

تعیین دوره بهینه تعمیر و نگهداری به منظور حداقل سازی

هزینه چرخه عمر در پل های راه آهن

مقاله علمی - پژوهشی

محمدجواد طاهری امیری، استادیار، گروه عمران، موسسه آموزش عالی پردیسان، مازندران، ایران

میلاذ همتیان، دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، مازندران، ایران

فرشیدرضا حقیقی*، دانشیار، گروه عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

معصومه رضاییان، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، موسسه آموزش عالی طبری بابل، بابل، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Haghghi@nit.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

صفحه ۲۳۵-۲۵۴

چکیده

پل‌ها به عنوان پیوندهای مهم ارتباطی تمامی شبکه‌های جاده‌ای و خطوط راه آهن به حساب می‌آیند که سرمایه هنگفتی برای ساخت آنها مورد نیاز است. علاوه بر این، پل‌ها به عنوان نقاط مهم شریان‌های حیاتی به حساب می‌آیند. اگر پل‌ها به دلیل سن زیاد، فرسودگی، بار زیاد، شرایط آب و هوایی، بلایای طبیعی و غیره از بین بروند، کارهای تعمیراتی، بسیار پر هزینه‌تر از فعالیت‌های مربوط به حفظ و نگهداری از آنهاست. بودجه در دسترس برای بازسازی و تعمیر و نگهداری، معمولاً برای حفظ وضعیت سیستم به حالت ثابت در تمام طول عمر پل کافی نیست. با توجه به تعداد زیاد پل‌های موجود و هزینه‌های زیاد تعمیر و نگهداری، امکان تعمیر و نگهداری همزمان همه پل‌ها وجود ندارد. همچنین به علت تخصیص بودجه‌های محدود در امر تعمیر و نگهداری، تعیین بهترین دوره تعمیر و نگهداری بهینه برای هر پل براساس نقص‌های موجود و اثربخشی دوره انتخابی بسیار مهم است. در این تحقیق با استفاده از محاسبه هزینه چرخه عمر پل‌های راه آهن به بررسی در مورد دوره‌های تعمیر و نگهداری بهینه پرداخته شده و زمان مناسب تعمیرات برای پل‌ها با توجه به کمترین میزان هزینه چرخه عمر در پلهای راه آهن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات چند هدفه بهینه‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: پل، خطوط راه آهن، هزینه چرخه عمر، دوره بهینه تعمیر و نگهداری، الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات

چندهدفه

۱- مقدمه

خسارت‌های موجود در پل، همراه با افزایش بارهای ترافیکی و شرایط نامالایم محیطی و موقعیت قرارگیری پل‌ها، بیشتر شده که این خود باعث بدتر شدن سریع اجزای سازه پل و ریل‌ها می‌شود که نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری فوری دارد. ارزیابی مناسب‌ترین دوره تعمیر و نگهداری برای پل‌های راه آهن و همچنین اقتصادی‌ترین راه‌حل، یک مساله بزرگ و پیچیده است که باید در آن همزمان چندین پارامتر را در نظر

پل‌های راه آهن، عناصر کلیدی در سیستم‌های حمل و نقل هستند (Chassiakos et al, 2005) سازه‌های پل اگر در معرض شرایط محیطی مهاجم قرار بگیرند، دچار فرسودگی و خرابی می‌شوند (Val and Stewart, 2005). هر دپارتمان حمل و نقل، با تعمیر و نگهداری پل با بودجه محدود مواجه هستند (TaeHoon and Hastak, 2007). یک دلیل اصلی برای کمبودهای پل، تعمیر و نگهداری ناکافی است.

علت تخصیص بودجه‌های محدود در امر تعمیر و نگهداری، تعیین بهترین دوره تعمیر و نگهداری بهینه برای هر پل براساس نقص‌های موجود و اثربخشی دوره انتخابی بسیار مهم است. پل‌ها نیز مانند هر سازه دیگر 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 آنجا که جزء سازه‌های پرهزینه و حساس محسوب می‌شوند؛ کوتاهی در نگهداری آن‌ها در دوران بهره‌برداری، اثرات مخربی به دنبال خواهد داشت (Rayal, 2012).

ضرورت تحلیل هزینه چرخه عمر در راه‌آهن به عنوان یک ابزار پشتیبانی از تصمیم و همچنین ابزار اصلی مدیریت دارایی‌های شبکه، تخصیص منابع و تضمین دستیابی به سطوح از پیش تعریف شده عملکرد به لحاظ کارایی و در دسترس بودن خواهد بود. در این تحقیق با استفاده از محاسبه هزینه چرخه عمر پل‌های راه‌آهن به بررسی در مورد دوره‌های تعمیر و نگهداری بهینه پرداخته شده و زمان مناسب تعمیرات برای پل‌ها با توجه به کمترین میزان هزینه چرخه عمر در پل‌های راه‌آهن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات چندهدفه بهینه‌سازی شده است.

۲- پیشینه تحقیق

کونگ و فرانگوپل (۲۰۰۳) در یک تحقیق، فرآیندی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به منظور برنامه‌ریزی بهینه تعمیر و نگهداری در طول چرخه حیات پل‌های رو به فرسایش را ارائه نمودند و در عین حال، شرایط، ایمنی و کل هزینه تعمیر و نگهداری در طول چرخه حیات پروژه را مورد ملاحظه قرار دادند. با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های طبیعی، فرآیند فرسایش و عدم داده‌های عملی کافی برای تضمین مدل‌های پیچیده ریاضیاتی، استفاده از مدل‌های ساده‌تری که می‌توانند خصوصیات اصلی فرسایش را نشان دهند، مفید به نظر می‌رسید. از اینرو، از یک مدل محاسباتی چند خطی برای توصیف فرآیند فرسایش بدون هیچگونه تعمیر و نگهداری و یا مداخله در آنها، استفاده کردند. پارامترهای مورد استفاده در این مدل زمانی که برای توزیعات احتمالی بکار گرفته می‌شوند، به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته می‌شوند که براساس آنها، شبیه‌سازی‌های مونت کارلو به منظور پیش‌بینی سطح احتمال شاخص‌های عملکرد منتخب و هزینه تعمیر و نگهداری در طول چرخه حیات، انجام می‌گیرد (Kong and Frangopol, 2003). رابرت و

گرفت (Chassiakos et al, 2005). در سالهای اخیر، تعدادی از سیستم‌های مدیریتی با هدف اولویت‌بندی تعمیر و نگهداری ضروری توسعه داده شده‌اند که می‌توان در این سیستم‌ها استراتژی تعمیر و نگهداری بهینه سطح شبکه را، به وسیله‌ی ثبت وضعیت در حال حاضر سازه و پس از آن با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی خرابی مربوط به سیستم‌های تعمیر و نگهداری تعیین کرد (TaeHoon and Hastak, 2007). کلیه هزینه‌های مربوط به چرخه عمر، مربوط به طراحی، ساخت، تعمیر و نگهداری و همچنین هزینه‌های مصرف‌کنندگان (کاربران) در طول خدمت سازه است (Chassiakos et al, 2005). یکی از مباحث مهم در طراحی سازه، طول عمر بهره‌برداری آن می‌باشد. مسلماً برای یک دوره بهره‌برداری کوتاه مدت، صرف هزینه‌های زیاد جهت عملیات ساخت مقرون به صرفه نبوده و باعث اتلاف سرمایه مالکان خواهد شد. همچنین اگر سازه‌ای برای دوره‌های طولانی مدت بهره‌برداری طراحی شود، با در نظر نگرفتن شرایط زیست محیطی حاکم بر آن و نیز عدم توجه به مشخصات دراز مدت مصالح، باعث بروز آسیب‌های زیاد و بالا رفتن هزینه‌های بهره‌برداری خواهد شد. بین هزینه‌های ساخت و هزینه‌های دوره بهره‌برداری و زمان، ارتباط سه‌گانه‌ای وجود دارد که می‌تواند معیار تصمیم سرمایه برای انتخاب مناسب‌ترین و کم هزینه‌ترین روش ساخت گردد (Val and Stewart, 2005). تجربه و مطالعه‌ی محققان نشان می‌دهد که خسارت پل‌های فلزی، غالباً در اثر خوردگی شدید و خستگی رخ می‌دهد، ولی در پل‌های فلزی راه‌آهن که در معرض ضربه‌ها و لرزش قطارهای بزرگ هستند، پدیده‌ی خستگی بسیار مهم‌تر و بحرانی‌تر از خوردگی می‌باشد و به همین دلیل انتخاب مهندسان برای تقویت سازه‌های قدیمی، ترکیب اعضای سازه‌ای موجود با مصالح و اعضای سازه‌ای جدید بوده است. گزارش شده است که بیش از ۶۰ درصد پلهای راه‌آهن اروپا، بیش از ۵۰ سال و بیش از ۳۰ درصد آنها بیش از ۱۰۰ سال عمر دارند که این پل‌ها در معرض استفاده با سرعت و بارگذاری بیش از حد مشخص شده در طراحی هستند. لذا، نیاز به نگهداری، تعمیر و تقویت این پل‌ها جهت رفع نیازهای حال و آینده ضروری می‌باشد (Lin et al, 2014). با توجه به تعداد زیاد پل‌های موجود و هزینه‌های زیاد تعمیر و نگهداری، امکان تعمیر و نگهداری همزمان همه پل‌ها وجود ندارد. همچنین به

جایگزین جهت تصمیم‌گیری در بخش‌های مختلف مدیریت پل به‌کارگیری شود (Zhu and Liu, 2013). بارونه و فرانگوپل (۲۰۱۴) در مقاله‌ای به نام "تعمیر و نگهداری چرخه عمر سازه‌های رو به وخامت توسط بهینه‌سازی چند معیاره شامل قابلیت اطمینان، ریسک، در دسترس بودن، خطر و هزینه" دو هدف را برای تعیین برنامه‌های تعمیر و نگهداری بهینه برای سیستم‌های ساده و پیچیده را دنبال کردند:

۱. ارزیابی و مقایسه مزایا و معایب از چهار شاخص عملکرد مختلف مربوط به بهینه‌سازی چند معیاره از برنامه نگهداری سازه‌های رو به وخامت.

۲. ارزیابی هزینه بهره‌وری راه‌حل‌های بهینه.

این روش بر روی یک سازه پل رو به وخامت نشان داده شده است که اقدامات تعمیر و نگهداری در آن ضروری در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌گیرد (Barone and Frangopol, 2014).

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 رایجی 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. وجود محدودیت‌هایی مثل حداکثر مقدار مجاز در هزینه‌ی تعمیر و نگهداری و نرخ شکست سیستم در تصمیم قاطعانه برای انتخاب استراتژی‌ها مهم است. بهبود دقت و صحت بازرسی‌ها، ریسک وقوع خطر

تایونگ (۲۰۰۵) در مقاله "توسعه هزینه چرخه عمر چارچوبی برای پل بزرگراه در میانمار" یک روش دقیق برای ایجاد چارچوبی جهت تجزیه و تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA) از پل بزرگراه در میانمار را شرح می‌دهد. این مقاله اجزای مختلف هزینه چرخه عمر را به صورت گام به گام و سایر عوامل آماری را که باید مورد توجه قرار گیرد، در هزینه چرخه عمر یک سازه بزرگراه ارزیابی می‌کند. یک کمبود عمده در روش پیشنهادی این است که تمام هزینه‌هایی که توسط پروژه متحمل می‌شود را پوشش نمی‌دهد. چنین هزینه‌هایی ممکن است شامل: اثرات انتشار بیش از حد، تصادفات، افزایش سر و صدا یا استرس راننده که می‌تواند منجر به تصادف شود باشد (Robert and Tiong, 2005).

ارسی و همکاران (۲۰۱۰)، پارامترهای ابهامات هزینه‌های قطعی بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری در طول چرخه حیات پل‌های در حال فرسایش را مدنظر قرار دادند. در این مقاله از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای محاسبه مقدارهای میانگین نمونه از شاخص اطمینان سیستم و هزینه چرخه حیات پروژه، استفاده گردید (Orcesi et al, 2010). هوانگ و هوانگ (۲۰۱۲)، به ارایه مدلی به منظور تعمیر و نگهداری همزمان عناصر (اجزاء) پل پرداختند. منظور از تعمیر و نگهداری همزمان، تلاش برای ادغام زمان‌بندی تعمیر و نگهداری عناصر مختلف یک پل به منظور کاهش هزینه‌های کاربر در چرخه عمر پل است، مدل پیشنهادی با قبول محدودیت‌های برنامه‌ریزی به عنوان الگوریتم جستجو برای بهینه‌سازی استراتژی تعمیر و نگهداری هر پل در نظر گرفته شده است (Huang and Huang, 2012). ژو و لیو (۲۰۱۳) با در نظر گرفتن معیارهایی چون شاخص‌های عملکرد، عمر سرویس‌دهی و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری چرخه‌ی عمر پل‌ها به بررسی بهینه‌سازی استراتژی تعمیر و نگهداری پل‌هایی با شایستگی‌های متنوع پرداختند. بهینه‌سازی برنامه‌ی تعمیر و نگهداری چرخه‌ی عمر پل‌های روبه‌زوال در این مقاله به عنوان یک مسئله‌ی چندهدفه فرموله شده که توسط روش NSGA و نخبه‌گرایی کنترل‌شده 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. همچنین معلوم شد که روش NSGA این پتانسیل را دارد که برای پیدا کردن راه‌حل‌های

زیست‌محیطی این مقاله دارای محدودیت بودند، لذا تحقیقات بیشتر و دقیق‌تر در آینده نیازمند بهبود در جمع‌دهی داده‌های بیشتر می‌باشد (Sun et al, 2015).

۳- بهینه‌سازی چندهدفه گروه ذرات (MOPSO)

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه گروه ذرات توسط کوئلو در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید و در واقع این الگوریتم تعمیمی است از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO) که برای حل مسائل چندهدفه بکار می‌رود. در الگوریتم MOPSO یک مفهومی به نام آرشیو یا مخزن نسبت به الگوریتم PSO اضافه شده است که به تالار مشاهیر نیز معروف است. انتخاب بهترین جواب کلی و بهترین خاطره شخصی برای هر ذره، گام مهم و اساسی در الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه گروه ذرات است. هنگامی که ذرات می‌خواهند حرکتی انجام دهند، یک عضو از مخزن را به عنوان لیدر یا رهبر انتخاب می‌کنند. این لیدر حتماً باید عضو مخزن و همچنین نامغلوب باشد. اعضای مخزن بیانگر جبهه پارتو و شامل ذرات نامغلوب هستند. پس به جای 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 می‌کنیم (موشخیان و نجفی، ۱۳۹۴):

را کاهش می‌دهد، بنابراین، به احتمال زیاد در این شرایط است که بهترین تصمیم‌های مدیریتی گرفته می‌شوند (Barone et al, 2014).

سان و همکارانش (۲۰۱۵) به ارزیابی یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی روسازه‌ی پل‌های با شاهتیر بتن‌آرمه از طریق راه‌حل‌های تکنولوژی پیشرفته با هدف بهبود ایمنی سازه‌ی و سرویس‌دهی و همچنین به حداقل رساندن هزینه‌ی چرخه‌ی عمر و اثرات زیست‌محیطی پرداختند. در سیستم پیشنهادی این تحقیق، یک ماژول برای ارزیابی عملکرد سازه‌ی پل‌ها جهت دستیابی به درک زمان واقعی این عملکرد، ماژولی دیگر برای تجزیه و تحلیل خطر شکست سازه‌ی براساس روش‌های شبیه‌سازی‌های تصادفی و ماژولی هم برای کنترل اثر گاز کربن براساس مسیر انتشار چرخه‌ی عمر آن ارزیابی شده است. سه استراتژی تعمیر و نگهداری براساس اصول مختلف با یکدیگر مقایسه گردید و نهایتاً طرح تعمیر و نگهداری بهینه‌ای با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که تقریباً نیمی از انتشار کربن چرخه‌ی عمر یک پل، توسط فعالیت‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد. این نشان‌دهنده‌ی آن است که ایجاد یک برنامه‌ی تعمیر و نگهداری بهینه که اثرات زیست‌محیطی را نیز در نظر بگیرد، اهمیت زیادی دارد. علاوه بر این احتساب هزینه‌های خنثی‌سازی اثرات گاز کربن در هزینه‌ی چرخه‌ی عمر پل اجازه می‌دهد تا استراتژی‌های تعمیر و نگهداری با فواصل اجرایی و سطوح نگهداری مختلف در دوره‌ی طول عمر مورد نظر بهینه گردند. در انتها آمده است، با توجه به اینکه داده‌های مورد استفاده در بخش ارزیابی

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

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

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

$$Pbest_i^n = Pbest_i^{n+1} \quad (2)$$

(۳) اگر هیچ کدام یکدیگر را مغلوب نکنند، به تصادف یکی را به عنوان بردار بهترین موقعیت در نظر گرفته می‌شود. ترتیب اجرای این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد.

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

(۲) جمعیت اولیه ایجاد می‌شود.

(۳) بهترین خرد فردی هر ذره تعیین می‌شود.

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

۴- تعریف مساله

پارامترهای دیگری همچون نوع خرابی، نوع تعمیر مرتبط با خرابی به وجود آمده، مدت زمان اثر تعمیر، فاصله زمانی تعمیر اول تا تعمیر بعدی، هزینه تعمیر نیز شناسایی می‌شود. نکته‌ای که در این تحقیق قابل ذکر است این است که، محدودیت بودجه در دسترس در نظر گرفته شده مربوط به هزینه تعمیر و نگهداری است که صرفاً جهت نزدیک شدن مسئله مورد بررسی به واقعیت در نظر گرفته شده است.

هدف نهایی این تحقیق، تعیین دوره بهینه تعمیر و نگهداری به منظور بهینه‌سازی هزینه چرخه عمر پل‌های راه آهن می‌باشد. بهینه‌سازی این تحقیق به صورت چند هدفه (دو هدفه) است. هدف اول، تعیین زمان مناسب برای شروع تعمیر و حداکثرسازی عملکرد پل و هدف دوم حداقل‌سازی هزینه ناشی از این تعمیر و نگهداری است که تاثیر مستقیم در هزینه کل چرخه عمر پل دارد. همچنین به دنبال این دو هدف،

۴-۱- معرفی پل

۴،۷ متر است. طول کل پل ۹۳ متر و عرض عرشه آن ۴،۸ متر است که مصالح بتنی قوسی در عرشه آن به کار برده شده که سطح عرشه آن ۴۳۷ متر مربع است. در ادامه این مشخصات به همراه دیگر مشخصات پل در جدول ۱ آورده شده است.

پل راه‌آهنی که در این تحقیق از آن استفاده شده در مسیر (زیرآب - شیرگاه) و در کیلومتر جدید (۳۱۲+۴۸۰) قرار دارد. این پل دارای دو دهانه است که طول هر دهانه برابر ۳۰ متر می‌باشد. همچنین دارای پایه بتنی می‌باشد که طول پایه آن برابر

جدول ۱. مشخصات پل راه آهن بلوک (زیرآب-شیرگاه)

کیلومتراژ	تعداد دهانه	طول دهانه (متر)	طول پایه (متر)	طول کل پل (متر)
۳۱۲+۴۸۰	۲	۳۰	۹۳	۹۳
عرض عرشه (متر)	سطح کوله (متر)	سطح عرشه (متر مربع)	نوع پایه پل	مصالح عرشه پل
۴،۸	۲۳۳۱،۶	۴۳۷	بتنی	بتنی-قوسی

۴-۲- دسته تعمیرات، احجام خرابی و هزینه و طول

عمر تعمیر و نگهداری پل

تعمیراتی که برای پل مورد تحقیق در نظر گرفته شده، به دسته‌هایی تقسیم بندی شده که هر کدام از آنها هزینه‌هایی در بر خواهد داشت و مدت زمان طول عمر این تعمیرات در پل متفاوت خواهد بود. همچنین انواع خرابی‌های موجود در پل و میزان حجم آنها نیز بررسی شده که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

۴-۲-۱- دسته تعمیرات

برای پل واقع در کیلومتر (۳۱۲+۴۸۰) در مسیر (زیرآب-شیرگاه) که در این تحقیق از آن استفاده شده، سه نوع دسته کاری تعمیراتی در نظر گرفته شده است.

- دسته اول: بسته کاری ترمیم ترک
- دسته دوم: بسته کاری پنج اقدام (که خود شامل بسته‌های کاری: پاکسازی سطح، ترمیم بتن، ترفیع قرنیز، تفکیک بالاست و لایروبی است)
- دسته سوم: بسته‌های کاری پنج اقدام و ترمیم ترک

۴-۲-۲- انواع و احجام خرابی

طبق نظر کارشناسان در حوزه پل، ۱۲ نوع خرابی برای پل مورد مطالعه در تحقیق در نظر گرفته شده، که انواع و حجم این خرابی‌ها در جدول ۲ به صورت زیر مشخص شده و در ادامه نیز چهار نوع از انواع خرابی‌های مرتبط با پل که تقریباً بیشترین حجم را در پل داشتند، به همراه شکل و توضیحات مختصری راجع به آن‌ها آورده شده است.

جدول ۲. انواع و احجام خرابی پل

نوع خرابی	حجم خرابی	نوع خرابی	حجم خرابی
۱ قلوه کن شدن (متر مربع)	۱۶,۴۸	۷ تراوش (متر مربع)	۱۹۱,۴
۲ ترک گسترده (متر مربع)	۱۳,۱۷	۸ رطوبت (متر مربع)	۳,۳۶۱
۳ بیرون زدگی آرماتور (متر مربع)	۵,۷۹۱	۹ املاح (متر مربع)	۹۲,۵
۴ پوسته شدن (متر مربع)	۱۸,۹۳	۱۰ خزه (متر مربع)	۴۵,۷
۵ گوشه شکسته (متر مربع)	۲,۲۷۵	۱۱ ملات تعمیری (متر مربع)	۲۹,۰۶
۶ ترک منفرد عمیق (متر مربع)	۲۵,۲۴	۱۲ گیاه (متر مربع)	۷,۶

۴-۲-۳- هزینه تعمیرات

هزینه تعمیر و نگهداری که طبق بررسی‌های کارشناسان برای سه دسته تعمیر مورد نظر اختصاص داده شده، به صورت زیر است.

عمر حالت‌های مختلف تعمیر و نگهداری در پل متفاوت است و بسته به نوع تعمیر و شرایط پل بعد از هر بار تعمیر، این ماندگاری متفاوت خواهد بود که طبق نظر کارشناسان مربوط به حوزه پل‌های راه‌آهن، طول عمر تعمیرات بعد از هر بار تعمیر در این سه نوع دسته از تعمیر به صورت زیر است.

جدول ۳. هزینه تعمیر و نگهداری

ترمیم ترک (تومان)	پنج اقدام (تومان)	پنج اقدام و ترمیم ترک (تومان)
۱۹۳۵۱۲۱۷,۳۵	۱۵۹۳۵۱۰۴۷,۴	۱۷۸۷۰۲۲۶۴,۷

جدول ۴. طول عمر دسته تعمیرات

پنج اقدام	ترمیم ترک	پنج اقدام و ترمیم ترک
۲ سال	۵ سال	۱۰ سال

۴-۳- مدل بهینه‌سازی چند هدفه پیشنهادی

نظر قرار داده و همچنین با هدف بهبود شاخص عملکرد پل که با گذشت زمان از مقدار اولیه آن کاسته می‌شود، مدل زیر پیشنهاد شده است.

مدل ریاضی استفاده شده در این تحقیق براساس کمینه کردن هزینه‌های سازه در طول عمر خود است که در اینجا یک پل با مشخصات یاد شده، مورد مطالعه قرار گرفته و با ثابت نگه داشتن هزینه‌های اولیه، هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن را مد

$$\min C_{total} \quad (1)$$

$$\max P \quad (2)$$

$$C_{total} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{CM_{it}}{(1+r)^t} \quad (3)$$

$$P = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I P_{it} \quad (4)$$

$$P_{it} = \begin{cases} P_{it-1} + \gamma & t < T_D \\ P_{it-1} + \gamma - \max(\alpha - \delta, 0) (t - T_D) & T_D \leq t < T_{PD} = 0.8P_{it} \\ P_{it-1} + \gamma - \max(\alpha - \delta, 0) (T_{PD} - T_D) - \alpha(t - T_{PD}) & T_{PD} \leq t < T_P = 0.4P_{it} \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I CM_{it} \leq B_t \quad \forall t \quad (6)$$

۴-۳-۱- نمادگذاری‌ها

$i=1,2,3$: نوع خرابی

$t=1,2,\dots,100$ سال

۴-۳-۲- پارامترهای مساله

میزان بهبود عملکرد	γ
مدت زمان به تاخیر افتادن خرابی (سال)	T_D
نرخ خرابی ($\frac{1}{\text{سال}}$)	α
نرخ خرابی در طول اثر ($\frac{1}{\text{سال}}$)	$\alpha - \delta$
زمان شروع خرابی اولیه (سال)	T_I
هزینه کل	C_{total}
مدت زمان اثر تعمیر	T_{PD}
زمان شروع اولین برنامه تعمیر (سال)	T_{PI}
شاخص اولیه	P_0
نرخ بهره سالیانه	R
فاصله زمانی از چرخه برنامه بعدی	T_P

۴-۳-۳- متغیر مساله

- P_i میزان عملکرد لحظه‌ای که آن تعمیر آغاز می‌شود.
- T_P بر حسب ضربی از P_i است که از T_{PD} کوچکتر است.

۴-۳-۴- توابع هدف

- 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.
- رابطه (۳) نحوه محاسبه هزینه کل تعمیرات و نگهداری را نشان می‌دهد.
- رابطه (۴) نحوه محاسبه عملکرد کل سیستم را بیان می‌نماید.
- رابطه (۵) میزان عملکرد سیستم (P_{it}) با توجه به نوع تعمیر مورد نیاز را مشخص می‌کند.

۴-۳-۵- محدودیت مساله

- رابطه (۶) محدودیت بودجه موجود در سیستم را نمایش می‌دهد. بودجه در دسترس بصورت برنامه ده ساله در اختیار سیستم قرار می‌گیرد. بدین ترتیب میزان بودجه بصورت جدول ۵ می‌باشد.

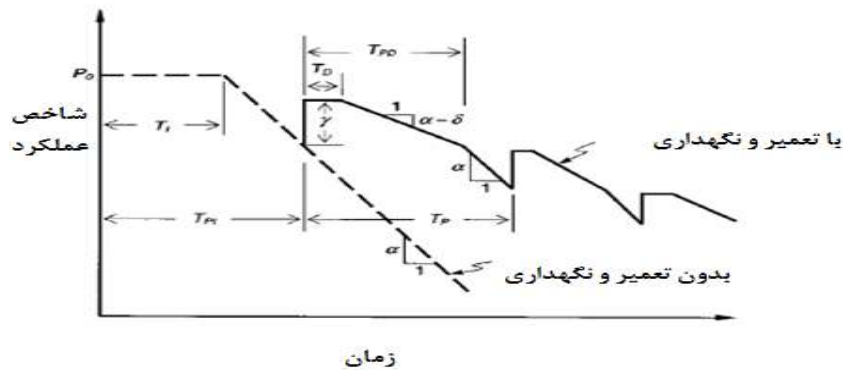
جدول ۵. بودجه در دسترس

سال	۱۰-۱	۲۰-۱۱	۳۰-۲۱	۴۰-۳۱	۵۰-۴۱	۶۰-۵۱	۷۰-۶۱	۸۰-۷۱	۹۰-۸۱	۱۰۰-۹۱
میزان بودجه (میلیون تومان)	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰

۴-۴- نمودار عملکرد پل

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 عمر سازه همچنان ادامه پیدا می‌کند.

نمودار زیر، عملکرد پل براساس شاخص ایمنی در دو وضعیت با تعمیر و نگهداری و بدون تعمیر و نگهداری را نشان می‌دهد که پارامترهای آن در جدول (۶) تعریف شده است. 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



شکل ۱. نمودار شاخص عملکرد پل

جدول ۶. تعریف پارامترهای نمودار

دسته خرابی نوع سوم	دسته خرابی نوع دوم	دسته خرابی نوع اول	دسته خرابی‌ها (انواع تعمیرات)	
			پارامترهای مسئله	
پنج اقدام و ترمیم ترک	ترمیم ترک	پنج اقدام	γ	میزان بهبود عملکرد
۲	۱,۵	۱	T_D	مدت زمان به تاخیر افتادن خرابی (سال)
۱۰	۵	۲	α	نرخ خرابی ($\frac{1}{سال}$)
۰,۰۵	۰,۱	۰,۱۵	$\alpha - \delta$	نرخ خرابی در طول اثر ($\frac{1}{سال}$)
۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۳	T_I	زمان شروع خرابی اولیه (سال)
۱۵	۱۵	۱۰		

۱۷۸۷۰۲۲۶۴,۷	۱۹۳۵۱۲۱۷,۳۵	۱۵۹۳۵۱۰۴۷,۴	C_{total}	هزینه (میلیون تومان)
$0.8P_{it}$			T_{PD}	مدت زمان اثر تعمیر
$0.7P_0$			T_{PI}	زمان شروع اولین برنامه تعمیر (سال)
۳,۵			P_0	شاخص اولیه
۱۲ درصد			R	نرخ بهره سالیانه

۴-۵- حل مساله توسط الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه (MOPSO) و نرم افزار MATLAB

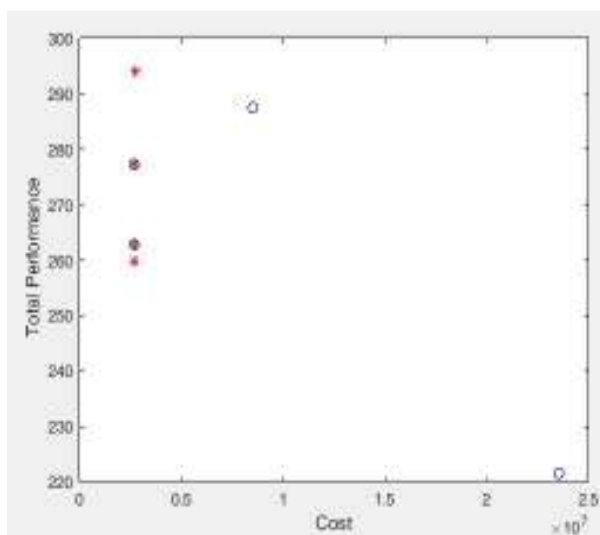
فراابتکاری وجود دارد که از میان آنها، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه برای این تحقیق استفاده شده است. بعد از کدنویسی براساس مدل ریاضی تعریف شده در نرم افزار متلب و با استفاده از الگوریتم مورد نظر، خروجی‌های مطلوبی دریافت شده که به صورت زیر شرح داده شده است.

به دلیل پیچیدگی زیاد و امکان نداشتن حل دقیق برای این مساله، 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

۴-۵-۱- جواب بهینه پارتو

داده شده، این نمودار دارای چهار جواب بهینه می‌باشد که مشخصات این جواب‌ها که متشکل از شماره جواب، هزینه و مجموع عملکرد می‌باشند، به صورت زیر در جدول ۷ آورده شده است.

نمودار شکل ۲ مربوط به جواب‌های پارتو به دست آمده می‌باشد که براساس ورودی‌های داده شده در نرم افزار متلب به دست آمده است. این نمودار براساس هزینه و عملکرد کلی سیستم است که مشخصات این جواب‌ها در ادامه در جدول (۷) آورده شده است. طبق نتایج به دست آمده از نرم افزار متلب و جواب‌های بهینه پارتو که در نمودار شکل (۲) نشان



شکل ۲. نمودار مربوط به جواب بهینه پارتو

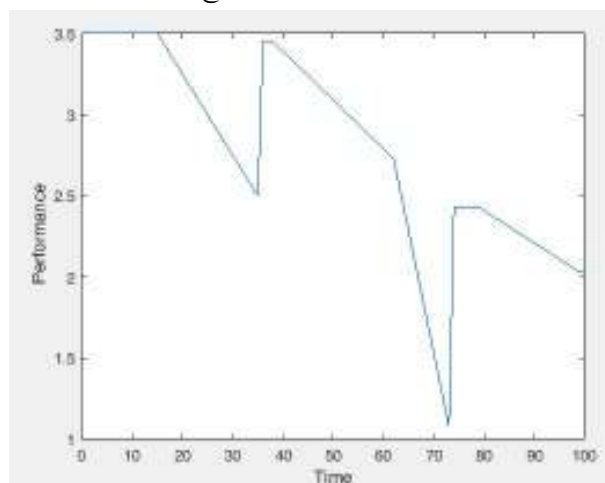
جدول ۷. مشخصات جواب‌های پارتو

شماره جواب	هزینه (تومان)	مجموع عملکرد
۱	۲۷۰۰۹۹۲,۴۸۷	۲۷۷,۲۹۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۲	۲۷۳۵۴۱۰,۹۰۷	۲۹۴,۰۴۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	۲۷۰۰۳۵۱,۷۷۰	۲۶۲,۷۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۴	۲۶۹۵۳۱۳,۲۲۴	۲۵۹,۷۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰

۴-۵-۲- نمودار تغییر عملکرد سیستم

و پل به یک سطح عملکردی قابل قبول می‌رسد، که این روند کاهش سطح عملکردی و افزایش به موقع آن، با انجام تعمیر در طی این صد سال در این نمودار قابل مشاهده است. این سیستم با شاخص عملکرد اولیه برابر ۳,۵ شروع شده و طی گذشت زمان با هر بار خرابی، وضعیت عملکردی آن تغییر کرده که در ادامه در جدول ۸ این تغییرات آورده شده و روند آن شرح داده شده است.

نمودار شکل ۳، نحوه تغییر عملکرد سیستم نسبت به زمان را در یک دوره صد ساله نشان می‌دهد. طبق مساله موجود در این تحقیق و با توجه به نمودار به دست آمده از نرم افزار متلب، پل مورد نظر با طول عمر صد ساله، 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



شکل ۳. نمودار تغییرات عملکرد سیستم نسبت به زمان

تعمیر نیاز پیدا می‌کند که این تعمیر با بکارگیری یکی از انواع دسته‌های تعمیراتی مرتبط با خرابی پیش آمده انجام می‌گیرد. طبق نتایج به دست آمده، این تعمیر از نوع تعمیر ۱ است که در سال سی و ششم اتفاق افتاده است که در این سال، میزان سطح عملکردی به عددی برابر ۳,۴۵ رسیده که هزینه این تعمیر نیز برابر ۱۹۳۵۱۲۱۷,۳۵ تومان شده است. این مقدار شاخص تا سال سی و هشتم ثابت مانده و از آن سال به بعد دوباره روند کاهشی پیدا کرده تا این که در سال هفتاد و سه به مقداری برابر عدد ۱,۰۸ رسیده است و در نهایت در سال هفتاد و چهار تعمیری مختص خرابی جدید به وجود آمده در پل نیاز می‌شود، که این تعمیر از نوع ۲ بوده که میزان شاخص را به

با توجه به شکل ۳، شاخص عملکرد اولیه سیستم که در این تحقیق منظور از سیستم، پل (۳۱۲+۴۸۰) بلوک (زیرآب-شیرگاه) است، برابر ۳,۵ است، که این مقدار اولیه از سال اول عمر پل تا سال پانزدهم با همین مقدار ثابت مانده است، از سال شانزدهم با پیدایش یک نوع از انواع خرابی‌هایی که در این تحقیق از آن یاد شده و مرتبط با پل مورد نظر است، میزان سطح عملکردی از این مقدار اولیه که برابر ۳,۵ بوده کمتر شده تا در نهایت در سال سی و پنجم به مقداری برابر ۲,۵ رسیده است. طبق همین نمودار 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

مطلب، انواع دسته‌های تعمیراتی به اعداد ۱ تا ۳ اختصاص داده شده است که در اینجا منظور از تعمیر نوع یک، تعمیر از نوع ترمیم ترک و تعمیر نوع دو تعمیر پنج اقدام و تعمیر نوع سه نیز مربوط به تعمیر از نوع ترمیم ترک و پنج اقدام است. این نتایج همچنین در جدول (۸) نیز آورده شده است.

عدد ۲,۴۳ می‌رساند و هزینه‌ای که بابت این تعمیر متحمل شده برابر ۱۵۹۳۵۱۰۴۷,۴ تومان بوده است. تا پایان سال هفتاد و نه، میزان سطح عملکرد تغییری نداشته تا این که از سال هشتادم به بعد روند کاهشی میزان شاخص عملکرد آغاز می‌شود و تا سال صدم ادامه پیدا می‌کند که در سال صد این میزان به عدد ۲,۰۳ می‌رسد. قابل ذکر است که در کد نوشته شده در نرم افزار

جدول ۸. تغییر عملکرد سیستم نسبت به زمان

سال	میزان عملکرد	زمان تعمیر (سال)	نوع تعمیر (۱-۲-۳)	هزینه تعمیر (تومان)
۱	۳,۵	-	-	-
۲	۳,۵	-	-	-
۳	۳,۵	-	-	-
.
۳۵	۲,۵	-	-	-
۳۶	۳,۴۵	۳۶	۱	۱۹۳۵۱۲۱۷,۳۵
۳۷	۳,۴۵	-	-	-
.	-	-	-	-
۷۲	۱,۲۳	-	-	-
۷۳	۱,۰۸	-	-	-
۷۴	۲,۴۳	۷۴	۲	۱۵۹۳۵۱۰۴۷,۴
۷۵	۲,۴۳	-	-	-
.	-	-	-	-
۱۰۰	۲,۰۳	-	-	-

ادامه گفته می‌شود. مقدار اولیه نرخ خرابی برای هر سه نوع از انواع خرابی‌ها که از آن یاد شده، به این صورت بوده که برای خرابی نوع یک برابر مقدار ۰,۱۵ و برای خرابی نوع دو برابر ۰,۱ و برای خرابی نوع سه برابر ۰,۰۵ بوده است.

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 آمد که از میان آنها فقط دو جواب مدنظر قرار گرفته شد، جوابی با کمترین مقدار مجموع هزینه و کمترین میزان مجموع عملکرد و

۴-۶- تحلیل حساسیت پارامترهای (α) و $(\delta - \alpha)$

موجود در مساله

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار متلب نسبت به دو پارامتر:

۱. نرخ خرابی α

۲. نرخ خرابی در طول اثر $\delta - \alpha$

که اثر قابل توجهی در میزان خرابی و تعداد تعمیرات بعد از آن داشته و یکی از پارامترهای اساسی در این تحقیق بوده‌اند، تحلیل حساسیت انجام شده است که در ادامه به چگونگی انجام آن برای این دو پارامتر به صورت جداگانه پرداخته شده و نتایج آن بررسی می‌شود.

۴-۶-۱- تحلیل حساسیت پارامتر α

این حساسیت با تغییر مقدار پارامتر α که همان نرخ خرابی است انجام شده که طی آن نتایجی نیز به دست آمده که در

بررسی شده است به این صورت که 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 که تعداد جواب پارتو در این سناریو برابر دو بوده که در حالت کمترین میزان مجموع هزینه و کمترین مقدار مجموع عملکرد، ۲ تعمیر اتفاق می افتد و برای حالت بیشترین میزان مجموع هزینه و بیشترین مقدار مجموع عملکرد، نیز ۲ تعمیر اتفاق می افتد. این نتایج در سناریوهای بعدی نیز به این صورت تحلیل می شود که در ادامه این نتایج برای این نه سناریو در جدولی به صورت زیر آورده شده است.

جوابی با بیشترین مقدار مجموع هزینه و به دنبال آن دارای بیشترین میزان مجموع عملکرد بودند، که در واقع همان حد بالا و پایین مجموع هزینه به همراه میزان مجموع عملکرد آنها از میان جواب های پارتو انتخاب شد و همچنین تعداد تعمیراتی که در هر سناریو با توجه به این تغییرات در مقدار نرخ خرابی انجام خواهد پذیرفت، جزئی از نتایج به دست آمده بودند. پس بنابراین این بروز حساسیت نسبت به تغییرات افزایشی نرخ خرابی به دو صورت:

۱. (کمترین مجموع هزینه - کمترین مجموع عملکرد)

۲. (بیشترین مجموع هزینه - بیشترین مجموع عملکرد)

جدول ۹. تحلیل حساسیت پارامتر نرخ خرابی (α)

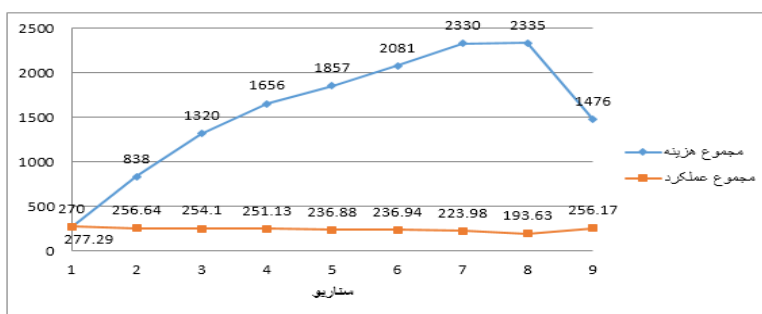
سناریو	خرابی نوع ۱	خرابی نوع ۲	خرابی نوع ۳	تعداد جواب پارتو	تعداد تعمیرات	مجموع هزینه	مجموع عملکرد
۱	۰,۱۵	۰,۱	۰,۰۵	۲	۲	۲۷۰	۲۷۷,۲۹
۲	۰,۲	۰,۱۵	۰,۱	۳	۲	۸۳۸	۲۵۶,۶۴
۳	۰,۲۵	۰,۲	۰,۱۵	۴	۲	۱۳۲۰	۲۹۲,۴۶
۴	۰,۳	۰,۲۵	۰,۲	۳	۳	۱۶۵۶	۲۵۱,۱۳
۵	۰,۴	۰,۳۵	۰,۳	۴	۲	۲۱۴۱	۲۸۲,۸۸
۶	۰,۵	۰,۴۵	۰,۴	۴	۳	۲۰۸۱	۲۳۶,۹۴
۷	۰,۶	۰,۵۵	۰,۵	۴	۲	۲۳۳۰	۲۹۴,۱۸
۸	۰,۸	۰,۷۵	۰,۷	۸	۴	۲۳۳۵	۲۲۳,۹۸
۹	۱	۰,۹۵	۰,۹	۴	۲	۱۴۷۶	۲۸۳,۵۹
						۲۶۱۷	۲۹۴,۳۶

رسم شد که در شکل های زیر روند تغییرات آن ها با استفاده از نمودار نشان داده شده است. در نمودار شکل ۴، روند تغییرات مقدار حد پایین مجموع هزینه به همراه میزان مجموع عملکرد مرتبط با آن در هر سناریو رسم شده، همانطور که در نمودار مشخص است، با افزایش میزان نرخ خرابی در هر سناریو، مقدار مجموع هزینه افزایش پیدا کرده که این افزایش بر روی مجموع عملکرد نیز تاثیر گذاشته و باعث کاهش میزان مجموع عملکرد در هر سناریو شده است. تا جایی که در سناریو شماره

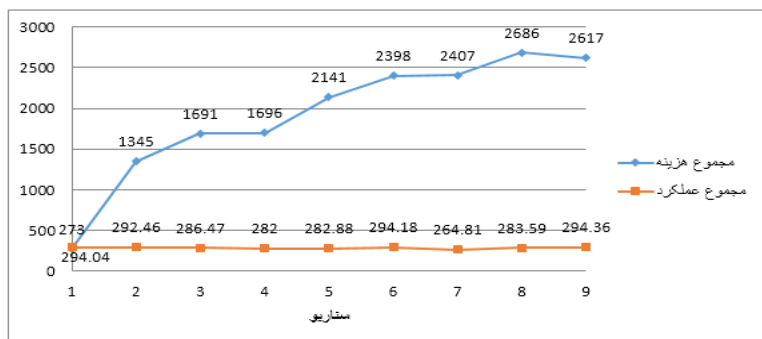
طبق نتایج به دست آمده و با استفاده از جدول (۹) که این نتایج را برای هر سناریو دسته بندی کرده، در هر سناریو، حد پایین مجموع هزینه به همراه مجموع عملکرد مرتبط با آن به صورت جداگانه دسته بندی شد و در نموداری هزینه و عملکرد هر سناریو، به ازای حد پایین مجموع هزینه رسم شد و همچنین در ادامه در هر سناریو، حد بالای مجموع عملکرد به همراه مجموع هزینه مرتبط با آن دسته بندی شد و در نموداری

در ادامه نیز حد بالای مجموع هزینه با حد پایین مجموع هزینه در یک نمودار و حد پایین مجموع عملکرد با حد بالای مجموع عملکرد در نمودار دیگر نمایش داده می‌شوند. شکل ۶ کمترین مقدار مجموع هزینه و بیشترین مقدار مجموع هزینه در هر سناریو را در نمودار نشان داده که مشخص می‌کند با افزایش مقدار نرخ خرابی، هزینه چرخه عمر نیز بیشتر شده و نوسانات این تغییرات در حد بالا بیشتر بوده است.

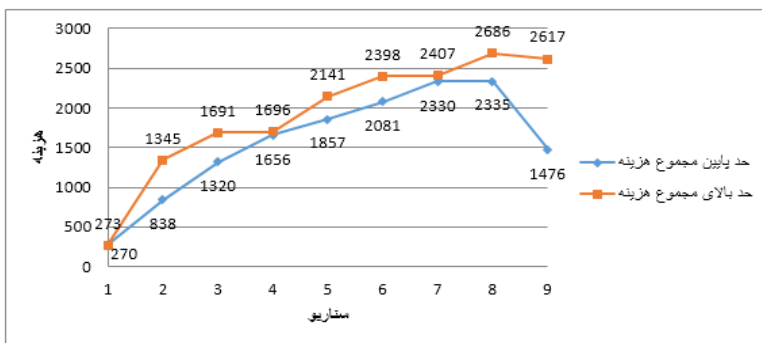
نه این افزایش نرخ خرابی، دیگر تاثیری روی سیستم نداشته و باعث کاهش مجموع هزینه و افزایش مجموع عملکرد شده است. نمودار روند تغییرات مجموع هزینه و مجموع عملکرد در هر سناریو به ازای حد بالای عملکرد در شکل ۵ نشان داده شده است، که این روند کاهش میزان مجموع عملکرد به دلیل افزایش نرخ خرابی در هر سناریو می‌باشد که با هر بار کاهش آن، افزایش مجموع هزینه را در هر سناریو به دنبال خواهد داشت. در سناریو شماره نه، افزایش نرخ خرابی در مجموع عملکرد تاثیری نداشته و به یکباره مقدار آن افزایش می‌یابد که باعث کاهش مقدار مجموع هزینه نیز می‌شود.



شکل ۴. هزینه و عملکرد در هر سناریو به ازای حد پایین هزینه



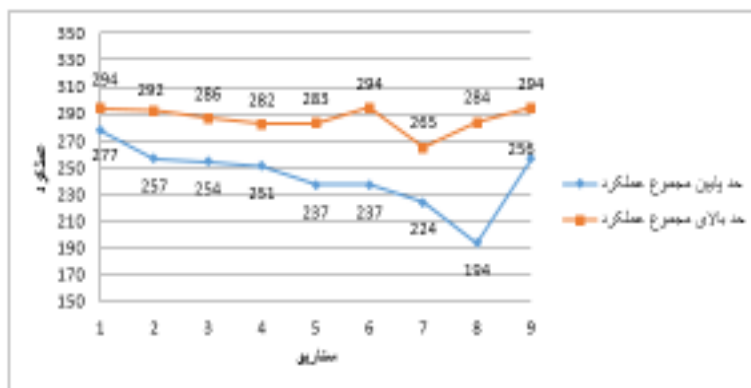
شکل ۵. هزینه و عملکرد در هر سناریو به ازای حد بالای عملکرد



شکل ۶. نمودار حد بالا و پایین مجموع هزینه

در هر سناریو، با توجه به وجود حد بالا و پایین مجموع عملکرد و هزینه، تعداد تعمیرات نیز دو حالت داشته، یکی مربوط به حد پایین و دیگری مربوط به حد بالا خواهد بود که در هر سناریو بیشترین تعداد تعمیرات انتخاب و در جدول ۱۰ آورده شده است و در ادامه نمودار مربوط به آن نیز رسم شده است.

شکل ۷ روند تغییرات بیشترین و کمترین مجموع عملکرد در هر سناریو را در نمودار نشان می‌دهد که مشخص می‌کند افزایش نرخ خرابی در میزان مجموع عملکرد تاثیر زیادی داشته، به طوری که روند کاهشی مقدار مجموع عملکرد با هر بار افزایش نرخ خرابی در هر سناریو قابل چشم پوشی نیست که می‌توان از این نمودارها نتیجه گرفت، نوسانات مجموع هزینه و مجموع عملکرد در حد بالا بیشتر بوده است.



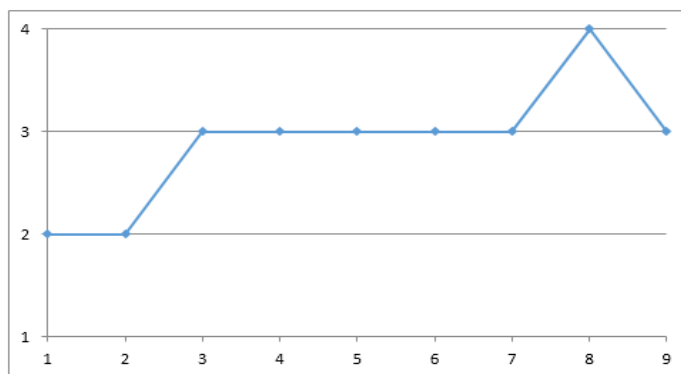
شکل ۷. نمودار حد بالا و پایین مجموع عملکرد

جدول ۱۰. حداکثر تعداد تعمیرات در هر سناریو

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
تعداد تعمیرات	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۳

به نمودارهای قبل، در سناریو ۹ با افزایش مجموع عملکرد و پایین آمدن مقدار مجموع هزینه در این نمودار، تعداد تعمیرات کاهش پیدا کرده است.

شکل ۸ نمودار بیشترین تعداد تعمیرات در هر سناریو را نشان می‌دهد که با توجه به آن می‌توان نتیجه گرفت با افزایش نرخ خرابی، تعداد تعمیرات انجام شده نیز افزایش می‌یابد که باتوجه



شکل ۸. نمودار تغییرات حداکثر تعداد تعمیرات در هر سناریو

۴-۶-۲- تحلیل حساسیت پارامتر $\alpha - \delta$

اثر نیز برای هر سه دسته خرابی دارای مقدار اولیه بوده که این مقدار برای خرابی نوع یک برابر مقدار $0,03$ و برای خرابی نوع

در این قسمت حساسیت با تغییر در مقدار نرخ خرابی در طول اثر یا همان $\alpha - \delta$ تحلیل می‌شود. نرخ خرابی در طول

هر هشت سناریو به همین ترتیب ادامه داده می‌شود. برای نمونه در سناریو شماره دو، مقدار اولیه نرخ خرابی در طول اثر در خرابی نوع یک که برابر ۰,۰۳ بوده با تغییر افزایشی ۰,۰۱ روبرو شده که برابر ۰,۰۴ شده، به همین ترتیب برای خرابی نوع دو از ۰,۰۲ به ۰,۰۳ و در خرابی نوع سه از ۰,۰۱ به ۰,۰۲ تغییر یافته است. سپس پنج جواب پارتو برای این سناریو در نظر گرفته شده که از این پنج جواب، کمترین مجموع هزینه با کمترین مجموع عملکرد به همراه تعداد تعمیرات آن و بیشترین مجموع هزینه با بیشترین مجموع عملکرد به همراه تعداد تعمیرات مرتبط با آن در نظر گرفته شده است. این روند گرفتن خروجی از نرم افزار متلب برای سناریوهای بعدی نیز به همین ترتیب بوده که تمامی آن در جدول ۱۱ آورده شده است.

دو برابر ۰,۰۲ و برای خرابی نوع سه ۰,۰۱ بوده است. برای شروع کار ابتدا هشت سناریو در نظر گرفته شده که در آن تغییر مقدار اولیه نرخ خرابی در طول اثر نسبت به مقدار اولیه خود به ترتیب برای دو سناریو برابر ۰,۰۱ و برای سه سناریو برابر ۰,۰۵ و 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 دریافت می‌شود که با توجه به این جواب‌ها، کمترین میزان مجموع هزینه به همراه کمترین مقدار مجموع عملکرد مرتبط با آن و تعداد تعمیرات انجام شده در این بخش و همچنین بیشترین میزان مجموع هزینه به همراه بیشترین مقدار مجموع عملکرد مربوطه به همراه تعداد تعمیرات آن استخراج می‌شود. این روند گرفتن خروجی برای

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

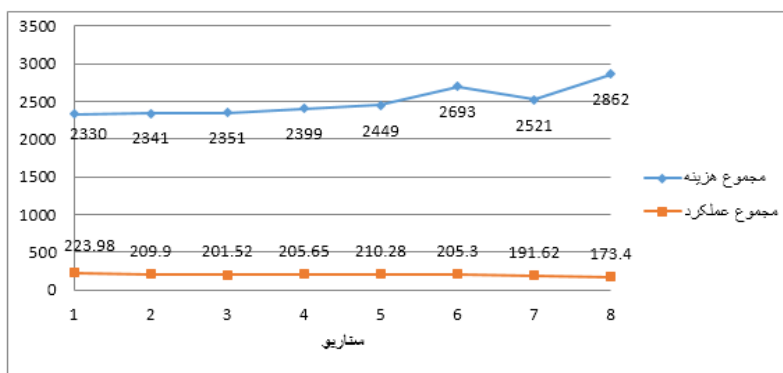
سناریو	خرابی نوع ۱	خرابی نوع ۲	خرابی نوع ۳	تعداد جواب پارتو	تعداد تعمیرات	مجموع هزینه	مجموع عملکرد
۱	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۱	۴	۳	۲۳۳۰	۲۲۳,۹۸ ۲۶۴,۸۱
۲	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۲	۵	۵	۲۳۴۱	۲۰۹,۹ ۲۵۹,۴
۳	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۳	۸	۵	۲۳۵۱	۲۰۱,۵۲ ۲۳۸,۶۴
۴	۰,۱	۰,۰۹	۰,۰۸	۶	۷	۲۳۹۹	۲۰۵,۶۵ ۲۵۲,۲
۵	۰,۱۵	۰,۱۴	۰,۱۳	۸	۷	۲۴۴۹	۲۱۰,۲۸ ۲۲۸,۷۳
۶	۰,۲	۰,۱۹	۰,۱۸	۶	۷	۲۶۹۳	۲۰۵,۳ ۲۲۹,۰۸
۷	۰,۳	۰,۲۹	۰,۲۸	۹	۸	۲۵۲۱	۱۹۱,۶۲ ۲۰۷,۹۷
۸	۰,۵	۰,۴۹	۰,۴۸	۱۱	۹	۲۸۶۲	۱۷۳,۴ ۲۱۵,۷۶

در هر سناریو را به ازای حد پایین مجموع هزینه نشان می‌دهد، این روند تغییرات به صورتی است که با هر بار افزایش مقدار پارامتر نرخ خرابی در طول اثر در هر سناریو، مجموع هزینه افزایش یافته و به دنبال آن میزان مجموع عملکرد آنها کاهش پیدا کرده است. به طوری که در سناریو شماره هفت این روند افزایشی مقدار پارامتر در هزینه سیستم تأثیری نداشته و در این

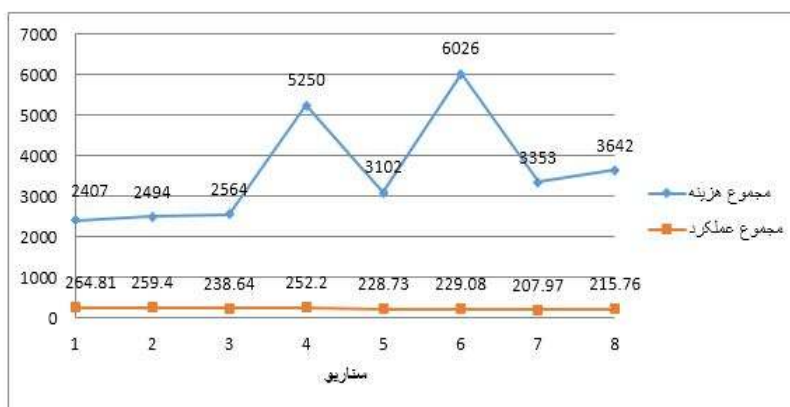
طبق خروجی‌های به دست آمده از نرم افزار متلب که همگی در جدول (۱۱) آورده شده، در هر سناریو حد پایین مجموع هزینه با مجموع عملکرد متناظر با آن و همچنین حد بالای مجموع عملکرد به همراه هزینه مرتبط با آن از جدول استخراج شده و به صورت جداگانه در نموداری رسم شده است که در شکل ۹ آورده شده است. در شکل ۹، نمودار هزینه و عملکرد

نوع خرابی و انجام تعمیر پس از آن بعد از مدتی اثر تعمیر از بین می‌رود و خرابی نوع دیگری به وجود می‌آید و این رویه تکرار می‌شود که همین باعث کاهش میزان مجموع عملکرد در سیستم خواهد شد. این نوسانات نشان دهنده این است که این پارامتر تأثیر بیشتری بر روی میزان عملکرد و به دنبال آن میزان مجموع هزینه سیستم داشته است.

سناریو مجموع هزینه با کاهش روبرو شده است. شکل (۱۰) مجموع هزینه و عملکرد در هر سناریو را به ازای حد بالای عملکرد نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار مشخص است با افزایش یک نسبت مشخص از مقدار اولیه پارامتر نرخ خرابی در طول اثر در هر سناریو، میزان مجموع عملکرد نیز کم می‌شود و این امر به این دلیل است که با به وجود آمدن هر



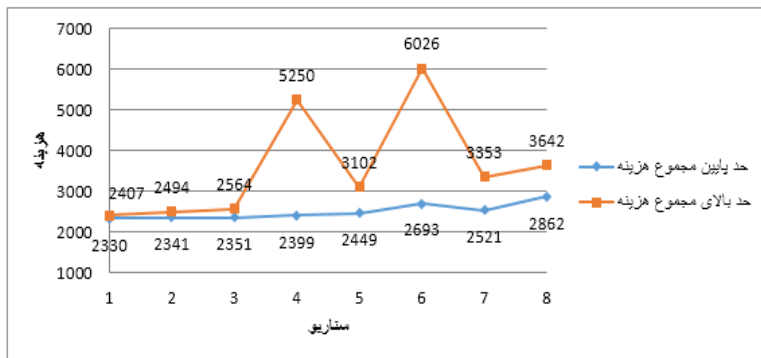
شکل ۹. هزینه و عملکرد در هر سناریو به ازای حد پایین هزینه



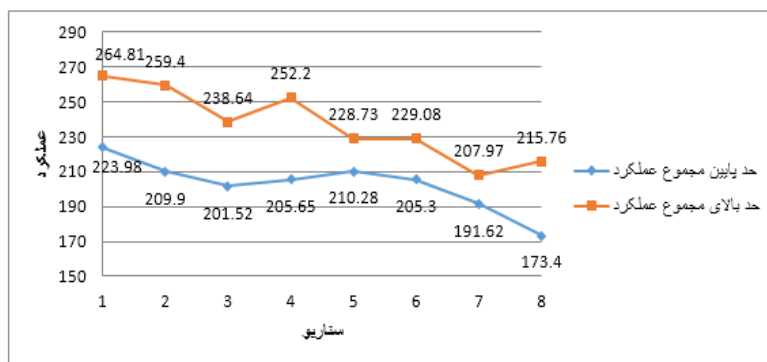
شکل ۱۰. هزینه و عملکرد در هر سناریو به ازای حد بالای عملکرد

افزایش مقدار پارامتر قرار گرفته است. شکل ۱۲ تغییرات حد بالا و پایین مقدار مجموع عملکرد در هر سناریو را با رسم نمودار نشان می‌دهد که در آن نوسانات کاهشی حد بالای عملکرد با هر بار افزایش مقدار پارامتر نرخ خرابی در طول اثر با یک نسبت مشخص در هر سناریو بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته است.

نمودارهای تغییرات حد بالا و پایین مجموع هزینه برای هر سناریو و حد بالا و پایین مجموع عملکرد هر سناریو به صورت جداگانه رسم شده که در ادامه آورده شده است. شکل (۱۱) تغییرات کمترین و بیشترین مقدار مجموع هزینه هر سناریو را در نمودار نشان می‌دهد. این روند تغییرات بیان کننده این است که نوسانات در حد بالای هزینه بیشتر تحت تأثیر



شکل ۱۱. نمودار حد بالا و پایین مجموع هزینه



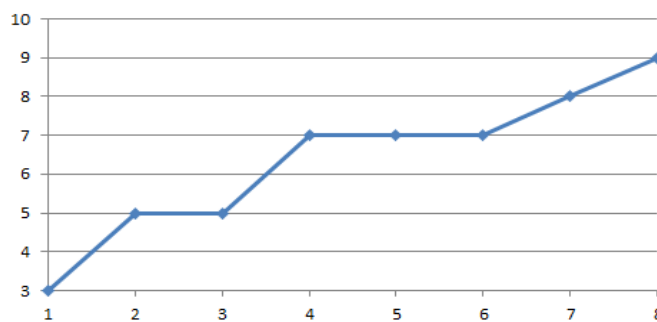
شکل ۱۲. نمودار حد بالا و پایین مجموع عملکرد

نمودار شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با بالا رفتن مقدار پارامتر نرخ خرابی در طول اثر در هر سناریو چون اثر تعمیر بعد از هر خرابی زودتر از بین می‌رود، تعداد تعمیرات نیز بیشتر می‌شود، به طوری که در سناریو شماره هشت، ۹ تعمیر انجام شده است.

در هر سناریو با توجه به دو حالت بودن، یعنی حد بالا و پایین مجموع هزینه و مجموع عملکرد، تعداد تعمیرات نیز دو حالت خواهد بود که در اینجا بیشترین تعداد تعمیر مربوط به این دو حالت در هر سناریو جدا شده و در جدول ۱۲ آورده شده است و در ادامه در نموداری این تغییرات رسم شده است.

جدول ۱۲. حداکثر تعداد تعمیرات در هر سناریو

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
تعداد تعمیرات	۳	۵	۵	۷	۷	۷	۷	۹



شکل ۱۳. نمودار تغییرات حداکثر تعداد تعمیرات در هر سناریو

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا با استفاده از منابع داخلی و خارجی و مقالات علمی، مطالبی در مورد تعمیر و نگهداری و چرخه عمر پل‌ها و هزینه‌های موثر در چرخه عمر گفته شد. سپس با استفاده از مطالعات میدانی و نظر کارشناسان و متخصصین در حوزه پل‌های راه‌آهن، پل (۴۸۰+۳۱۲) در مسیر (زیرآب - شیرگاه) شناسایی شد و انواع خرابی‌ها و احجام آن‌ها و نیز سایر مشخصات مرتبط با این تحقیق بررسی شد و مورد مطالعه قرار گرفت تا مدل ریاضی متناسب با آن نوشته شد. سپس مدل ریاضی مربوط به تحقیق در نرم افزار متلب نوشته شد و از یکی از روش‌های فراابتکاری به دلیل پیچیدگی مساله و همچنین میسر نبودن حل دقیق مساله استفاده شد. این الگوریتم به نام الگوریتم چند هدفه انبوه ذرات است که با حل مساله با آن، به جوابی نزدیک به جواب قطعی خواهیم رسید که همان تعیین دوره بهینه تعمیر و نگهداری است. روند رسیدن به نتایجی که در این تحقیق دریافت شد به این صورت است که: پل راه‌آهن مورد نظر، با یک شاخص به نام شاخص عملکرد با مقدار اولیه در یک پروسه صد ساله تحت سه دسته انواع خرابی مرتبط با نوع سازه پل قرار می‌گیرد و دسته‌های تعمیراتی مرتبط با انواع خرابی‌های پل نیز در نظر گرفته شده است. خرابی‌های یاد شده روی پل اثر منفی می‌گذارد که در اینجا مستقیماً روی معیار اصلی این تحقیق که شاخص عملکرد پل است تاثیر می‌گذارد. با گذشت زمان و با به وجود آمدن یکی از انواع خرابی‌ها روی پل، مقدار اولیه شاخص عملکردی پل کاهش می‌یابد و روند کاهشی تا آنجایی ادامه پیدا می‌کند که در یک زمان مشخص تعمیری، از سه دسته تعمیر مشخص شده و بسته به نوع خرابی روی پل انجام گیرد که خود به خود باعث بالا رفتن سطح شاخص عملکرد می‌شود ولی با وجود انجام تعمیر هیچ وقت مقدار را به مقدار اولیه شاخص نخواهد رساند. با مرور زمان، خرابی دیگری در پل رخ می‌دهد که دوباره باعث کاهش مقدار شاخص می‌شود و این روند نزولی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تعمیری اتفاق بیفتد و مقدار شاخص را افزایش دهد. این روند تا پایان سال صدم همچنان ادامه پیدا می‌کند و در این میان ممکن است چندین بار پل تحت انواع خرابی‌ها قرار گیرد که طی آن تعمیراتی نیز بسته به نیاز انجام می‌پذیرد. این روند کاهش و سپس افزایش مقدار شاخص عملکرد در نموداری نشان داده شده است که با

استفاده از آن زمان به وجود آمدن اولین خرابی در پل و پس از آن زمان شروع اولین برنامه تعمیر و تعیین نوع تعمیر که کدام دسته از دسته‌های سه گانه تعمیر بوده و همچنین هزینه تعمیر انجام گرفته نتیجه‌گیری شد. همچنین با شروع خرابی دیگر در پل و با استفاده از نمودار (تغییر عملکرد پل نسبت به زمان) مدت زمان اثر تعمیر روی پل و مدت به تاخیر افتادن خرابی نیز به عنوان خروجی‌های دیگر دریافت شد. در ادامه دو پارامتر نرخ خرابی (α) و نرخ خرابی در طول اثر ($\delta - \alpha$) به صورت مجزا تحت تحلیل حساسیت قرار گرفت و سناریوهایی برای هر دو پارامتر در نظر گرفته شد که در آن مقدار اولیه این پارامترها با نسبت‌های خاص افزایش پیدا کرد و جواب‌های پارتو برای هر سناریو دریافت شد و سپس حد بالای مجموع هزینه به همراه مجموع عملکرد مرتبط با آن و تعداد تعمیرات آن و همچنین حد پایین مجموع هزینه و مجموع عملکرد و تعداد تعمیرات مربوط به آن دسته‌بندی شد و نمودارهای مربوط به آنها رسم شد. از نمودارهای رسم شده در قسمت تحلیل حساسیت پارامتر نرخ خرابی، اینطور می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نرخ خرابی با یک نسبت مشخص در هر سناریو، مقدار مجموع هزینه افزایش پیدا کرده و به دنبال آن میزان مجموع عملکرد کاهش پیدا می‌کند که با مقایسه میزان تغییرات حد بالا و پایین هزینه با هم و تغییرات حد بالا و پایین مجموع عملکرد در نموداری دیگر، می‌توان به این نتیجه رسید که نوسانات در حد بالا بیشتر بوده است و همچنین تعداد تعمیرات نیز در حد بالا بیشتر انجام شده است در قسمت حساسیت پارامتر نرخ خرابی در طول اثر می‌توان اینگونه تحلیل کرد که بعد از هر نوع خرابی که به وجود می‌آید، تعمیری اتفاق می‌افتد که بعد از گذشت زمان، اثر آن تعمیر از بین می‌رود و دوباره خرابی دیگری رخ می‌دهد که دوباره تعمیر انجام می‌شود و این روند تکرار می‌شود. با توجه به نمودارهای مرتبط با حد بالا و پایین مجموع عملکرد و هزینه در هر سناریو، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان پارامتر نرخ خرابی در طول اثر، مجموع عملکرد سیستم کاهش می‌یابد و همینطور مجموع هزینه افزایش پیدا می‌کند و در نمودار مقایسه‌ای حد بالا با حد پایین، مجموع عملکرد و حد بالا و پایین مجموع هزینه، نوسانات بیشتر در حد بالا روی داده بود و این پارامتر تاثیرگذارتر از پارامتر نرخ خرابی تشخیص داده شد. همچنین چون با هر بار

Journal of Structural Engineering, ASCE, 129(6), pp.818–28.

-Lin, W., Yoda, T., Taniguchi, N., Satake, S., Kasano, H., (2014), "Preventive maintenance on welded connection joints in aged steel railway bridges", Elsevier, journal of constructional steel research, 92, pp.46-54.

-Orcesi, A.D., Frangopol, D.M., Kim, S., (2010), "Optimization of bridge maintenance strategies based on multiple limit states and monitoring", Engineering Structures, 32, pp.627-640.

-Rayal, M.J., (2012), "Bridge Management", 2nd ed., Taylor & Francis

-Robert, D.S., Tiong, L.K., (2005), "Development of life cycle costing framework for highway bridges in Myanmar", International Journal of Project Management, 23(1), pp.37-44.

-Sun, X.Y., Dai, J.G., Wang, H.L., Dong, W.W., Wang, J., (2015), "Decision Support System for Optimizing the Maintenance of RC Girder Bridge Superstructures in Consideration of the Carbon Footprint", ASCE, Journal of Bridge Engineering, 20(12), 04015022

-TaeHoon H. A., Hastak, M., (2007), "Evaluation and determination of optimal MR&R strategies in concrete bridge decks", Automation in Construction, 16, pp.165–175.

-Val, D.V., Stewart, M.G., (2005), "Decision analysis for deteriorating structures", Reliability Engineering and System Safety, 87(3), pp.377-385.

-Zhu, J., Liu, B., (2013), "Performance Life Cost-Based Maintenance Strategy Optimization for Reinforced Concrete Girder Bridges", ASCE, Journal of Bridge Engineering, 18(2), pp.172- 178.

افزایش پارامتر نرخ خرابی در طول اثر در هر سناریو، چون اثر تعمیر بعد از خرابی زودتر از بین می‌رود، تعداد تعمیرات نیز افزایش چشم‌گیری داشته است.

۶-مراجع

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

-Barone, G., Frangopol, D.M., (2014), "Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost", Structural Safety, 48, pp.40–50.

-Barone, G., Frangopol, D.M., Soliman, M., (2014), "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, 140 (2), 04013043.

-Chassiakos, A.P., Vagiotas, P., Theodorakopoulos, D.D., (2005), "A knowledge-based system for maintenance planning of highway concrete bridges", Advances in Engineering Software, 36, pp.740–749.

-Huang, Y.H., Huang, H.Y., (2012), "A model for concurrent maintenance of bridge elements," Automation in Construction, 21, pp.74–80.

-Kong, J.S., Frangopol D.M., (2003), "Life-cycle reliability-based maintenance cost optimization of deteriorating structures with emphasis on bridges",

Optimal Maintenance Period Determination to Minimize Life Cycle Cost of Railway Bridges

*Mohammad Javad Taheri Amiri, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering,
Higher Education Institute of Pardisan, Mazandaran, Iran.*

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

*Farshidreza Haghighi, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Babol
Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.*

Masoumeh Rezaeyan, M.Sc., Grad., Tabari University of Babol, Babol, Iran.

Email: haghighi@nit.ac.ir

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT

The bridges as important links are connected all road networks and railways that a huge investment is needed to build them. In addition, bridges are considered as important points of vital arteries. If the bridges due to old age, exhaustion, overload, weather conditions, natural disasters and etc. destroyed, repair works are much more costly than the budget needed for the maintenance of them. Available budgets for reconstruction and maintenance, usually is not enough to maintain a constant state throughout the lifetime of the bridges. Due to the large number of bridges and high maintenance costs, it is not possible to repair and pay for maintenance of bridges simultaneously. In this study, the life cycle cost is calculated based on maintenance period of railway using multi-objective particle swarm optimization algorithm. Sensitivity analysis, furthermore, is done on deterioration rate and reduction of deterioration rate and effect of these parameters on system performance are analyzed.

Keywords: Railways Bridges, Life Cycle Cost, Optimal Maintenance, Multi-Objective Particle Swarm Optimization