Journal of Structural and Construction Engineering, 8(11), 2022, pp. 115-141

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Determining the optimal maintenance period in order to minimize the life cycle cost and maximize the performance and reliability index of the bridge

Fereidoon Shojaei[1], Heidar Dashti[2], Mohammad Javad Taheri Amiri[3*]

1- PhD student, Construction engineering and management, Islamic Azad University, Qeshm international Branch
2- Assistant Professor, Department of civil engineering, Islamic Azad University, Chaloos Branch
3- Assistant Professor, Department of civil engineering, Higher Education Institute of Pardisan

ABSTRACT

Population growth and development of economic relations have led to increase utilization of transportation infrastructures.The bridge is one of the important components of road construction that always needs special attention during the whole period of design, execution and operation. To ensure that the bridges are regularly inspected, evaluated and operated, management is needed to meet this need in the bridges by performing appropriate maintenance and repairs. Therefore, in this study, a three-objective optimization model includes minimization of maintenance costs, maximization of bridge performance index and reliability of bridges. For this purpose, a complex integer mathematical programming model has been developed. In order to solve the problem, a multi-objective particle swarm optimization algorithm has been developed. From the solution of the proposed algorithm, different Pareto answers are obtained so that the decision makers can choose the answer from the obtained Pareto answers that is their priority. Also, after performing sensitivity analysis on the parameters of failure rate and failure rate during the effect, it has been observed that by increasing the scenario number in two cases, which indicates an increase in failure rate and failure rate during the effect, the amount of costs increases and The overall performance of the system has been declining, which seems natural and correct.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 December 2020
Revise Date: 24 April 2021
Accept Date: 13 May 2021

Keywords:
Bridge maintenance
Reliability
Life cycle cost
Multi-objective optimization
MOPSO

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.261824.2308

*Corresponding author: Mohammad Javad Taheri Amiri
Email address: jvd.taheri@gmail.com

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir
Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

تعیین دوره تعمیر و نگهداری بهینه به منظور حداقل‌سازی هزینه چرخه عمر و حداکثرسازی شاخص‌های عملکردی و قابلیت اطمینان پل

فریدون شجاعی[۱]، حیدر دشتی ناصرآبادی[۲]، محمد جواد طاهری امیری[۳*]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بین الملل قشم

۲- استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس

۳-استادیار گروه عمران موسسه آموزش عالی پردیسان فریدونکنار

چکیده

پل یکی از اجزای مهم راهسازی است که همواره نیازمند توجه خاص در تمام دوران طراحی و اجرا و بهره‌برداری می‌باشد. برای اطمینان از این که پل‌ها به طور مرتب بازرسی و ارزیابی و بهره‌برداری می‌شوند، مدیریتی نیاز است تا با انجام عملیات نگهداری و تعمیرات مناسب، این نیاز در پل‌ها برآورده شود. از اینرو در این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی سه هدفه شامل حداقل‌سازی هزینه نگهداری و تعمیرات، حداکثرسازی شاخص عملکرد پل و قابلیت اطمینان پل ها می‌باشد. بدین منظور یک مدل برنامه ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط توسعه داده شده است. به منظور حل مسئله یک الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات چندهدفه توسعه داده شده است. از حل الگوریتم پیشنهادی جواب‌های پارتو مختلفی به‌دست آمده است طوری که تصمیم گیران می توانند از میان جواب‌های پارتو به‌دست‌آمده، جوابی را برگزینند که در اولویت آن‌ها قرار دارد. همچنین پس از انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای نرخ خرابی و نرخ خرابی در طول اثر مشاهده شده است که با افزایش شماره سناریو در دو حالت که بیانگر افزایش نرخ خرابی و نرخ خرابی در طول اثر می باشد، میزان هزینه ها روند افزایشی و مجموع عملکرد سیستم روند کاهشی داشته است که امری طبیعی و درست به نظر می‌رسد.

کلمات کلیدی: تعمیر نگهداری پل، قابلیت اطمینان، هزینه چرخه عمر، بهینه سازی چند هدفه، الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات چندهدفه

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.261824.2308
۱۳۹۹/۰۹/۲۳	۱۴۰۰/۰۲/۰۴	۱۴۰۰/۰۲/۲۳	۱۴۰۰/۰۲/۲۳	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2021.261824.2308

*نویسنده مسئول: محمدجواد طاهری امیری

پست الکترونیکی: jvd.taheri@gmail.com

۱- مقدمه

سیستم حمل‌ونقل، 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 حمل‌ونقل جوامع، می‌توان به ویژگی‌های اقتصادی، سیاسی، اجتماعی، فرهنگی و حتی شخصی ساکنین آن جامعه آگاهی پیدا کرد[۱]. پل‌ها از عناصر کلیدی بزرگراه‌های هر کشوری می‌باشند و احداث آنها نسبت به بقیه اجزای راه پرهزینه‌تر می‌باشد. خسارت-های موجود در پل همراه با افزایش بارهای ترافیکی و شرایط نامایم محیطی و موقعیت قرارگیری پل‌ها و در نتیجه بدتر شدن سریع اجزای سازه پل نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری فوری دارد. پل‌ها از پرهزینه‌ترین و راهبردی‌ترین عناصر راه و راه‌آهن محسوب می‌شوند که با عبور از موانع طبیعی و مصنوعی احداث می‌گردند و مانند هر سازه‌ی 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 سازه‌های پرهزینه و حساس محسوب می‌شوند؛ کوتاهی در نگهداری آن‌ها در دوران بهره‌برداری، اثرات مخربی به دنبال خواهد داشت[۱]. به‌این‌ترتیب، تشخیص این محدودیت‌ها و بازرسی‌های مرتب و برنامه‌ریزی‌شده‌ی پل‌ها، برای پیش‌گیری از خرابی‌های جدی و خطرآفرین و همچنین جلوگیری از صرف هزینه‌های گزاف جبران این خرابی‌ها، بسیار ضروری است. پل‌ها نمی‌توانند برای همیشه باقی بمانند و هر شکل سازه‌ای که به کار رود و هر مصالحی که استفاده شود، دیر یا زود آثار فرسودگی در آن ظاهر می‌شود[۱]. در بیشتر موارد، مسئولان از نگهداری پل در دوران بهره‌برداری چشم پوشی کرده و به استراتژی درمان به جای پیشگیری روی آوردند[۲]. 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[۲]. 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 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[۲]. مدیریت پل، ابزاری است که به‌وسیله آن مجموعه پل‌ها از لحظه تصمیم‌گیری تا انتهای عمر مفید آن، مراقبت می‌شوند. متأسفانه بسیاری از سیاست‌گذاران و متولیان پل، در سراسر جهان ازجمله ایران درحالی‌که 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 بلندمدت تضمین کند، درک نمی‌کنند. در بیشتر موارد، مسئولان از نگهداری پل در دوران بهره‌برداری چشم‌پوشی کرده و به استراتژی درمان به‌جای پیشگیری روی آورده‌اند[۳]. درنتیجه این رویکرد، نسل حاضر مهندسان پل، با پل‌هایی مواجه‌اند که به‌شدت روبه‌زوال گذاشته و اکنون باید تعمیر، مقاوم‌سازی، تقویت یا جایگزین شوند و یا محدودیت‌های بارگذاری برای آن‌ها وضع گردد. خوشبختانه در سال‌های اخیر، رویکرد آینده‌نگرانه مدیران و تصمیم‌گیرندگان در بخش‌های عمرانی، میدان را برای برپا کردن برنامه‌های گسترده‌ای چون سیستم مدیریت پل فراهم کرده و برخی از نهادها و مسئولین از پیشگامان این امر محسوب می‌شوند. جامعه‌ی نوین مهندسی نیز که همواره در پی اجرای طرح‌های کاربردی در کشور می‌باشند با آغوش باز از این پروژه‌ها که گامی بزرگ در جهت توسعه پایدار محسوب می‌شوند استقبال می‌کند[۳]. رسیدگی به پل‌ها و تعمیر و نگهداری به‌موقع آن‌ها، موجب افزایش عمر مفید پل‌ها می‌گردد. 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 دارد. امروزه با استفاده از سامانه‌های نگهداری به صورت سیستماتیک، به مساله‌ی نگهداری از پل‌ها پرداخته می‌شود[۳]. 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. 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[۲]. در این پژوهش، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نگهداری پل با هدف حداقل-سازی هزینه‌های چرخه عمر و کاربری مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-ادبیات موضوع

والنزوئلا[۱] و همکاران (۲۰۱۰) شاخصی یکپارچه برای اولویت‌بندی تعمیر و نگهداری پل‌ها تحت عنوان شاخص یکپارچه‌ی پل (IBI[۲])، پیشنهاد دادند. این شاخص بر مبنای چارچوبی مبتنی بر نیازها توسعه داده شده است تا بتواند کمکی به اولویت‌بندی و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با تعمیر و نگهداری و بازسازی پل‌ها بکند. این شاخص مشکلات سازه‌ای، آسیب‌پذیری‌های هیدرولیکی، خطرات لرزه‌ای و اهمیت استراتژیک پل را می‌سنجد. همچنین این شاخص از طریق بازرسی چشمی، بررسی کارشناسان و تجزیه‌وتحلیل رگرسیون محاسبه خواهد شد و سپس رتبه‌ی پل‌ها مشخص خواهد شد که برای تمام این اقدامات یک نرم‌افزار توسعه داده شده‌است [۴].

پائولو بوچینی و فرانگوپول (۲۰۱۱) با تحقیقی به برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری بهینه‌ی شبکه‌ای از پل‌ها در قالب محاسبات احتمالی پرداختند. چارچوب محاسباتی این مقاله جهت بهینه‌سازی پارتو برای به کارگیری تعمیر و نگهداری پیشگیرانه‌ی پل‌های بزرگراهی شبکه‌ی حمل‌ونقل ارائه شده است. ویژگی پل‌ها توسط مشخصات شاخص قابلیت اطمینان غیرقطعی نشان داده شده است و شرایط در حال سرویس‌دهی و خارج از سرویس‌دهی پل‌ها با توجه به ساختار ارتباطی آن‌ها شبیه‌سازی‌شده 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 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 [۵].

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 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 چند هدفه فرموله شده که توسط روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[۳](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 چندهدفه پیشنهادشده 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 به‌کارگیری شود [۶].

گیورگیو بارونه و همکاران (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

۳٤- Valenzuela
۳۵- Integrated Bridge Index
[3] -Non dominate Sorting Genetic Algorithm

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 [۷].

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 بلندمدت 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 صورت فردی تقریب زده شود که این امر اجازه می‌دهد تا یک مشکل در سطح شبکه به مشکلات هر پل تجزیه شود و به‌طور مؤثرتر حل شود [۸].

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 فراشناختی برای ادغام پارامترهای توصیفی مانند: ظرفیت پل، رتبه‌بندی شرایط، تقاضای ترافیک و محل‌پل، با هدف هزینه تعمیر و نگهداری، درنظر گرفته شد[۹].

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 Mostogradnja 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[۱۰].

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 نگهداری پیشگیرانه انجام شد. می‌توان نتیجه گرفت که نگهداری پیشگیرانه در مدیریت پل بسیار مهم است. انتخاب زمان اولیه و فاصله زمانی نگهداری پیشگیرانه به طور منطقی می‌تواند اثرات محیطی چرخه زندگی پل را به طور موثر کاهش دهد[۱۱].

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 به‌عنوان مدل هزینه‌ی تعمیر و نگهداری کشور ارائه گردید[۱۲].

عامری و یگانه بهمن (۱۳۸۸) به ارائه‌ی مدل بهینه‌سازی شبکه‌ی تعمیر و نگهداری در سیستم مدیریت پل پرداختند. در این تحقیق مدل‌های بهینه‌ای به‌منظور اولویت‌بندی انجام پروژه‌ها و فعالیت‌های تعمیراتی و همچنین مناسب‌ترین زمان انجام این پروژه‌ها طراحی گردیده‌اند و علاوه بر این اثرات فعالیت‌های تعمیراتی بر برنامه‌ریزی‌های نگهداری در نظر گرفته شده‌اند. در این مقاله فعالیت‌های پل به دو گروه اصلی پروژه‌های مرمت و بازسازی (تعمیر) و فعالیت‌های نگهداری تقسیم می‌گردد. هدف از این سیستم، تخصیص اعتبار و منابع موجود به پروژه‌های تعمیر و فعالیت‌های نگهداری و تعیین زمان بهینه برای انجام هر پروژه یا فعالیت در طی یک دوره‌ی زمانی خاص است. در این سیستم تأثیر پروژه‌های تعمیر بر روی فعالیت‌های نگهداری در نظر گرفته خواهد شد. جهت بهینه کردن سود سیستم و اولویت‌بندی فعالیت‌های مربوط به تعمیر و نگهداری در این مقاله دو برنامه‌ی کامپیوتری جهت بهینه‌سازی شبکه‌ی تعمیر و نگهداری ارائه گردیده و نتایج آن با روش‌های موجود، مقایسه و برتری مدل‌های ارائه شده، نشان داده شده است. همچنین با در نظر گرفتن این موضوع که مسئله‌ی پل‌ها دارای دو بعد زمانی و شبکه هست، مدل بهینه‌سازی این سیستم شامل دو مدل ترکیبی است، مدل بیرونی و مدل داخلی. مدل داخلی، بهینه‌سازی یک‌ساله را انجام می‌دهد، درحالی‌که مدل بیرونی سود سیستم را در طول دوره بهینه می‌کند. به دلیل تعداد زیاد متغیرهای تصمیم‌گیری، در این مقاله روش برنامه‌ریزی پویا برای فرمول‌سازی مدل بهینه انتخاب شده است[۱۳].

نصر آزادانی و همکاران (۱۳۸۸) با نگاهی متفاوت به مقوله‌ی نگهداری و تعمیر، به‌وسیله‌ی 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 حاصل‌ضرب 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[۱۴].

طاهری امیری و همکاران (۱۳۹۷)، در مقاله‌ای تحت عنوان تخصیص بهینه تعمیرات و نگهداری پل‌های استان مازندران در شرایط محدودیت بودجه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، 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 براساس معیارهای ارزیابی نقص، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تحلیل سلسله‌مراتبی اولویت‌بندی شده و سپس براساس 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 فراابتکاری ژنتیک برای پیدا کردن اقدامات اصلاحی بهینه در نرم افزار 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[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 پل ها، 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].

نیلی و همکاران (۲۰۲۰) در مقاله‌ای با عنوان یکپارچه سازی شبیه سازی رویداد گسسته و بهینه سازی الگوریتم ژنتیک برای برنامه‌ریزی نگهداری پل پرداختند. این مقاله با تلفیق الگوریتم ژنتیک و شبیه سازی رویداد گسسته برای شناسایی برنامه نگهداری بهینه

با در نظر گرفتن محدودیت های خدمه، چارچوبی جدید به نام بهینه سازی نگهداری پل مبتنی بر شبیه سازی را ارائه می دهد. این چارچوب توالی فعالیت های ترمیم را با در نظر گرفتن محدودیت های فضای کار و روابط پیشین بهینه می‌کند[۱۷].

طی بررسی‌های انجام شده در مقالات مورد مطالعه، در هیچیک از مقالات مورد بررسی به بهینه‌سازی همزمان دو عامل هزینه چرخه عمر و قابلیت اطمینان پلها پرداخته نشده است که در این مطالعه این دو مورد به صورت همزمان موزد بررسی قرار گرفته‌اند.

۳- تعریف مسئله

هدف نهایی این تحقیق، تعیین دوره بهینه تعمیر و نگهداری پل با هدف حداقل‌سازی هزینه چرخه عمر پل‌ها می‌باشد. بهینه‌سازی این تحقیق به صورت سه هدفه است. هدف اول، حداقل‌سازی هزینه ناشی از نگهداری و تعمیرات، هدف دوم حداکثرسازی میزان عملکرد پل و هدف سوم حداکثرسازی قابلیت اطمینان پل‌ها می‌باشد. هدف اول با دو هدف دیگر در تضاد با یکدیگر هستند، طبیعتا برای بیشینه-سازی عملکرد پل باید هزینه بیشتری انجام داد و از طرف دیگر کم کردن هزینه منجر به کاهش عملکرد می‌شود. بنابراین باید یک تعادل بین این دو هدف برقرار و راه‌حل یا راه‌حل‌هایی جهت بهینه‌سازی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری پیدا شود. همچنین به دنبال این سه هدف، پارامترهای دیگری همچون نوع خرابی، نوع تعمیر مرتبط با خرابی به وجود آمده، مدت زمان اثر تعمیر، فاصله زمانی تعمیر اول تا تعمیر بعدی نیز شناسایی می‌شود. لازم بذکر است در این تحقیق از هزینه خرابی پل صرفه‌نظر شده است. نکته‌ای که در این تحقیق قابل ذکر است، محدودیت بودجه در دسترس در نظر گرفته شده مربوط به هزینه تعمیر و نگهداری است که صرفا جهت نزدیک شدن مسئله مورد بررسی به واقعیت در نظر گرفته شده است، زیرا همواره بودجه در دسترس سازمان‌ها و مدیران کمتر از هزینه‌های پیش‌بینی شده آن-هاست. به همین دلیل این کمبود بودجه، مدیران را بر آن می‌دارد تا به فکر بهینه‌سازی بودجه‌ی خود باشند تا بیشترین بهره‌وری را در سازمان خود داشته باشند. برای حل این مسئله، از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه استفاده شده است که در بخش‌های بعدی به طورکامل به جزئیات مدل ریاضی پیشنهادی و الگوریتم به کار برده شده در حل این مسئله پرداخته شده است.

۳-۱- مفروضات تحقیق

مفروضات در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل موارد زیر می‌باشد.

- یک مسیر حلقه بسته بین دو شهر در نظر گرفته شده است. طوریکه در صورت قطعی ارتباط یک راه بین دو شهر، بتوان از راه دیگری بین این دو شهر رفت و آمد داشت.
- تعیین بهترین زمان برای انجام عملیات بازسازی و تعمیر و نگهداری، باعث کاهش تلفات سازه‌ای و کاهش ضررهای اقتصادی است.
- تعیین زمان بهینه نگهداری و تعمیرات منجر به افزایش سطح عملکرد پل‌ها خواهد شد.
- الگوریتم‌های فراابتکاری ابزاری مناسب به منظور محاسبه دوره زمانی بهینه تعمیر و نگهداری پل‌ها با حداقل‌سازی هزینه چرخه عمر پلها می‌باشد.
- از آن جایی که در این تحقیق هزینه‌های تعمیرات و نگهداری مدنظر می‌باشد، از تخریب کامل پل و هزینه‌های مرتبط با آن صرفه‌نظر شده است.

۳-۲- نمادگذاری‌ها

i: نوع خرابی $i=1,2,3$

t: سال $t=1,2,\ldots,100$

j: شمارنده پل $j = 1,2,\ldots,10$

۳-۳-پارامترهای مسئله

γ	میزان بهبود عملکرد
T_D	مدت زمان به تاخیر افتادن خرابی (سال)
α	نرخ خرابی ($\frac{1}{\text{سال}}$)
$\alpha - \delta$	نرخ خرابی در طول اثر ($\frac{1}{\text{سال}}$)
T_I	زمان شروع خرابی اولیه (سال)
C_{total}	هزینه کل
T_{PD}	مدت زمان اثر تعمیر
T_{PI}	زمان شروع اولین برنامه تعمیر (سال)
P_0	شاخص اولیه
R	نرخ بهره سالیانه
T_P	فاصله زمانی از چرخه برنامه بعدی
r_{ij}	شاخص عملکردی احتمالی تعمیر نوع i برای پل j
c_{ij}	هزینه واحد تعمیر نوع i برای پل j
S_j	حداقل تعداد تعمیرات مورد نیاز برای پل j
NR_j	تعداد تعمیرات موجود برای پل j

۳-۴-متغیرهای مسئله

C_{total}: هزینه کل

P: شاخص عملکردی

R: قابلیت اعتماد

P_{it} میزان عملکرد لحظه t که تعمیر i آغاز می‌شود

Pr_j : احتمال عملکرد صحیح پل j حاصل از تعمیرات

Pr_C :احتمال اتصال بین مبدا و مقصد

X_{ij} : اگر نگهداری و تعمیر نوع j روی پل i انجام شود ۱و در غیر اینصورت ۰

۳-۵ مدل ریاضی چندهدفه پیشنهادی

مدل ریاضی پیشنهادی این تحقیق، سه هدفه بوده و شامل حداقل‌سازی هزینه‌ها و حداکثرسازی شاخص عملکرد و قابلیت اطمینان پل‌ها می‌باشد. در ادامه مدل ریاضی پیشنهادی ارائه شده است.

$$min\, C_{total} \quad (۱)$$

$$max\, P \quad (۲)$$

$$max\, R \quad (۳)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{NR_i} C_{ij} X_{ij} \quad (۴)$$

$$P = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} P_{it} \quad (۵)$$

$$P_{it=} \begin{cases} P_{it-1} + \gamma & t < T_D \\ P_{it-1} + \gamma - max(\alpha - \delta, 0)\,(t - T_D) & T_D \le t < T_{PD} = 0.8P_{it} \\ P_{it-1} + \gamma - \max(\alpha - \delta, 0)\,(T_{PD} - T_D) - \alpha(t - T_{PD}) & T_{PD} \le t < T_P = 0.4P_{it} \end{cases} \quad (۶)$$

$$R = \emptyset^{-1}(Pr_C) \quad (۷)$$

$$Pr_{C=}\, [1-(1-Pr_{G_1})(1-Pr_{G_2})][1-(1-Pr_{G_3})(1-Pr_{G_4})] \quad (۸)$$

$$Pr_j = \sum_{i=1}^{NR_j} r_{ij} X_{ij} \qquad \forall j \quad (۹)$$

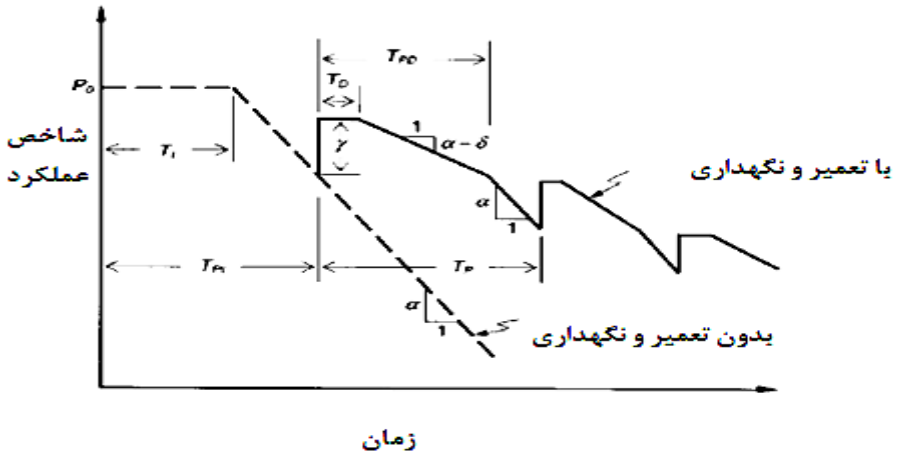
$$\sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{NR_j} C_{ij} X_{ij} \le B \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i=1}^{NR_j} X_{ij} \ge S_j \quad \forall j \quad (۱۱)$$

رابطه ۱ به دنبال حداقل‌سازی هزینه کل تعمیرات و نگهداری در طول افق برنامه‌ریزی می‌باشد. رابطه ۲ به دنبال حداکثرسازی عملکرد حاصل از انواع تعمیرات در افق برنامه‌ریزی می‌باشد. این رابطه نحوه محاسبه عملکرد کل سیستم با تجمیع عملکردهای پل بعد از انجام تعمیرات در فواصل زمانی مشخص را نشان می‌دهد. همچنین تابع هدف سوم در رابطه ۳ سعی در حداکثرسازی قابلیت اطمینان سیستم دارد. رابطه ۴ نحوه محاسبه هزینه کل تعمیرات و نگهداری را نشان می‌دهد. رابطه ۵ نحوه محاسبه عملکرد کل سیستم را بیان می‌نماید. میزان عملکرد سیستم (P_{it}) با توجه به نوع تعمیر مورد نیاز و در سه بازه زمانی مختلف پس از اعمال تعمیر در سه حالت عملکرد حاصل از تعمیر انجام گرفته، حالت دوم عملکرد حاصل از تعمیر انجام شده که با گذشت زمان با شیب $\alpha - \delta$ کاهش می‌یابد و حالت سوم با گذشت زمان اثر تعمیر انجام شده از بین رفته و سطح عملکرد با شیب α کاهش می‌یابد، توسط رابطه ۶ مشخص می‌شود. رابطه ۷ نحوه محاسبه قابلیت اطمینان سیستم را نشان می‌دهد. رابطه ۸ نحوه احتمال اتصال شبکه را محاسبه می‌نماید. رابطه ۹ میزان احتمال عملکرد پل‌ها بعد از تعمیرات را نشان می‌دهد. رابطه ۱۰ محدودیت بودجه موجود در سیستم را نمایش می‌دهد. در نهایت رابطه ۱۱ تضمین می‌کند که هر پل، حداقل S_j تعمیر را انجام دهد.

شکل ۱ نحوه تغییر عملکرد پل بر اساس شاخص ایمنی در دو وضعیت با تعمیر و نگهداری و بدون تعمیر و نگهداری را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار در حالت بدون تعمیر و نگهداری، شاخص اولیه پل P_0 بعد از گذشت زمان مشخص کم کم از حالت اولیه

(حالت نرمال) به سمت پایین نمودار نزول پیدا می‌کند تا به حالت صفر برسد. همین شاخص در حالت با تعمیر و نگهداری بعد از گذشت یک زمان مشخص و شروع خرابی T_I و با پایین آمدن از حالت اولیه بلافاصله بعد از شروع عملیات تعمیر که همان T_{PI} زمان شروع اولین برنامه تعمیر است، به اندازه مقدار γ بهبود می‌یابد و این خرابی به مدت T_D که به آن مدت زمان به تاخیر افتادن خرابی گفته می‌شود به تاخیر می‌افتد. تا زمانی که به اندازه $\alpha - \delta$ یعنی نرخ خرابی در طول اثر، مدت زمان اثر تعمیر T_{PD} پایان یابد و خرابی دیگری در پل رخ دهد. و این روند تا پایان زوال عمر سازه همچنان ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۱- نمودار شاخص عملکرد پل

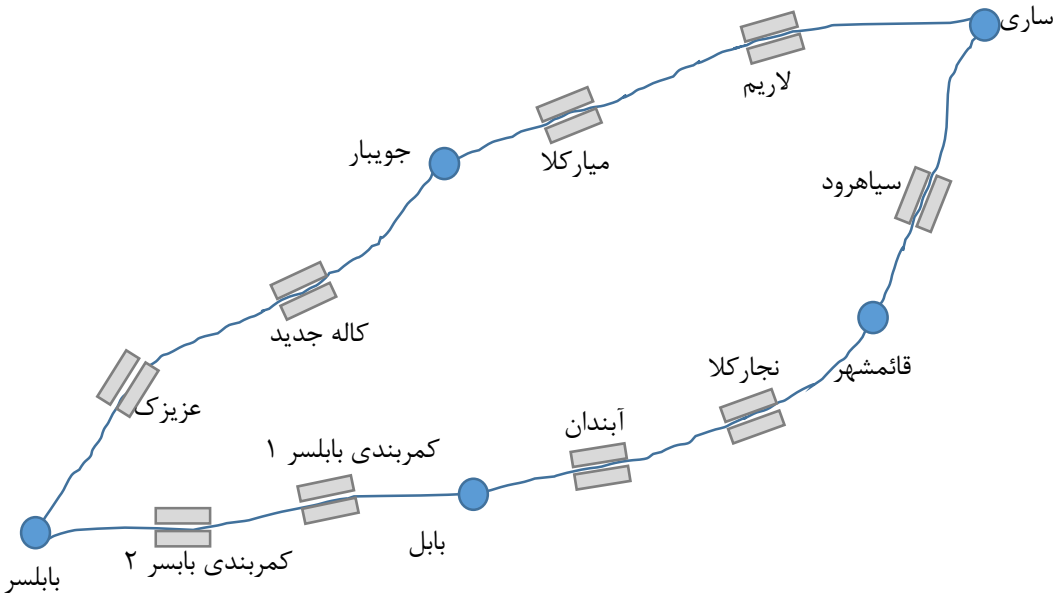
۳-۶- معرفی مطالعه موردی

پل‌هایی که در این تحقیق از آن استفاده شده است شامل نه پل می‌باشد که یک شبکه پل را تشکیل می‌دهد. محل قرارگیری پل‌ها در مسیر راه ساری تا بابلسر می‌باشد، که این مسیر شامل مبدا (ساری) و مقصد (بابلسر) است که از دو طرف بهم متصل می‌شوند. با توجه به اینکه مسیر پر رفت وآمدی می‌باشد در صورت خرابی هر یک از این پل‌های شبکه مشکلات زیادی بوجود می‌آید و اینکه اهمیت یک پل و یا گروه به عملکرد کل شبکه پل بستگی دارد. با بررسی و انتخاب روش نگهداری وتعمیر هر یک از پل‌ها قابلیت اعتماد هر یک از پل‌ها افزایش داده شده تا قابلیت اتصال شبکه بهبود یابد. در ادامه نام مجموعه پل‌های مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- پل‌های مورد بررسی در این تحقیق

ردیف	نام پل	نام مسیر
۱	پل کمربندی بابلسر ۲	بابل-بابلسر
۲	پل کمربندی بابلسر ۱	بابل-بابلسر
۳	پل آبندان	بابل-قائمشهر
۴	پل نجارکلا	بابل-قائمشهر
۵	پل سیاهرود	قائمشهر-ساری
۶	پل لاریم	ساری-جویبار
۷	پل میارکلا	ساری-جویبار
۸	پل کاله جدید	جویبار-بابلسر
۹	پل عزیزک	جویبار-بابلسر

شبکه ارتباطی پل بین دو شهر ساری و بابلسر در شکل ۲ نشان داده شده است.



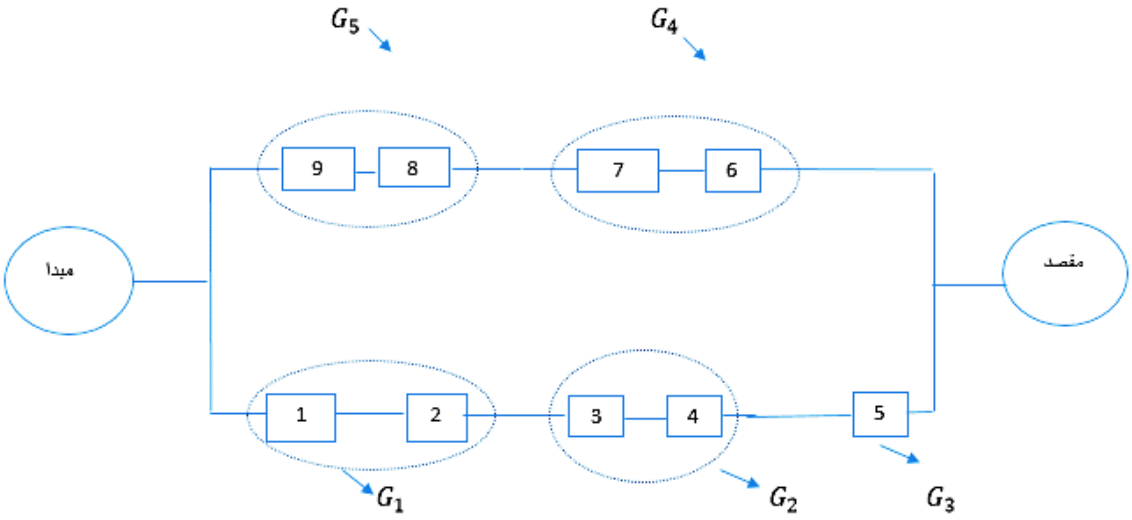
شکل ۲- شماتیک مسیر ارتباطی بین ساری-بابلسر

پل‌های موجود در شبکه به پنج گروه دسته‌بندی شده است که پل‌های گروه ۱ شامل پل کمربندی بابلسر ۱ و ۲، پل‌های گروه ۲ شامل پل آبندان و نجارکلا، پل‌های گروه ۴ شامل پل لاریم و میارکلا و پل‌های گروه ۵ شامل پل کاله و عزیزک می‌باشد. همچنین پل سیاهرود به تنهایی در گروه ۳ قرار گرفته است. در جدول ۲ دسته‌بندی مربوط به پل‌ها نشان داده شده است.

جدول ۲- دسته‌بندی پل‌ها

ردیف	گروه	تعداد پل	نام پل ها
۱	G_1	۲	کمربندی بابلسر ۱
			کمربندی بابلسر ۲
۲	G_2	۲	آبندان
			نجارکلا
۳	G_3	۱	سیاهرود
۴	G_4	۲	لاریم
			میارکلا
۵	G_5	۲	کاله
			عزیزک

همچنین شکل ۳ شماتیک ارتباطی بین پل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳- طرح شماتیک شبکه پل

با توجه به دسته بندی انجام شده، میزان قابلیت اطمینان در رابطه ۳ بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$P_{C=}\ [1-(1-P_{G_1})(1-P_{G_2})(1-P_{G_3})][1-(1-P_{G_4})(1-5)] \qquad ۱۲$$

با توجه به رابطه فوق احتمال اتصال پل‌های هر گروه بصورت جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳- احتمال اتصال هر گروه پل

ردیف	گروه	تعداد پل	نام پل ها	احتمال اتصال
۱	G_1	۲	کمربندی بابلسر ۱ کمربندی بابلسر ۲	$P_{G_1} = (P_1)(P_2)$
۲	G_2	۲	آبندان نجارکلا	$P_{G_2} = (P_3)(P_4)$
۳	G_3	۱	سیاهرود	$P_{G_3} = (P_5)$
۴	G_4	۲	لاریم میارکلا	$P_{G_4} = (P_6)(P_7)$
۵	G_5	۲	کاله عزیزک	$P_{G_5} = (P_8)(P_9)$

۳-۷- تعیین نوع و میزان خرابی پل‌ها

در این بخش ابتدا انواع خرابی‌هایی که می‌تواند در پل‌های شبکه مذکور وجود داشته باشد، شناسایی گردیده که در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- انواع خرابی‌های موجود و روش‌های ترمیمی برحسب میزان خرابی

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 بطوریکه آرماتورها مشخص شوند	استفاده از ترمیم کننده ویژه بتن
	زیاد	مترمکعب	خرابی بتن دور آرماتور	استفاده از ملات اپوکسی
ترک خوردگی	کم	متر طول	سطحی غیر سازه ای	استفاده از ترمیم کننده ویژه بتن
	متوسط	متر طول	عمیق غیر سازه ای	استفاده از ماستیک پلی یورتان
	زیاد	متر طول	سازه ای	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 بصورت 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	مترطول	آسیب نرده‌های فولادی	صافکاری، جوش قطعات و سپس رنگ‌آمیزی و گالوانیزه کردن آن
	متوسط	مترطول	آسیب نرده‌های فولادی	نیاز به تعویض بخشی از نرده است
	زیاد	مترطول	نرده ندارد یا نیاز به تعویض کلی است	احداث نرده فلزی
خرابی درز انقطاع	کم	مترطول	شل شدن پیچ و پرچ های درز	پیچ و پرچ‌های شل درز باز و دوباره تنظیم شود و پوشش گردد
	متوسط	مترطول	خرابی درزهای انقطاع بتنی	اجرای پوشش درز با ماستیک پلی یورتان
	زیاد	مترطول	نداشتن درز یا خرابی کلی درز	تعویض کامل یا اجرای کامل درز
آسیب تکیه گاه	کم	متر مربع	از بین رفتن کاور بطوریکه آرماتور ها مشخص شوند	استفاده از ترمیم‌کننده ویژه بتن
	متوسط	مترمکعب	خرابی بتن دور آرماتور	استفاده از ملات اپوکسی
	زیاد	مترمکعب	خرابی در سطح و عمق زیاد	استفاده از بتن تقویتی یا پدستال
پوسیده شدن	کم	متر طول	پوشش نرده	استفاده از رنگ های 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 بطوریکه آرماتورها مشخص شوند	استفاده از ترمیم‌کننده ویژه بتن
	متوسط	مترمکعب	خرابی بتن دور آرماتور	استفاده از ملات اپوکسی

	زیاد	مترمکعب	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

در نهایت با توجه به انواع خرابی ذکر شده، طبق نظر کارشناسان در حوزه‌ی پل، نوع خرابی برای پل‌های 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 ۵ به صورت زیر مشخص شده می‌باشد.

جدول ۵- میزان خرابی و قابلیت اعتماد هریک از پل ها

ردیف	نام پل	نوع خرابی	درجه ضعف	میزان خرابی	واحد	هزینه واحد (هزار ریال)	قابلیت اعتماد (rij)	هزینه هر خرابی (Cij)	هزینه کل خرابی برای هر پل(هزار ریال)
۱	**نجارکلا**	ترک خوردگی	کم	۲,۵	مترطول	۹۰	۰/۳۵	۷۵/۷۵	۲۲۱۴۶/۷۵
		فرسودگی سطح	کم	۱۸	مترمربع	۱۲۰	۰/۰۴	۱۰۸	
		آسیب تکیه گاه	متوسط	۵	مترمکعب	۹۴۰۰	۰/۴۵	۲۱۱۵۰	
		فرسایش فونداسیون	کم	۱۲	مترمربع	۴۵۰	۰/۱۵	۸۱۰	
۲	**عزیزک**	خرابی درز انقطاع	متوسط	۱۵	مترطول	۷۵۰	۰/۴۹	۷۵۰۰	۱۲۹۶۴
		فرسودگی سطح	زیاد	۲۲	مترطول	۵۳۰	۰/۴	۴۶۶۴	
		خرابی زهکش	کم	۸	عدد	۲۰۰	۰/۵	۸۰۰	
۳	**کمربندی بابلسر ۱**	فرسودگی سطح	کم	۱۸	مترمربع	۱۲۰	۰/۱۲	۲۸۰/۸	۱۳۵۲۶/۸
		آسیب نرده	متوسط	۲۰	مترطول	۱۹۵۰	۰/۰۷	۲۷۳۰	
		خرابی درز انقطاع	متوسط	۲۰	مترطول	۷۵۰	۰/۱۴	۲۱۰۰	
		پوسیده شدن	کم	۸۰	مترطول	۲۷۰	۰/۳۳	۷۱۲۸	

		فرسایش فونداسیون	کم	۱۲	مترمربع	۴۵۰	۰/۲	۱۰۸۰	
		خرابی زهکش	کم	۸	عدد	۲۰۰	۰/۱۳	۲۰۸	
۴	**کمربندی بابلسر ۲**	قلوه شدگی	متوسط	۲۸	مترمربع	۴۵۰	۰/۲	۲۵۲۰	۱۸۸۸۲
		ترک خوردگی	متوسط	۱۲	مترطول	۱۲۰	۰/۳	۴۳۲	
		فرسودگی سطح	زیاد	۱۸۰	مترمربع	۶۷۰	۰/۰۴	۶۰۳۰	
		خرابی درز انقطاع	متوسط	۲۰	مترطول	۷۵۰	۰/۱	۱۵۰۰	
		پوسیده شدن	زیاد	۱۲۰	مترطول	۲۷۰	۰/۲۵	۸۱۰۰	
		خرابی زهکش	زیاد	۱۲	عدد	۲۵۰	۰/۱	۳۰۰	
۵	**آبندان**	فرسودگی سطح	کم	۱۸	مترمربع	۱۲۰	۰/۲۷	۵۸۳/۲	۱۱۹۷۷/۲
		پوسیده شدن	کم	۸۰	مترطول	۲۷۰	۰/۴۵	۹۹۳۶	
		فرسایش فونداسیون	کم	۱۲	مترمربع	۴۵۰	۰/۲۷	۱۴۵۸	
۶	**کاله**	فرسودگی سطح	کم	۱۸	مترمربع	۱۲۰	۰/۰۷	۱۷۲/۸	۳۲۱۶/۸
		خرابی درز انقطاع	متوسط	۲۰	مترطول	۷۵۰	۰/۱۴	۲۱۰۰	
		آسیب تکیه گاه	کم	۲,۵	مترمکعب	۴۵۰	۰/۶۴	۷۲۰	
		خرابی زهکش	کم	۸	عدد	۲۰۰	۰/۱۴	۲۲۴	
۷	**سیاهرود**	قلوه شدگی	کم	۲۶	مترمربع	۴۵۰	۰/۱۴	۱۷۵۵	۱۰۵۰۶/۵
		ترک خوردگی	متوسط	۱۲	مترطول	۱۲۰	۰/۳۵	۵۰۴	
		فرسودگی سطح	زیاد	۱۸۰	مترمربع	۶۷۰	۰/۰۵	۶۰۳۰	
		خرابی درز انقطاع	کم	۱۲	مترطول	۳۰۰	۰/۰۵	۱۸۰	
		آسیب تکیه گاه	کم	۲,۵	مترمکعب	۴۵۰	۰/۳	۳۳۷/۵	
		پوسیده شدن	زیاد	۱۲۰	مترمربع	۲۷۰	۰/۰۵	۱۶۲۰	
		خرابی زهکش	کم	۸	عدد	۲۰۰	۰/۰۵	۸۰	
۸	**لاریم**	قلوه شدگی	متوسط	۲۸	مترمربع	۴۵۰	۰/۲	۲۵۲۰	۱۵۸۲۷
		ترک خوردگی	کم	۲,۵	مترطول	۹۰	۰/۲	۴۵	
		فرسودگی	زیاد	۱۸۰	مترمربع	۶۷۰	۰/۰۷	۹۶۴۸	

		سطح						
		خرابی درز انقطاع	کم	۱۲	مترطول	۳۰۰	۰/۰۴	۱۴۴
		آسیب تکیه گاه	کم	۲,۵	مترمکعب	۴۵۰	۰/۲۴	۲۷۰
		پوسیده شدن	زیاد	۱۲۰	مترمربع	۲۷۰	۰/۰۸	۲۵۹۲
۹	میارکلا	قلوه شدگی	متوسط	۲۸	مترمربع	۴۵۰	۰/۲	۲۵۲۰
		ترک خوردگی	متوسط	۱۲	مترطول	۱۲۰	۰/۲	۲۸۸
		فرسودگی سطح	زیاد	۱۸۰	مترمربع	۶۷۰	۰/۰۴	۲۶۸۰
		خرابی درز انقطاع	زیاد	۴۰	مترطول	۳۸۰۰۰	۰/۱	۱۵۲۰۰۰
		آسیب تکیه گاه	متوسط	۵	مترمکعب	۹۴۰۰	۰/۲	۹۴۰۰
		پوسیده شدن	متوسط	۱۰۰	مترطول	۲۷۰	۰/۰۵	۱۳۵۰
		فرسایش فونداسیون	متوسط	۵	مترمکعب	۸۵۰۰	۰/۱	۴۲۵۰
		خرابی زهکش	زیاد	۱۲	عدد	۲۵۰	۰/۱	۳۰۰

پس از شناسایی خرابی‌های موجود در هر یک از پل‌ها و اندازه‌گیری میزان خرابی‌ها، در ادامه روش تعمیر هر یک از این خرابی‌ها ارائه و در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- روش های تعمیر پل‌ها

ردیف	نوع تعمیر	نوع خرابی
۱	پنج اقدام (شستشو و پاکسازی سطح ، ترمیم بتن، ترفیع قرنیز، اجرای لایروبی، تفکیک بالادست روی پل)	قلوه شدگی، فرسایش فونداسیون، فرسودگی سطح، خرابی درز انقطاع، آسیب تکیه گاه، خرابی زهکش، آسیب نرده
۲	ترمیم ترک	ترک خوردگی
۳	دو اقدام (سند بلاست و رنگ آمیزی)	پوسیده شدن

براساس نوع تعمیرات تعیین شده در جدول ۶، مقادیر پارامترهای مرتبط با سطح عملکرد پل‌ها در جدول ۷ گزارش شده است.

جدول ۷- پارامترهای نگهداری و تعمیرات

دسته خرابی ها (انواع تعمیرات) پارامترهای مسئله		نوع اول	نوع دوم	نوع سوم
		پنج اقدام	ترمیم ترک	دو اقدام
میزان بهبود عملکرد	γ	۱	۱/۵	۲
مدت زمان به تاخیر افتادن خرابی (سال)	T_D	۵	۱۰	۱۵
نرخ خرابی ($\frac{1}{\text{سال}}$)	α	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۵
نرخ خرابی در طول اثر ($\frac{1}{\text{سال}}$)	$\alpha-\delta$	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱
زمان شروع خرابی اولیه (سال)	T_I	۱۰	۱۵	۲۰
مدت زمان اثر تعمیر	$T_{PD}:\beta_1$	$0.8P_{it}$		
زمان شروع اولین برنامه تعمیر (سال)	$T_{PI}:\beta_2$	$0.7P_0$		
شاخص اولیه	P_0	۳/۵		

۴- نتایج محاسباتی

۴-۱- طراحی الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه (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 بهینه-سازی انبوه ذرات چند هدفه برای این تحقیق استفاده شده است. بعد از کدنویسی براساس مدل ریاضی تعریف شده در نرم‌افزار متلب و با استفاده از الگوریتم مورد نظر، خروجی‌های دریافت شده به صورت زیر شرح داده شده است. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات پیشنهادی بصورت جدول ۸ در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۸- مقادیر پارامترهای الگوریتم پیشنهادی

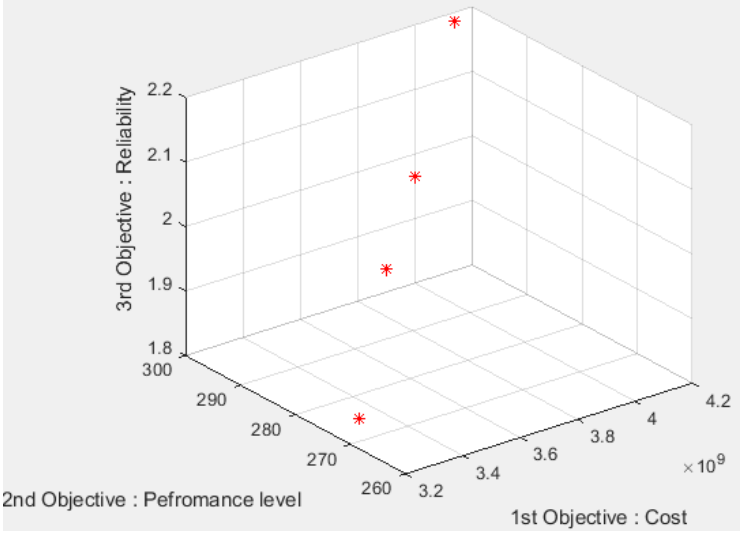
مولفه	نماد	مقدار
تعداد جمعیت اولیه	Nvar	۱۰۰
ضریب خرد فردی	c_1	۲
ضریب خرد جمعی	c_2	۲
تعداد تکرار	Maxiter	۵۰

در این راستا مسئله پیشنهادی و ورودی‌های مسئله در الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه پیاده‌سازی شده و حل گردیده است. مسئله فوق در نرم‌افزار MATLAB 2014b پیاده‌سازی شده و خروجی‌های زیر بدست آمده است. در مرحله اول از آنجایی که مسئله پیشنهادی چند هدفه بوده، جواب‌های پارتو بدست آمده در جدول ۹ گزارش شده است.

جدول ۹- جواب‌های پارتو بدست آمده از حل مسئله

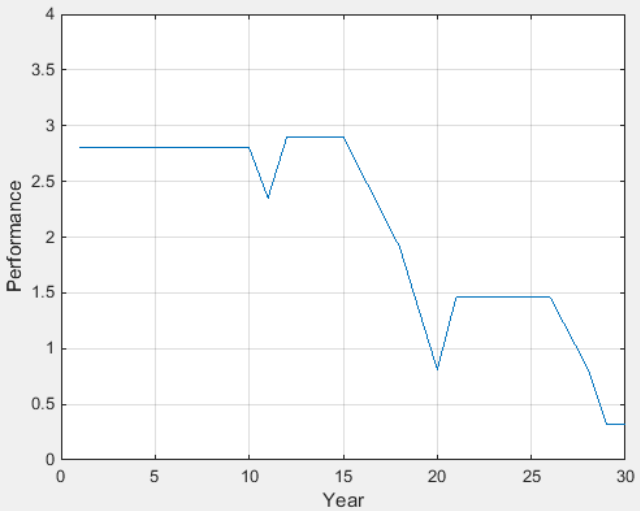
شماره جواب	هزینه (تومان)	مجموع عملکرد	قابلیت اطمینان
۱	۳۲۱۸۶۵۱۵۰۰	۲۶۹/۴	۱/۸۴
۲	۳۴۹۲۷۴۰۰۰۰	۲۷۸/۸	۱/۹۹
۳	۳۷۲۴۵۶۰۰۰۰	۲۸۵/۶	۲/۰۷
۴	۴۱۰۲۷۴۵۰۰۰	۲۹۸/۳	۲/۲

همانطورکه در جدول ۹ نشان داده شده است، چهار جواب پارتو بدست آمده که هر یک از آنها دارای میزان هزینه، مجموع عملکرد و قابلیت اطمینان متفاوتی هستند، طوریکه تصمیم‌گیرنده می‌تواند براساس اولویت خود یکی از جواب‌ها را برگزیند. شکل ۴ نیز جواب‌های پارتو بدست آمده را نمایش می‌دهد.



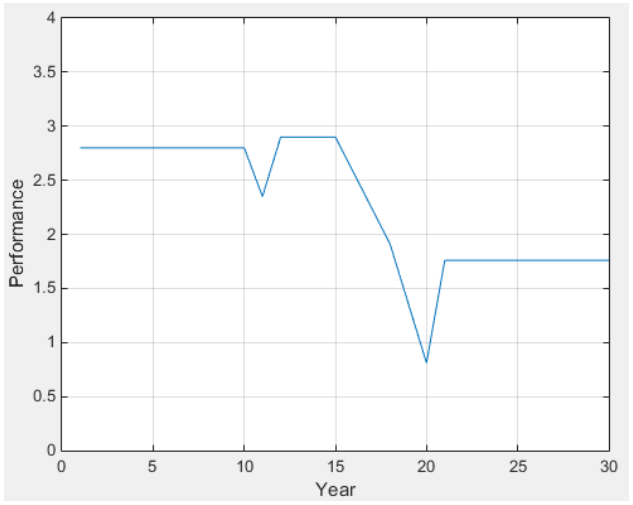
شکل ۴- جواب‌های پارتو بدست آمده

شکل ۵، نحوه تغییر عملکرد سیستم نسبت به زمان را در یک دوره سی ساله نشان می‌دهد. با گذشت عمر پل و استفاده مستمر از آن، پل تحت خرابی‌هایی در مدت طول عمر خود قرار می‌گیرد که باعث کاهش شاخص اولیه عملکرد آن می‌شود که بلافاصله با انجام دسته تعمیرات به موقع، از کاهش این سطح عملکرد به مرور زمان کاسته می‌شود و پل به یک سطح عملکردی قابل قبول می‌رسد. روند تغییر سطح عملکرد با توجه به بهترین زمان نگهداری و تعمیرات برای پل شماره ۱ در شکل ۵ نشان داده شده است. این سیستم با شاخص عملکرد اولیه برابر ۲/۸ شروع شده و طی گذشت زمان با هر بار خرابی، وضعیت عملکردی آن تغییر کرده است.

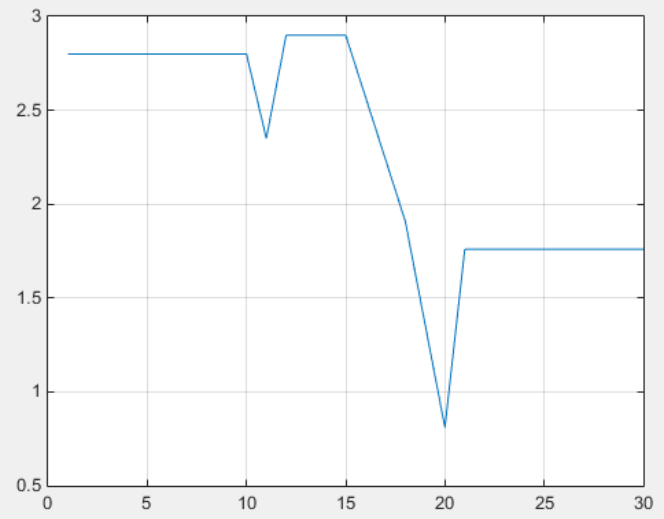


شکل ۵- نحوه تغییر عملکرد سیستم پل شماره ۱

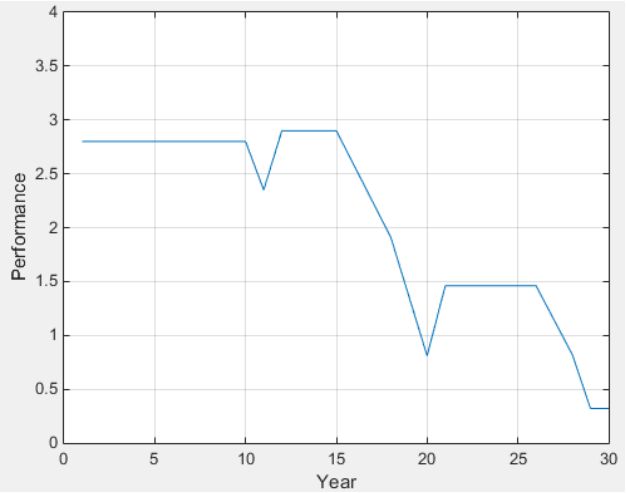
با توجه به شکل ۵ شاخص عملکرد اولیه سیستم برابر ۲/۸ است، که این مقدار اولیه از سال اول عمر پل تا سال دهم با همین مقدار ثابت مانده است، از سال یازدهم با پیدایش یک نوع از انواع خرابی‌هایی که در این تحقیق از آن یاد شده و مرتبط با پل‌های مورد نظر است، میزان سطح عملکردی از این مقدار اولیه کم‌تر شده تا در نهایت در سال یازدهم به مقداری برابر ۲/۳ رسیده است. طبق همین شکل که حاصل نتایج پارامترهای ورودی و شرایط پل مورد نظر است و با پایین آمدن سطح عملکردی سیستم از حد مجاز، پل مورد نظر به تعمیر نیاز پیدا می‌کند که این تعمیر با بکارگیری یکی از انواع دسته‌های تعمیراتی مرتبط با خرابی پیش آمده انجام می‌گیرد. انجام این تعمیر، منجر به افزایش میزان سطح عملکردی به عددی برابر ۲/۹ رسیده است. این مقدار شاخص تا سال پانزدهم ثابت مانده و از آن سال به بعد دوباره روند کاهشی پیدا کرده تا این که در سال هجدهم به مقداری ۰/۸ رسیده است و در نهایت تعمیری مختص خرابی جدید به وجود آمده در پل نیاز می‌شود، انجام این تعمیر منجر به افزایش میزان شاخص به عدد ۱/۴۵ می‌شود. تا پایان سال بیست و هفتم، میزان سطح عملکرد تغییری نداشته تا این که از سال بیست و هشتم به بعد روند کاهشی میزان شاخص عملکرد آغاز می‌شود و تا سال بیست و نهم ادامه پیدا می‌کند و در سال سی ام در مقدار ۰/۷ ثابت می‌شود. همچنین نحوه تغییر عملکرد سیستم برای پل‌های ۲ تا ۵ در شکل ۶ الی ۹ نشان داده شده است.



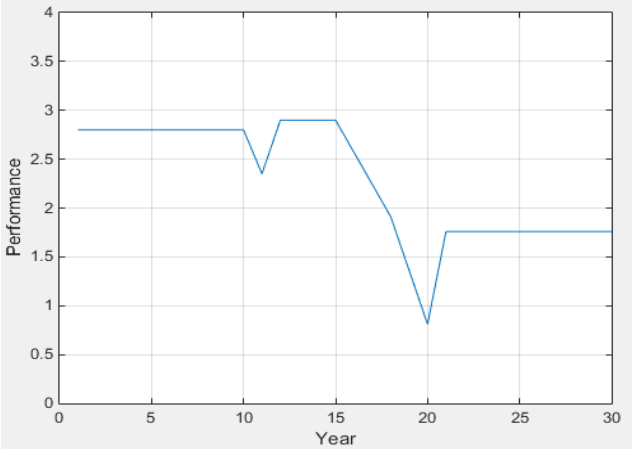
شکل ۶- نحوه تغییر عملکرد سیستم پل شماره ۲



شکل ۷- نحوه تغییر عملکرد سیستم پل شماره ۳



شکل ۸- نحوه تغییر عملکرد سیستم پل شماره ۴



شکل ۹- نحوه تغییر عملکرد سیستم پل شماره ۵

۴-۲- تحلیل حساسیت

در این بخش بر روی پارامترهای مهم مسئله تحلیل حساسیتی جهت بررسی مدل پیشنهادی انجام می‌گیرد.

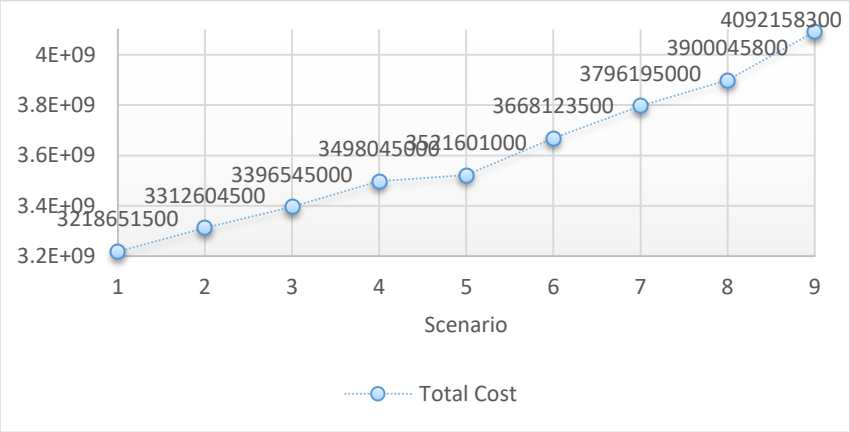
۴-۲-۱- تحلیل حساسیت پارامتر نرخ خرابی (α)

این حساسیت با تغییر مقدار پارامتر α که همان نرخ خرابی است انجام شده است. مقدار اولیه نرخ خرابی برای سه نوع خرابی که براساس آن سه دسته تعمیراتی در نظر گرفته شده، به این صورت بوده که برای خرابی نوع یک برابر مقدار ۰,۱۵ ، برای خرابی نوع دو برابر ۰,۱ و برای خرابی نوع سه برابر ۰/۰۵ بوده است. همانطورکه در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، برای شروع تحلیل حساسیت، ابتدا نه سناریو در نظر گرفته شده که در آن نرخ خرابی از مقدار اولیه با تغییرات به ترتیب (۰/۰۵- ۰/۱ -۰/۲) روبرو شده که در سه سناریو آن، نرخ خرابی آن‌ها با تغییر ۰/۰۵ و سه سناریو با تغییر نرخ خرابی ۰/۱ و در دو سناریو با تغییر ۰/۲ مواجه شدند. این روند ترتیب افزایش نرخ خرابی و تعداد سناریوهای مواجه شده با این تغییر، برای هر سه دسته خرابی یکسان بوده است. سپس در ادامه تعداد جواب‌های پارتو برای هر سناریو به دست آمده است که از میان آنها فقط دو جواب مدنظر قرار گرفته شد، جواب با کمترین هزینه نگهداری و تعمیرات و جواب با بیشترین سطح عملکرد و قابلیت اطمینان. به طور مثال در سناریو شماره ۱، مقدار نرخ خرابی برای حالت خرابی نوع یک برابر مقدار ۰/۱۵ و برای خرابی نوع دو برابر ۰/۱ و برای خرابی نوع سه برابر ۰/۰۵ است. این نتایج در سناریوهای بعدی نیز به این صورت تحلیل می‌شود که در ادامه این نتایج برای این نه سناریو در جدول ۱۰ آورده شده است.

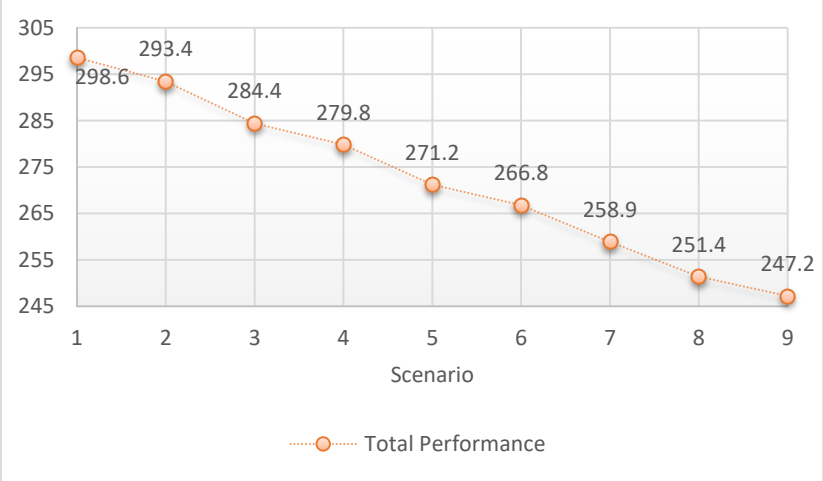
جدول ۱۰- تحلیل حساسیت پارامتر نرخ خرابی (α)

سناریو	خرابی نوع ۱	خرابی نوع ۲	خرابی نوع ۳	مجموع هزینه	مجموع عملکرد	قابلیت اطمینان
۱	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۵	۳۲۱۸۶۵۱۵۰۰	۲۸۸/۴	۲/۱۵
				۳۲۲۴۳۲۴۰۰۰	۲۹۸/۶	۲/۲
۲	۰/۲	۰/۱۵	۰/۱	۳۳۱۲۶۰۴۵۰۰	۲۸۲/۶	۲/۱
				۳۳۲۵۸۱۴۰۰۰	۲۹۳/۴	۲/۱۴
۳	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۵	۳۳۹۶۵۴۵۰۰۰	۲۷۳/۵	۲/۰۴
				۳۴۱۲۸۷۶۵۰۰	۲۸۴/۴	۲/۰۹
۴	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲	۳۴۹۸۰۴۵۰۰۰	۲۶۴/۶	۱/۹۷
				۳۵۰۹۸۴۷۵۰۰	۲۷۹/۸	۲/۰۱
۵	۰/۴	۰/۳۵	۰/۳	۳۵۲۱۶۰۱۰۰۰	۲۵۵/۳	۱/۸۸
				۳۵۹۵۸۴۷۵۰۰	۲۷۱/۲	۱/۹۶
۶	۰/۵	۰/۴۵	۰/۴	۳۶۶۸۱۲۳۵۰۰	۲۴۸/۹	۱/۸۱
				۳۷۰۷۴۱۳۰۰۰	۲۶۶/۸	۱/۸۹
۷	۰/۶	۰/۵۵	۰/۵	۳۷۹۶۱۹۵۰۰۰	۲۴۰/۷	۱/۷۶
				۳۸۱۳۴۸۶۵۰۰	۲۵۸/۹	۱/۸۲
۸	۰/۸	۰/۷۵	۰/۷	۳۹۰۰۰۴۵۸۰۰	۲۳۳/۶	۱/۷
				۳۹۲۷۴۵۱۵۰۰	۲۵۱/۴	۱/۷۷
۹	۱	۰/۹۵	۰/۹	۴۰۹۲۱۵۸۳۰۰	۲۲۶/۴	۱/۶۳
				۴۱۲۶۹۴۸۵۰۰	۲۴۷/۲	۱/۷۱

همانطور که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، تعداد جواب‌های پارتو بدست آمده، حدود بالا و پایین مجموع هزینه‌ها و مجموع عملکرد سیستم بازای هر سناریو ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که بازای هر سناریو، از میان جواب‌های پارتو بدست آمده، دو جواب با کمترین هزینه و بیشترین عملکرد و قابلیت اطمینان گزارش شده است. شکل ۱۰ الی ۱۲ به ترتیب روند تغییرات مجموع هزینه‌ها، عملکرد سیستم و قابلیت اطمینان را بازای جواب‌های پارتو بدست آمده نشان می‌دهد.

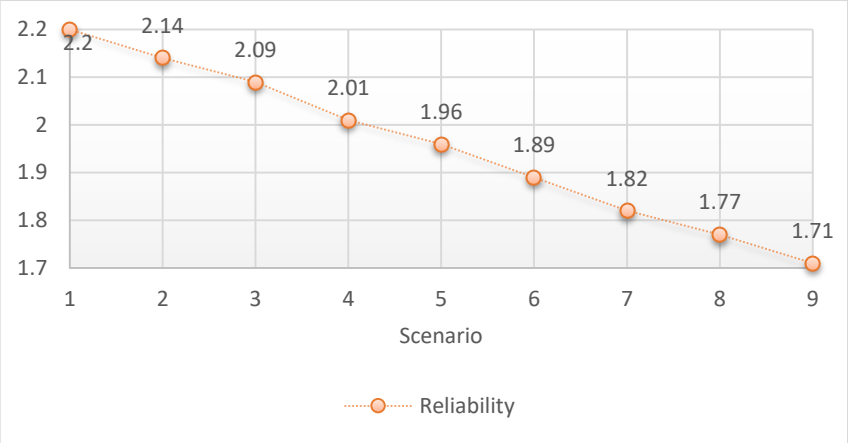


شکل ۱۰- مجموع هزینه‌ها برای هر سناریو بازای حد پایین هزینه



شکل ۱۱- مجموع عملکرد سیستم برای هر سناریو بازای حد بالای سطح عملکرد

همانطورکه در شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌گردد، با افزایش شماره سناریو که بیانگر افزایش نرخ خرابی پل‌ها می‌باشد، میزان هزینه‌ها روند افزایشی و مجموع عملکرد سیستم روند کاهشی داشته است که امری طبیعی و درست بنظر می‌رسد. همچنین روند تغییر میزان قابلیت اطمینان سیستم با افزایش نرخ خرابی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- روند تغییر قابلیت اطمینان

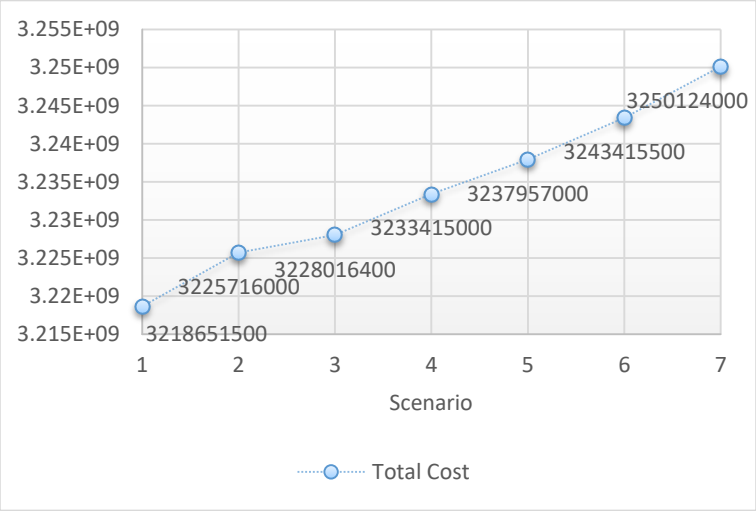
۴-۲-۲- تحلیل حساسیت پارامتر نرخ خرابی در طول اثر $(\alpha - \delta)$

در این بخش حساسیت توابع هدف نسبت به تغییر مقدار نرخ خرابی در طول اثر $(\alpha - \delta)$ تحلیل می‌شود. نرخ خرابی در طول اثر نیز برای هر سه دسته خرابی دارای مقدار اولیه بوده که این مقدار برای خرابی نوع یک برابر مقدار ۰/۰۳ ، برای خرابی نوع دو برابر ۰/۰۲ و برای خرابی نوع سه ۰/۰۱ بوده است. برای شروع کار ابتدا هفت سناریو در نظر گرفته شده که در آن تغییر مقدار اولیه نرخ خرابی در طول اثر نسبت به مقدار اولیه خود به ترتیب برای یک سناریو برابر ۰/۰۲ ، برای سه سناریو برابر ۰/۰۵ ، برای یک سناریو برابر ۰/۱ و برای یک سناریو دیگر نیز برابر ۰/۲ بوده است. این روند تغییر پارامتر $\alpha - \delta$ برای هر سه دسته از انواع خرابی‌ها یکسان بوده است. سپس برای هر سناریو تعدادی جواب پارتو بدست آمده که جواب با کمترین هزینه و بیشترین عملکرد ثبت شده است. این روند برای هر هفت سناریو اجرا می‌شود. جدول ۱۱ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامتر نرخ خرابی در طول اثر را نشان می‌دهد.

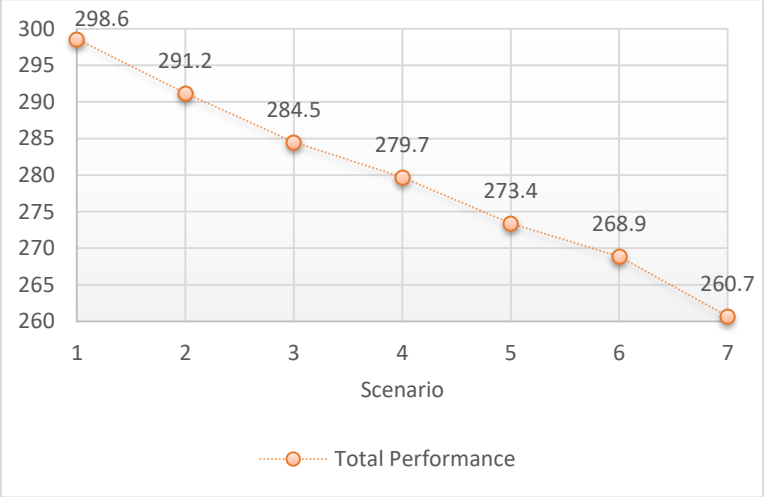
جدول ۱۱- تحلیل حساسیت پارامتر نرخ خرابی در طول اثر $(\alpha - \delta)$

سناریو	خرابی نوع۱	خرابی نوع ۲	خرابی نوع ۳	مجموع هزینه	مجموع عملکرد	قابلیت اطمینان
۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۳۲۱۸۶۵۱۵۰۰	۲۸۸/۴	۲/۱۵
				۳۲۲۴۳۲۴۰۰۰	۲۹۸/۶	۲/۲
۲	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۳	۳۲۲۵۷۱۶۰۰۰	۲۸۰/۱	۲/۱۱
				۳۲۲۶۱۰۸۵۰۰	۲۹۱/۲	۲/۱۶
۳	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۸	۳۲۲۸۰۱۶۴۰۰	۲۷۵/۶	۲/۰۵
				۳۲۳۱۹۲۱۵۰۰	۲۸۴/۵	۲/۱
۴	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۳	۳۲۳۳۴۱۵۰۰۰	۲۷۰/۲	۲/۰۱
				۳۲۳۵۶۱۸۵۰۰	۲۹۷/۷	۲/۰۴
۵	۰/۲	۰/۱۹	۰/۱۸	۳۲۳۷۹۵۷۰۰۰	۲۶۶/۴	۱/۹۷
				۳۲۳۹۷۴۸۵۰۰	۲۷۳/۴	۱/۹۹
۶	۰/۳	۰/۲۹	۰/۲۸	۳۲۴۳۴۱۵۵۰۰	۲۶۱/۶	۱/۹۱
				۳۲۴۵۸۵۸۰۰۰	۲۶۸/۹	۱/۹۴
۷	۰/۵	۰/۴۹	۰/۴۸	۳۲۵۰۱۲۴۰۰۰	۲۵۷/۳	۱/۸۶
				۳۲۵۵۹۷۴۵۰۰	۲۶۰/۷	۱/۸۹

همانطور که در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود، تعداد جواب‌های پارتو بدست آمده، حدود بالا و پایین مجموع هزینه‌ها و مجموع عملکرد سیستم بازای هر سناریو ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که بازای هر سناریو، از میان جواب‌های پارتو بدست آمده، دو جواب با کمترین هزینه و بیشترین عملکرد و قابلیت اطمینان گزارش شده است. شکل ۱۳ الی ۱۵ به ترتیب روند تغییرات مجموع هزینه‌ها، عملکرد سیستم و قابلیت اطمینان را بازای جواب‌های پارتو بدست آمده نشان می‌دهد.

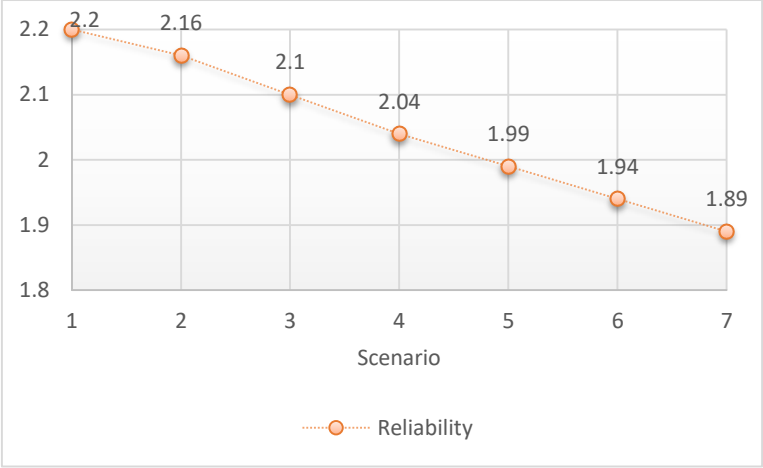


شکل ۱۳- مجموع هزینه‌ها برای هر سناریو بازای حد پایین هزینه



شکل ۱۴- مجموع عملکرد سیستم برای هر سناریو بازای حد بالای سطح عملکرد

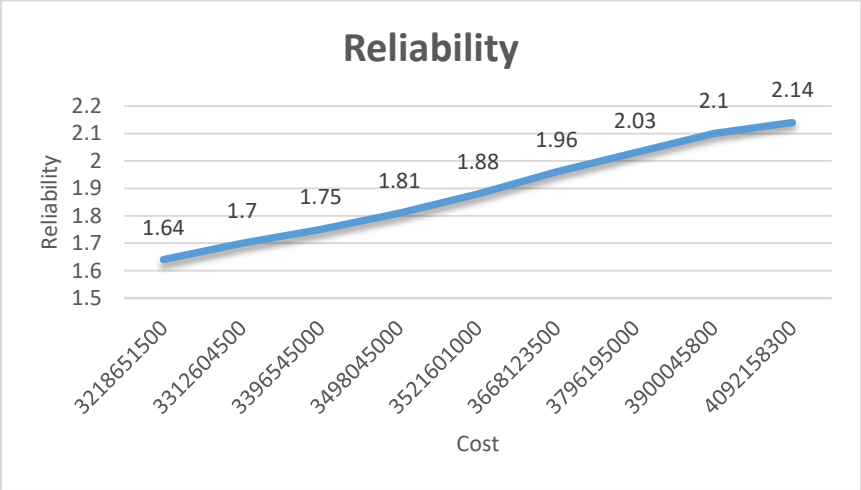
همانطورکه در شکل ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌گردد، با افزایش شماره سناریو که بیانگر افزایش نرخ خرابی در طول اثر می‌باشد، میزان هزینه‌ها روند افزایشی و مجموع عملکرد سیستم روند کاهشی داشته است که امری طبیعی و درست بنظر می‌رسد. همچنین روند تغییر میزان قابلیت اطمینان سیستم با افزایش نرخ خرابی در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵- روند تغییر قابلیت اطمینان

۴-۲-۳- تحلیل حساسیت قابلیت اطمینان نسبت به هزینه

با توجه به خروجی‌های بدست آمده در این بخش روند تغییرات میزان قابلیت اطمینان شبکه نسبت به مجموع هزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور شکل ۱۶ روند تغییر قابلیت اطمینان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- روند تغییر قابلیت اطمینان نسبت به هزینه

۴-۲-۴- تحلیل حساسیت سطح بودجه

همچنین به منظور تحلیل بیشتر مدل پیشنهادی سطوح بودجه مختلفی مطابق جدول ۱۲ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۲- سطوح مختلف بودجه

شماره مسئله	۱	۲	۳	۴
سطح بودجه (میلیارد)	۳	۳/۵	۴	۴/۵

همانطورکه مشاهده می‌شود میزان سطح بودجه از ۳ تا ۴ میلیارد تغییر کرده تا اثر سطح بودجه بر اهداف مسئله مورد بررسی قرار گیرد. مسائل نمونه بازای سطوح مختلف بودجه توسط الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات چند هدفه پیشنهادی حل گردیده و در ادامه برای

هر یک از سطوح بودجه یک جواب با کمترین هزینه و بیشترین سطح عملکرد در جدول ۱۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۱۳ می توان دریافت که با افزایش سطح بودجه، مجموع هزینه‌ها و در نتیجه مجموع سطح عملکرد سیستم افزایش یافته است.

جدول ۱۳- حل مسئله نمونه بازای سطوح بودجه

سطح بودجه	هزینه کل	مجموع عملکرد
۳	۳۲۱۸۶۵۱۵۰۰	۲۶۹/۴
	۳۳۶۲۱۴۵۰۰۰	۲۷۲/۳
۳,۵	۳۳۹۹۸۷۵۰۰۰	۲۷۴/۶
	۳۴۶۶۳۰۱۰۰۰	۲۷۷/۹
۴	۳۸۰۱۴۵۰۰۰۰	۲۸۰/۸
	۳۸۹۷۶۴۲۵۰۰	۲۹۱/۲
۴,۵	۴۱۰۳۷۴۵۰۰۰	۲۹۸/۳
	۴۳۱۴۸۶۰۰۰۰	۳۰۸/۶

۵- جمع بندی

در این تحقیق یک مدل برنامه ریزی ریاضی عدد صحیح برای مسئله بهینه‌سازی دوره نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن سه هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها، حداکثرسازی سطح عملکرد و قابلیت اطمینان سیستم ارائه گردید. در ادامه مطالعه موردی شامل دو مسیر بین دو شهر بابلسر و ساری مد نظر قرار گرفته و پل‌های موجود در مسیر شناسایی گردیدند. سپس نوع خرابی و میزان هر یک از آنها محاسبه گردید. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه بهترین برنامه نگهداری و تعمیرات برای آنها بدست آمده است. به منظور ارزیابی بیشتر مسئله پیشنهادی، تحلیل حساسیتی بر روی پارامتر نرخ خرابی پل انجام گرفته است. همچنین نحوه تغییر قابلیت اطمینان سیستم نسبت به هزینه‌های نگهداری و تعمیرات بررسی شده است. همچنین پس از انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای نرخ خرابی و نرخ خرابی در طول اثر مشاهده شده است که با افزایش شماره سناریو در دو حالت که بیانگر افزایش نرخ خرابی و نرخ خرابی در طول اثر می‌باشد، میزان هزینه‌ها روند افزایشی و مجموع عملکرد سیستم روند کاهشی داشته است که امری طبیعی و درست بنظر می‌رسد. پس از بررسی و تحلیل مقادیر به دست آمده ، نکات و نتایجی به شرح ذیل بیان می‌گردد:

۱- حداقل هزینه نگهداری و تعمیرات با توجه به بهترین برنامه زمانی تعمیرات بدست آمده است.
۲- تعمیرات انجام شده در بهترین دوره منجر به حداکثرسازی سطح عملکرد پل‌ها و همچنین قابلیت اطمینان آنها شده است.
۳- جواب‌های پارتو مختلفی بدست آمده است، طوریکه تصمیم‌گیران می‌توانند از میان جواب‌های پارتو بدست آمده، جوابی را برگزینند که در اولویت آنها قرار دارد.
۴- کمترین هزینه ممکن نگهداری و تعمیرات برابر ۳۲۱۸۶۵۱۵۰۰ برای مجموع پل‌ها بوده است.
۵- بیشترین سطح عملکرد و میزان قابلیت اطمینان به ترتیب برابر ۲۹۸/۳ و ۲/۲ بوده است.
۶- با افزایش نرخ خرابی پل‌ها، میزان هزینه‌ها روند افزایشی و مجموع عملکرد سیستم روند کاهشی داشته است. بیشترین هزینه مربوط به سناریو ۹ با مقدار ۴۱۲۶۹۴۸۵۰۰ و بیشترین سطح عملکرد مربوط به سناریو یک با مقدار ۲۹۸/۶ می‌باشد. همچنین حداکثر قابلیت اطمینان سیستم نیز برابر ۲/۲ برای جواب شماره ۱ بوده است.

همچنین با توجه به مطالعه انجام شده، پیشنهاداتی برای کارهای آتی نظیر حل مدل ارائه شده در این تحقیق با استفاده از روش‌های فراابتکاری دیگر، در نظر گرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای مسئله به منظور واقعی‌تر نمودن شرایط مدل و در نظر گرفتن عامل ریسک در حین انجام تعمیرات پیشنهاد می‌شود.

مراجع

[1]. Joghataee, A., " Guide to the principles of technical management of bridge maintenance", First Edition, Sharif University of Technology Scientific Research Institute (In Persian)

[2]. Ryall M. J (2010) Bridge Management. 2nd ed., Published by Elsevier Ltd. PP. 1-15, 361-365

[3]. . Joghataee, A., Alikhani, A., " Maintenance of bridges based on Ashto and other sources", First Edition, Sharif University of Technology Scientific Research Institute (In Persian)

[4]. Sergio Valenzuela , Hernan de Solminihac , Tomas Echaveguren, " Proposal of an Integrated Index for Prioritization of Bridge Maintenance", ASCE, Journal of Bridge Engineering, Vol. 15, No. 3, 337- 343, (2010).

[5]. Paolo Bocchini, Dan M. Frangopol, " A probabilistic computational framework for bridge network optimal maintenance scheduling", Elsevier BV, Journal of Reliability Engineering & System Safety, Vol. 96, No. 2, 332- 349, 2011

[6]. Jinsong Zhu, Boqi Liu, " Performance Life Cost-Based Maintenance Strategy Optimization for Reinforced Concrete Girder Bridges", ASCE, J. Bridge Eng, Vol. 18, No. 2, 172- 178, 2013 .

[7]. Giorgio Barone, Dan M. Frangopol, Mohamed Soliman, " Optimization of Life-Cycle Maintenance of Deteriorating Bridges with Respect to Expected Annual System Failure Rate and Expected Cumulative Cost", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 140, No. 2, 04013043, (2014).

[8]. Xiaofei Hu, Carlos Daganzo, Samer Madanat, " A reliability-based optimization scheme for maintenance management in large-scale bridge networks", Elsevier BV, Transportation Research Part C: Emerging, Vol. 55, 166- 178, 2015

[9]. Weili Zhang, Naiyu Wang, (2017), " Bridge network maintenance prioritization under budget constraint", Structural Safety, Volume 67, July 2017, Pages 96-104

[10]. Vera Vujović, (2018), " The Mala Rijeka Bridge - Specificity of maintenance", Procedia Structural Integrity, Volume 13, Pages 1901-1907

[11]. Hui-Bing Xie, Wen-Jie Wu, Yuan-Feng Wang, (2018), " Life-time reliability based optimization of bridge maintenance strategy considering LCA and LCC", Journal of Cleaner Production" Volume 176, 1 March 2018, Pages 36-45.

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

[13]. Amery, M., Yeganeh B ahman., (2009), " Presenting a model for optimizing the maintenance network in the bridge management system", 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz, Shiraz University (In Persian)

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

[15]. Taheri Amiri, M. J., Haghighi, F., Rahmani Firoozjaee, A., Hematian, M., Javaheri Barforooshi, M., (2018), 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), 199-211 (In Persian)

[16]. Taheri Amiri, M., Abdollahzadeh, G., Haghighi, F., Neves, J. (2019). "Bridges Risk Analysis in View of Repair and Maintenance by Multi Criteria Decision Making Method (Case Study: Babolsar Bridges)", International Journal of Transportation Engineering, 7(1), 91-114. doi: 10.22119/ijte.2018.118629.1390

[16]. Nili, M.H., Taghaddos, H., Zahraie, B., (2020), "Integrating discrete event simulation and genetic algorithm optimization for bridge maintenance planning",Automation in Construction, Vol 122, 103513