاد	۱۸۰	متر مربع	۶۷۰	۰/۰۴	۲۶۸۰
		خرابی درز انقطاع	زیاد	۴۰	متر طول	۳۸۰۰۰	۰/۱	۱۵۲۰۰۰
		آسیب تکیه‌گاه	متوسط	۵	متر مکعب	۹۴۰۰	۰/۲	۹۴۰۰
		پوسیده شدن	متوسط	۱۰۰	متر طول	۲۷۰	۰/۰۵	۱۳۵۰
		فرسایش فونداسیون	متوسط	۵	متر مکعب	۸۵۰۰	۰/۱	۴۲۵۰
		خرابی زهکش	زیاد	۱۲	عدد	۲۵۰	۰/۱	۳۰۰
۱۰	پل سیاهرود	فرسودگی سطح	متوسط	۱۱۵	متر مربع	۴۹۰	۰/۱۲	۶۷۶۲
		خرابی درز انقطاع	متوسط	۲۰	متر طول	۷۵۰	۰/۱۲	۱۸۰۰
		آسیب تکیه‌گاه	کم	۲,۵	متر مکعب	۴۵۰	۰/۳۶	۴۰۵
		پوسیده شدن	متوسط	۱۰۰	متر طول	۲۷۰	۰/۰۵	۱۱۶۲۰
		فرسایش فونداسیون	متوسط	۵	متر مکعب	۸۵۰۰	۰/۱۷	۷۲۲۵
		خرابی زهکش	زیاد	۱۲	عدد	۲۵۰	۰/۱۷	۵۱۰

جدول ۷. مقدار پارامترهای ورودی مسئله

Table 7. The value of the input parameters of the problem

نام پارامتر	اندیس پارامتر	مقدار پارامتر
سرعت ترافیک در زمان انجام تعمیر	S_a	۲۰
سرعت نرمال ترافیک	S_n	۴۰
ارزش زمان کاربر بازای هر ساعت	R_p	۳۰۰۰۰
هزینه عملیاتی وسیله نقلیه بازای هر ساعت	R_c	۱۰۰۰۰
نرخ تصادف در زمان انجام تعمیر	A_a	۰/۷
نرخ نرمال تصادف	A_n	۰/۱
هزینه تصادف	C_a	۴۰۰,۰۰۰

جدول ۸. مقدار پارامترهای مرتبط با پل‌های شبکه

Table 8. The amount of parameters associated with network bridges

نام پل	طول پل (L_j)	نرخ خرابی پل (r_j)	حجم ترافیک پل ($traffic_j$)
پل سیاهرود	۸۰	۰/۳	۱۸۶۰۰
پل تلار	۱۰۵	۰/۴	۲۱۴۰۰
پل جویبار	۸۵	۰/۵	۱۷۲۰۰
پل بهنمیر	۹۰	۰/۵	۱۶۱۰۰
پل موزیرج	۱۰۰	۰/۳۵	۱۹۶۰۰
پل کمربندی آمل	۸۵	۰/۶	۲۰۳۰۰
پل قدیم بابلسر	۹۵	۰/۷	۱۷۴۰۰
پل ۱ بابلسر	۹۰	۰/۵۵	۱۶۵۰۰
پل فریدون‌کنار	۸۰	۰/۴۵	۱۷۸۰۰
پل سرخرود	۸۰	۰/۴	۱۵۹۰۰

جدول ۹. احتمال اتصال پل‌های گروه ۱

Table 9. Probability of connecting bridges in Group 1

$P_{G_1}=(P_9)(P_{10})$	
P_{G_1}	احتمال اتصال پل‌های گروه۱
P_9	احتمال اتصال پل تلار
P_{10}	احتمال اتصال پل سیاهرود

جدول ۱۰. احتمال اتصال پل‌های گروه ۲

Table 10. Probability of connecting bridges in Group 2

$P_{G_2}=(P_1)(P_2)$	
P_{G_2}	احتمال اتصال پل‌های گروه ۲
P_1	احتمال اتصال پل جویبار
P_2	احتمال اتصال پل بهنمیر

جدول ۱۱. احتمال اتصال پل‌های گروه ۳

Table 11. Probability of connecting bridges in Group 3

$P_{G_3}=(P_7)(P_8)$	
احتمال اتصال پل‌های گروه ۳	P_{G_3}
احتمال اتصال پل کمربندی آمل	P_7
احتمال اتصال پل موزیرج	P_8

جدول ۱۲. احتمال اتصال پل‌های گروه ٤

Table 12. Probability of connecting bridges in Group 4

$P_{G_4}=(P_3)(P_4)(P_5)(P_6)$	
احتمال اتصال پل‌های گروه ۴	P_{G_4}
احتمال اتصال پل قدیم بابلسر	P_3
احتمال اتصال پل ۱ بابلسر	P_4
احتمال اتصال پل فریدون‌کنار	P_5
احتمال اتصال پل سرخرود	P_6

جدول ۱۳. مقادیر پارامترهای الگوریتم پیشنهادی

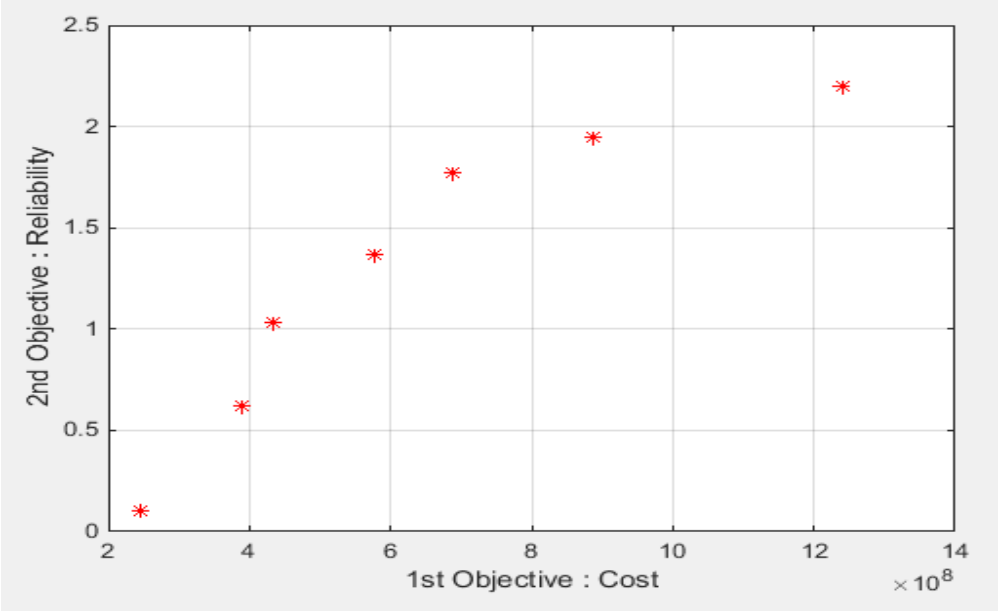
Table 13. Properties of Proposed Algorithm Parameters

مولفه	نماد	مقدار
تعداد جمعیت اولیه	Nvar	۱۰۰
ضریب خرد فردی	c_1	۲
ضریب خرد جمعی	c_2	۲
تعداد تکرار	maxiter	۵۰

جدول ۱۴. جواب‌های پارتو

Table 14. Pareto Solution

شماره جواب	هزینه (ریال)	میزان قابلیت اطمینان
۱	۲۴۵۱۹۳۰۰۰	۰/۱
۲	۳۸۸۴۷۲۰۰۰	۰/۶۲
۳	۴۳۳۵۹۵۰۰۰	۱/۰۳
۴	۵۷۶۲۷۲۰۰۰	۱/۳۷
۵	۶۸۷۳۷۶۰۰۰	۱/۷۷
۶	۸۸۷۴۴۱۰۰۰	۱/۹۵
۷	۱۲۴۰۵۳۹۰۰۰	۲/۲



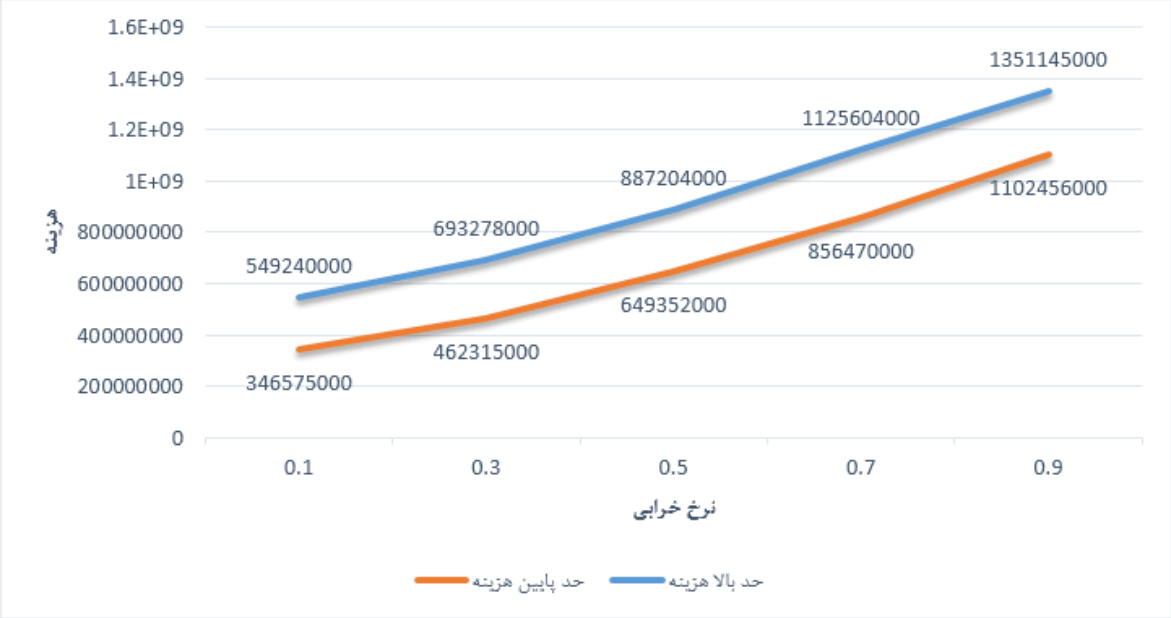
شکل ۳. جواب‌های پارتو به دست آمده

Fig. 3. Pareto solution gained

جدول ۱۵. مقادیر توابع هدف با توجه به تغییر نرخ خرابی

Table 15. The values of the objective functions due to the failure rate change

شماره جواب	هزینه (ریال)	میزان قابلیت اطمینان
۰/۱	۳۴۶۵۷۵۰۰۰	۱/۷
	۵۴۹۲۴۰۰۰۰	۲/۷
۰/۳	۴۶۲۳۱۵۰۰۰	۱/۳
	۶۹۳۲۷۸۰۰۰	۲/۲
۰/۵	۶۴۹۳۵۲۰۰۰	۰/۹
	۸۸۷۲۰۴۰۰۰	۱/۸
۰/۷	۸۵۶۴۷۰۰۰۰	۰/۵
	۱۱۲۵۶۰۴۰۰۰	۱/۴
۰/۹	۱۱۰۲۴۵۶۰۰۰	۰/۲
	۱۳۵۱۱۴۵۰۰۰	۰/۹



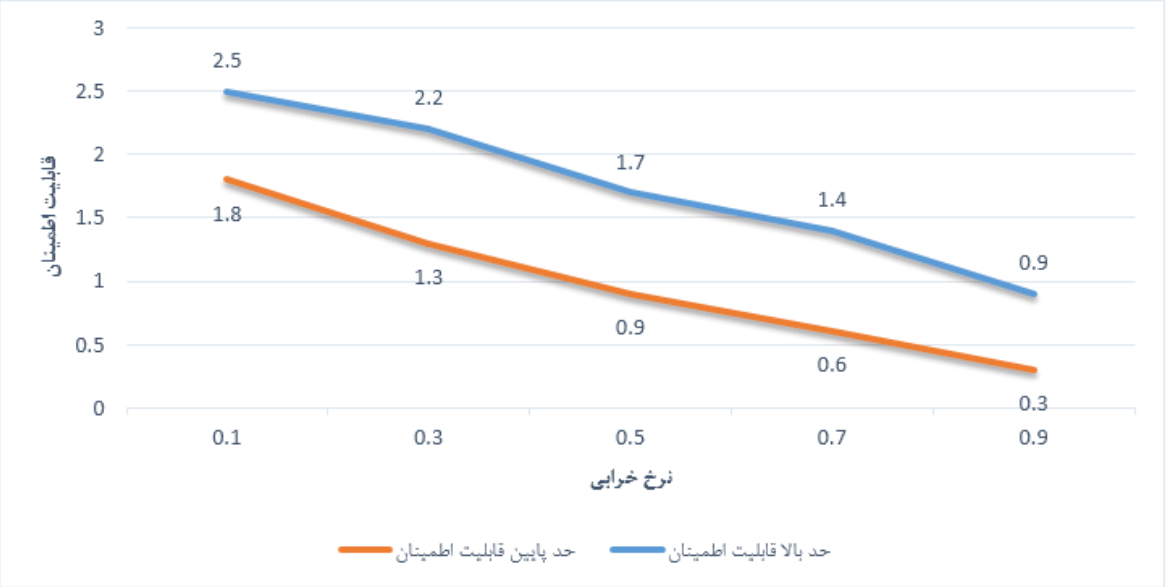
شکل ۴. روند تغییر هزینه چرخه عمر

Fig. 4. The process of changing the life cycle cost

شده است. جدول ۱۵ خروجی‌های دو تابع هدف با توجه به مقادیر مختلف نرخ خرابی را نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول ۱۵ نشان داده شده، به ازای هر نرخ خرابی، دو جواب گزارش شده است. یک جواب دارای کمترین هزینه چرخه عمر و جواب دیگر دارای بیشترین قابلیت اطمینان ممکن است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ خرابی، میزان هزینه افزایش و قابلیت اطمینان کاهش یافته است. در ادامه روند تغییرات دو تابع به طور جداگانه ارائه می‌شود. شکل ۴ روند تغییر تابع هدف هزینه چرخه عمر را با تغییر نرخ خرابی نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود خطوط قرمز حد پایین هزینه و خطوط آبی حد بالای هزینه را نشان می‌دهد. همانطور که اشاره گردید با افزایش نرخ خرابی، مجموع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و هزینه کاربری افزایش یافته است. همچنین روند تغییرات قابلیت اطمینان بر اساس تغییر نرخ خرابی



شکل ۵. روند تغییر قابلیت اطمینان

Fig. 5. Reliability change process

در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش نرخ خرابی مقدار قابلیت اطمینان در دو حد بالا و پایین کاهش یافته است. دلیل این امر آن است که نرخ خرابی زیاد منجر به ایجاد خرابی‌های زیاد و متوالی شده و بر روی قابلیت اطمینان اثر مستقیم و زیادی خواهد گذاشت.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسئله بهینه‌سازی دو هدفه نگهداری و تعمیرات پل شامل دو هدف حداقل‌سازی هزینه‌های چرخه عمر و حداکثرسازی قابلیت اطمینان پل‌ها توسعه داده شده است. تابع هدف هزینه چرخه عمر از مجموع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و هزینه‌های کاربری به دست می‌آید. بدین منظور پارامترها، متغیرها، توابع هدف و محدودیت‌های مسئله ارائه شدند. به منظور حل مسئله پیشنهادی یک الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه (MOPSO) توسعه داده شد. برای ارزیابی مدل پیشنهادی یک مطالعه موردی شامل ۱۰ پل بین شهری واقع بین دو شهر ساری و محمودآباد مدنظر قرار گرفته و انواع خرابی به همراه میزان خرابی آن‌ها به دست آمده است. از آنجایی که مدل پیشنهادی دو هدفه بود، مجموعه‌ای از جواب‌ها به عنوان مجموعه جواب پارتو گزارش شده است. کمترین هزینه به دست آمده معادل ۲۴۵۱۹۳۰۰۰ واحد پولی و بیشترین قابلیت اطمینان به دست آمده از سیستم معادل ۲/۲ بوده است. به منظور تحلیل بیشتر مدل پیشهادی، تحلیل حساسیتی بر روی پارامتر نرخ خرابی پل‌ها انجام گرفت. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که با افزایش نرخ خرابی پل‌ها، میزان هزینه‌ها روند افزایشی و قابلیت اطمینان روند کاهشی داشته است. بیشترین هزینه مربوط به نرخ خرابی ۰/۹ با مقدار ۱۳۵۱۱۴۵۰۰۰ و بیشترین مقدار قابلیت اطمینان مربوط به نرخ خرابی ۰/۱ با مقدار ۲/۷ می‌باشد. نرخ خرابی زیاد منجر به ایجاد خرابی‌های زیاد و متوالی شده و بر روی قابلیت اطمینان اثر مستقیم و زیادی خواهد گذاشت.

در این مطالعه حداقل‌سازی هزینه چرخه عمر و قابلیت اطمینان سیستم مدنظر قرار گرفت در حالی که می‌توان اهداف دیگری نظیر شاخص عملکردی پل را نیز در نظر گرفت. از آنجایی که پیچیدگی این گونه مسائل با افزایش تعداد پل‌ها زیاد می‌شود می‌توان از رویکردهای شبیه‌سازی مونت کارلو برای تخمین قابلیت اطمینان سیستم و از دیگر رویکردهای فراابتکاری چند هدفه مانند NSGA-II، MOIWO و غیره بهره برد.

منابع

[1] M. Ryall, Bridge management, CRC Press, 2009.

[2] Guide for repair and maintenance of railway technical structures, Road Development and Structural Studies Consulting Engineers Co., Transportation Research Institute of the Ministry of Roads and Urban Development, (2011), (in Persian).

[3] D. McIntyre, Weak bridges: the impact on freight movement, in: Proc. Conference on British Roads: National asset or national Disgrace, Sponsored by Surveyor Magazine and the Automobile Association, 1997.

[4] S.F. Hashemi rezvani, A. Rajaee, Cost Effectiveness of Railway Infrastructure Improvement, 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz, Shiraz University, (2009), (In Persian).

[5] S.M. Nasr Azadani, Improving the maintenance capacity of bridges by prioritizing the existing problems, The first conference on improving the internal capacity with an internal construction approach, Tehran, Sharif University of Technology Technology Studies Center, (2009), (In Persian).

[6] M.J. Taheri Amiri, F. Haghighi, A. Rahmani Firoozjaee, M. Hematian, M. Javaheri Barforooshi, Optimal allocation of repairs and maintenance of bridges in Mazandaran province in conditions of budget constraint using genetic algorithm, Journal of Transportation Engineering, 10(2), (2018), 199-211, (In Persian).

[7] T. Seyyedi morghaki, M. Ghaderi, H. Amiri, Methods of maintenance of concrete stairs, in: The 7th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management and the 6th Specialized Exhibition of Mass Builders of Housing and Construction in Tehran Province, (In Persian).

[8] M.J. Taheri Amiri, M. Hematian, F. Haghighi, N. Kiya, Optimization of Maintenance and Repair Strategies of Concrete Stairs of North and Northeast Railways 2 (Underwater-Gorgan Axis) Using Multipurpose Particle Mass Optimization Algorithm Journal of Transportation Research, 17(2) (2019) 251-271, (In Persian).

[9] J. Zhu, B. Liu, Performance life cost-based maintenance strategy optimization for reinforced concrete girder bridges, Journal of Bridge Engineering, 18(2) (2013) 172-178.

[10] G. Barone, D.M. Frangopol, M. Soliman, Optimization of life-cycle maintenance of deteriorating bridges with respect to expected annual system failure rate and expected cumulative cost, Journal of Structural Engineering, 140(2) (2014) 04013043.

[11] X. Hu, C. Daganzo, S. Madanat, A reliability-based optimization scheme for maintenance management in large-scale bridge networks, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 55 (2015) 166-178.

[12] W. Zhang, N. Wang, Bridge network maintenance prioritization under budget constraint, Structural safety, 67 (2017) 96-104.

[13] D. Wu, C. Yuan, W. Kumfer, H. Liu, A life-cycle optimization model using semi-markov process for highway bridge maintenance, Applied Mathematical Modelling, 43 (2017) 45-60.

[14] V. Vujović, The Mala Rijeka Bridge-Specificity of maintenance, Procedia Structural Integrity, 13 (2018) 1901-1907.

[15] H.-B. Xie, W.-J. Wu, Y.-F. Wang, Life-time reliability based optimization of bridge maintenance strategy considering LCA and LCC, Journal of cleaner production, 176 (2018) 36-45.

[16] M. Javad, T. Amiri, G. Abdollahzadeh, F. Haghighi, J. Neves, Bridges Risk Analysis in View of Repair and Maintenance by Multi Criteria Decision Making Method (Case Study: Babolsar Bridges) Bridges Risk Analysis in View of Repair and Maintenance, International Journal of Transportation Engineering, 7(1), (2019) 91-114.

[17] S. Mushkhian, A.A. Najafi, Optimization of investment portfolio using multi-objective particle swarm algorithm for a possible model of mean periods - half variance - skewness, Journal of Financial Engineering and Securities Management, 23, (2015), (In Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. J. Taheri Amiri, M. Hematian, Sh. Roshanghalb, Optimizing the life cycle cost of bridges by considering the reliability of bridges (Case study of bridges from Sari to Mahmudabad), Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 3723-3742.

DOI: 10.22060/ceej.2022.17603.6622