انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری بهینه پلها بر مبنای الگوریتم تصمیم‌گیری چند معیاره و مدل برنامه‌ریزی ریاضی (مطالعه موردی: پلهای استان مازندران)

غلامرضا عبداله زاده (مسئول مکاتبات)، دانشیار ، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
حمید نوروزی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی طبری بابل، بابل، ایران
محمدجواد طاهری امیری، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
فرشیدرضا حقیقی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
E-mail:abdollahzadeh@nit.ac.ir

دریافت: ۹۲/۱۰/۱۶ پذیرش:۹۳/۰۳/۰۷

چکیده:

با توجه به هزینه و اهمیت زیاد پلها در شبکه راههای ارتباطی و نقش استراتژیهای تعمیر و نگهداری در کاهش هزینه‌های جاری پلها، هدف از این تحقیق، انتخاب روش‌های تعمیر و نگهداری بهینه برای مجموعه‌ای از پلها است. در این راستا ابتدا عوامل موثر در ایمنی کاربران، عملکرد و سرعت خرابی پلها شناسایی شدند. سپس وزن عوامل مذکور یا در واقع، میزان تاثیر هریک از این عوامل بر روی ایمنی کاربران، عملکرد و سرعت خرابی پلها به صورت فازی کلامی با نظرات خبرگان و از طریق تکمیل پرسشنامه‌های مربوط ارایه شده است. در ادامه با ارزیابی پلهای استان مازندران نسبت به هر یک از عوامل مذکور، شاخص اولویت و اولویت‌بندی پلها بر اساس نیازشان به تعمیر و نگهداری تعیین گشته است. در نهایت یک مدل برنامه ریزی ریاضی ارائه شده که با توجه به محدودیت بودجه، شاخص اولویت به دست آمده از مراحل قبل، هزینه و اثربخشی روشهای تعمیر و نگهداری تعیین می کند که کدام پلها و با چه روشی درمان شوند. این رویکرد با داده‌های واقعی و شبیه سازی شده، با موفقیت ارزیابی شده است.

واژه‌های کلیدی: پل، تعمیر و نگهداری، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، مدل ریاضی

۱. مقدمه

در بین زیر ساخت‌های بزرگراه‌ها، پلها نقش مهمی در برقراری ارتباطات دارند و یکی از مهم‌ترین شاهرگ‌های ترافیکی بویژه در کلانشهرها هستند. به آسانی می‌توان دریافت که خرابی شدید سازه‌ای و یا تخریب یک پل بخصوص پلهای بزرگراهی، چه آثار زیانباری برای مدیریت کلانِ شهری در پی خواهد داشت. در ضمن، با توجه به ترافیک کلانشهرها، در صورت بروز چنین مشکلاتی، امکان انجام مناسب عملیات تعمیراتی، بسیار سخت و محدود می‌گردد. از دیگر سو، سرمایه‌گذاری اولیه برای ساختن آنها بسیار سنگین است، اما اگر ظرفیت تحمل بار آنها کاهش یابد و یا این پلها فرو ریزند ، هزینه لازم برای بازسازی آنها به‌مراتب بیش از هزینه ساخت خواهد بود. طبق نظر پتروسکی (۱۹۹۵)، پلها نیز به مانند انسانها وقتی به ضرورت سلامتی آنها پی‌برده می‌شود که از دست رفته باشند [Lee et al. 2008]. سیاستگذاران نیز هنگامی متوجه پلها می‌شوند که اکثر آنها از لحاظ سازه‌ای دچار مشکل شده باشند. بنابراین مدیریت تعمیر و نگهداری پلها که یکی از اصلی‌ترین زیرساخت‌های جاده‌ای هر کشور هستند، بسیار مهم است. بنابراین ارائه یک سیستم تصمیم‌گیری برای مدیران شهری به منظور اولویت‌بندی پلها بر اساس نیازشان به تعمیر و نگهداری و انتخاب روش درمان بهینه، امری ضروری است. به تمام فعالیت‌ها در طول عمر پل از ساخت و ساز تا جایگزینی (تعویض)، جهت تأمین ایمنی و عملکرد لازم پلها، مدیریت پل می‌گویند. عمده‌ترین مشکلی که ادارات ترابری با آن مواجه هستند، این است که هزینه نگهداری و تعمیر پلها، بیش از بودجه تخصیص داده شده به آنها است. تعویق فعالیت نگهداری و عدم اولویت‌بندی اعتبار تخصیص داده شده به پروژه‌های تعمیر پل، تنها باعث بدتر شدن این وضع می‌شود. اگر خرابی پل به حدی برسد که برای تحمل بعضی از وسایل نقلیه مناسب نباشد، پل از نظر سازه‌ای معیوب بوده و فاقد ایمنی است. پل هنگامی از نظر عملکردی ناکارآمد به شمار می‌آید که برای سرویس دادن به انواع ترافیک عبوری مناسب نباشد. [Bri-to et al. 1997]، یک نمونه آزمایشی از یک سیستم هوشمند برای مدیریت پلهای بتنی پیشنهاد شده است، این سیستم شامل دو سطح است؛ سطح اول شامل: بازرسی پل و کسب اطلاعات میدانی و سطح دوم شامل: بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت و اولویت‌های تعمیر و نگهداری بر اساس سه معیار تصمیم‌گیری یعنی؛ فوریت بازسازی، اهمیت سازه و حجم ترافیک است. این برنامه به نقص مربوط به خوردگی بتن محدود می‌شد. [Enright and Frangopol, 1999]، یک روش برای تعیین برنامه بازرسی و تعمیر بهینه پلهای جدید و موجود بر اساس حداقل هزینه مورد انتظار در حالی که قابلیت اطمینان در سطح قابل قبولی حفظ شود پیشنهاد شده است. چارچوبی برای برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری بهینه پل در سطح شبکه ارائه شده است که بیشتر هدف این است که هزینه مورد انتظار برای تعمیر و نگهداری پل موجود را کمینه کند، در حالی که قابلیت اطمینان طول عمر هر پل، بالاتر از سطح قابل قبول (هدف) نگه‌داشته شود. [Lee and Kim, 2007]، در پژوهش خود یک الگوریتم برای سیستم مدیریت پل (BMS) جهت اولویت‌بندی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری در سطح شبکه پیشنهاد کردند. در پژوهش مذکور مجموعه‌ای از فعالیت‌های تعمیر و نگهداری به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه مدل شده است و از الگوریتم ژنتیک برای حل آن استفاده گردیده است. آنها در پژوهش خود با استفاده از چند مطالعه موردی، امکان‌پذیر بودن روش پیشنهادی خود را مورد بررسی قرار دادند. [Orcesi and Frangopol, 2011]، رویکردی مبتنی بر احتمالات، به منظور بهینه‌سازی چندمعیاره استراتژی‌های تعمیر و نگهداری پل براساس نظارت بر سلامت سازه (SHM) پیشنهاد نمودند. نظارت بر سلامت سازه (SHM) اطلاعات جدیدی در مورد عملکرد سازه فراهم می‌کند، همان‌طور که مدت زمان نظارت افزایش می‌یابد، اطلاعات اضافی سودمند به دست می‌آید و آگاهی از سازه دقیق‌تر می‌شود، اما هزینه‌های نظارت افزایش می‌یابد. بر اساس درجه دقت نظارت، تصمیم‌های مختلفی می‌توان گرفت، این تصمیم‌گیریها شامل عدم قطعیت‌ها است و در نتیجه بر حسب احتمالات بیان می‌شود. به علت تخصیص بودجه‌های محدود در

امر تعمیر و نگهداری و با توجه به اثربخشی روشهای درمانی، اینکه کدام پلها و با چه روشی تعمیر شوند، بسیار مهم است. تحقیقات پیشین در زمینه اولویت‌بندی پلها بر اساس نیازشان به تعمیر و نگهداری، اثربخشی روشهای درمانی و محدودیت بودجه را به طور همزمان جهت انتخاب روش درمان بهینه برای مجموعه‌ای از پلها در نظر نگرفتند. در این پژوهش برای اولین بار این رویکرد یعنی تعریف رویه‌ای برای شاخص اولویت با استفاده از ترکیب روشهای AHP Fuzzy، مقیاس ترتیبی و ارائه مدل ریاضی جهت تعیین برنامه تعمیر و نگهداری بهینه پلها با استفاده از داده‌های به دست آمده از مراحل قبل (شاخص اولویت) و همچنین انجام مطالعه موردی برای ارایه برنامه تعمیر و نگهداری بهینه پلهای استان مازندران با استفاده از رویه تعریف شده انجام شده است.

۲. هدف و روش تحقیق

هدف از این تحقیق، انتخاب روش‌های تعمیر و نگهداری بهینه برای مجموعه‌ای از پلها با توجه به شاخص اولویت هر پل، محدودیت بودجه، هزینه و اثربخشی روشهای درمانی است. در این راستا ابتدا عوامل موثر در ایمنی کاربران، عملکرد و سرعت خرابی پلها به منظور اولویت‌بندی پلها بر اساس نیازشان به تعمیر و نگهداری، با استفاده از اطلاعات و مدارک موجود در پژوهش‌های انجام شده و مصاحبه با خبرگان مطابق جدول(۲) شناسایی شده‌اند. سپس وزن عوامل مذکور یا در واقع میزان تأثیر هریک از این عوامل بر روی ایمنی کاربران، عملکرد و سرعت خرابی پلها به صورت فازی کلامی با نظرات خبرگان و از طریق تکمیل پرسشنامه‌های مربوط و روش AHP Fuzzy ارائه می‌شود. در ادامه، پلهای استان مازندران نسبت به هر یک از عوامل مذکور ارزیابی می‌شود و شاخص اولویت و اولویت‌بندی پلها بر اساس نیازشان به تعمیر و نگهداری با استفاده از روش مقیاس ترتیبی تعیین می‌گردد. در نهایت یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای دستیابی به دو خواسته متناقضِ، تعمیر حداکثر تعداد پلها و انتخاب روشهای تعمیر و نگهداری با اثربخشی بالا، با توجه به محدودیت بودجه ارائه شده است، تا با استفاده از داده های مراحل قبل، هزینه و اثربخشی روشهای درمانی هر نقص و محدودیت بودجه تعیین شود و تصمیم گرفته شود که کدام پلها، با چه روشی درمان شوند بهینه است. شکل(۱) نمای شماتیک رویکرد کلی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

۳. شناسایی عوامل و تعیین اوزان

به علت تخصیص بودجه‌های محدود در امر تعمیر و نگهداری، اولویت‌بندی پلها که شریانهای اصلی ارتباطات هستند، از نظر فوریت تعمیر و نگهداری، بسیار مهم است. بنابراین در ابتدا رویکرد پیشنهادی به دنبال ارائه یک سیستم به منظور اولویت‌بندی پلها بر اساس نیازشان به تعمیر و نگهداری در یک بازه زمانی است. بنابراین نخست معیارها و زیرمعیارهای مهم در امر اولویت‌بندی شناسایی می‌گردد. سپس وزن عوامل یا در واقع میزان تأثیر هریک از این عوامل بر روی ایمنی کاربران، عملکرد و سرعت خرابی پلها به صورت فازی کلامی با نظرات خبرگان و از طریق تکمیل پرسشنامه‌های مربوط و روش AHP Fuzzy تعیین می‌شود، تا بتوان با توجه به ارزیابی هر پل نسبت به هر یک از معیارها و زیر معیارها فوریت تعمیر و نگهداری آنها را تعیین کرد. پس از تکمیل پرسشنامه‌ها توسط خبرگان و فازی‌سازی عبارت‌های کلامی، اوزان عوامل یاد شده از طریق روش AHP Fuzzy که الگوریتم آن در بخش زیر تعریف شده، مطابق جدول(۲) محاسبه شده است.

شکل ۱. رویکرد حل

۳-۱ الگوریتم فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (AHP Fuzzy) به روش آنالیز توسعه Chang:

این روش از سایر روش‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، ساده‌تر و در ضمن مشابه روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی کلاسیک است. مرحله نخست این الگوریتم، ساخت سلسله مراتب برای مسئله است. در مرحله دوم نیز ماتریس‌های مقایسه زوجی تعیین می‌شود و اعمال قضاوت‌ها صورت می‌پذیرد. در حالت کلاسیک عدد متناظر با ارجحیت‌های زبانی در ماتریس‌های مقایسات زوجی وارد می‌شود، اما در حالت فازی، مقدار متناظر با ارجحیت‌های زبانی را با اعداد فازی مثلثی در ماتریس‌های مقایسات زوجی وارد می‌کنند، برای این منظور می‌توان از جدول (۱) استفاده کرد [Chang, 1996].

این اعداد فازی ارائه شده با مقیاس‌های زبانی معمولی ۱ تا ۹، برابر نیست ؛ اما برای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی مناسب است و مورد استفاده قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که تمامی عناصر روی قطر اصلی ماتریس مقایسه زوجی برابر با (۱،۱،۱) است و در ضمن چنانچه عناصر سطر i ام وستون j ام ماتریس مقایسه زوجی برابر با $M_{gi}^{j}=(l_{ij},m_{ij},u_{ij})$ باشد، عنصر سطر i ام وستون j ام این ماتریس برابر است با:

$$M_{gi}^{j}=\left(M_{gi}^{j}\right)^{-1}=\left((l_{ij},m_{ij},u_{ij})\right)^{-1}=\left(\frac{1}{u_{ij}},\frac{1}{m_{ij}},\frac{1}{l_{ij}}\right) \qquad (۱)$$

مرحله سوم محاسبه وزن‌های نسبی معیارها و زیرمعیارها است . برای محاسبه وزن نسبی زیرمعیارها نسبت به معیار مورد نظر و وزن نسبی معیارها نسبت به هدف، روش آنالیز توسعه Chang برای هر یک از ماتریس‌های زوجی بکار برده شده است؛ بنابراین به ازای هر ماتریس یک بردار وزن نسبی متناظر با آن ماتریس به دست می‌آید.

مرحله چهارم نیز محاسبه وزن نهایی است که از تلفیق اوزان نسبی به دست می‌آید.

٤. ارزیابی پلهای مورد مطالعه نسبت به عوامل ذکر شده

پس از شناسایی عوامل تأثیرگذار بر روی ایمنی کاربران، عملکرد و سرعت خرابی پلها در حالت بهره‌برداری، به بررسی دقیق پارامترهای ذکر شده بر روی پلهای استان مازندران پرداخته شده است. نتایج حاصل که از طریق بازدیدهای میدانی پلها به دست آمده، مطابق جدول شماره (۳) است.

جهت تعیین سطح سرویس پلها، آمار ترافیکی یک ساعته از روی پلهای مورد نظر در ساعات اوج ترافیک عصر گرفته شده است. سطح سرویس محاسبه شده مطابق آئین‌نامه طرح هندسی راه‌ها (نشریه ۱٦۱) در جدول شماره (۳) نشان داده شده است. در این پژوهش فرض شده است که ترافیک عبوری از روی کلیه پلهای محور هراز با یکدیگر، و ترافیک عبوری از پلهای محور فیروزکوه، با هم برابر هستند. همچنین در این پژوهش سطح سرویس‌های A و B به عنوان بار ترافیکی کم، سطح سرویس‌های C و D به عنوان بار ترافیکی متوسط و سطح سرویس‌های E و F به عنوان بار ترافیکی زیاد در نظر گرفته شده است. نقص‌های موجود و

جدول ۱. اعداد فازی متناظر با ارجحیت‌ها در مقایسات زوجی [Chang, 1996]

عبارت زبانی برای تعیین ارجحیت	عدد فازی مثلثی
ارجحیت یا اهمیت کامل و مطلق	(۲/۵، ۳، ۳/۵)
ارجحیت یا اهمیت خیلی قوی‌تر	(۲، ۲/۵، ۳)
ارجحیت یا اهمیت قوی‌تر	(۱/۵، ۲، ۲/۵)
ارجحیت یا اهمیت تقریبا برابر	(۱، ۱/۵، ۲)
ارجحیت یا اهمیت دقیقا برابر	(۱، ۱، ۱)
ارجحیت یا اهمیت کم	(۰/۵، ۱، ۱/۵)

جدول ۲. اوزان عوامل موثر در ایمنی کاربران، عملکرد و سرعت خرابی پلها

معیارها	وزن	زیر معیارها	وزن
نقص های موجود	۰/۳٦٦	فرسودگی سطح	۰/۱
		فرسایش پی	۰/۲۰۵
		آسیب یا جابجایی تکیه‌گاه	۰/۱۳۲
		خرابی درز انبساط	۰/۰۷۵
		ترک خوردگی	۰/۱۵۳
		خرابی سیستم زهکشی عرشه	۰/۰٤۵
		پوسته، قلوه کن شدن	۰/۱۸۸
		آسیب نرده (جان پناه)	۰/۱۰۲
شرایط محیطی	۰/۱۸۵	معتدل و مرطوب	۰/۳۲۲
		گرم و خشک	۰/۲۱۱
		سرد و کوهستانی	۰/٤٦۷
خصوصیات بستر رودخانه	۰/۱٦٤	جریان آرام – شیب کم	۰/٤٤۷
		جریان سریع – شیبدار	۰/۵۵۳
بار ترافیکی	۰/۲۱۵	بار ترافیکی زیاد(بیشتر از ظرفیت هر خط عبوری)	۰/٤۱۸
		بار ترافیکی متوسط(برابر با ظرفیت هر خط عبوری)	۰/۳۳٤
		بار ترافیکی کم(کمتر از ظرفیت هر خط عبوری)	۰/۲٤۸
سن پل	۰/۰۷	کمتر از ۲۰ سال	۰/۳۹۷
		بین ۲۰ تا ۵۰ سال	۰/۳٦۱
		بیش از ۵۰ سال	۰/۲٤۲

شدت خرابی در پلهای مورد نظر نیز از طریق بازدیدهای میدانی پلها و با استفاده از نظر کارشناسان بیان شده است.

۵. روش مقیاس ترتیبی

قبل از پیدایش روش‌های داده‌کاوی، برای تحلیل داده‌ها و نتیجه‌گیری از آنها، از روش‌های ساده و مختلفی استفاده می‌شده است که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های آماری اشاره کرد. این روش‌ها به دلیل سادگی محبوبیت زیادی دارند و همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین روش‌های آماری، مقیاس ترتیبی است. اندازه‌گیری با مقیاس ترتیبی به این معناست که اعداد بزرگ تر نشان دهندهٔ ارزش و اهمیت بیشتر هستند. هنگامی که آیتم‌ها، با توجه به اینکه مقدار بیشتر یا کمتری از یک ویژگی را دارند، طبقه‌بندی می‌شوند، مقیاس مورد استفاده، مقیاس ترتیبی است [Hassan et. al. 2012].

در این پژوهش پس از محاسبه اوزان عوامل و ارزیابی پلها نسبت به هر یک از این عوامل، از روش مقیاس ترتیبی برای تعیین شاخص اولویت هر پل براساس نقص‌های موجود و سایر عوامل جهت کاربرد در مدل برنامه‌ریزی ریاضی استفاده شده است. برای این منظور نیز از رابطه (۲)، استفاده می‌شود.

$$d(j)=\sum_i w_i r_{ij} \qquad (۲)$$

نحوه محاسبهٔ شاخص اولویت پل j ام، در رابطه (۱۱) بیان شده است که در این رابطه w_i نشان‌دهندهٔ وزن معیار iام و r_{ij} نشان‌دهندهٔ وزن زیرمعیار مربوط به معیار i برای پل j است که با ضرب w_i در r_{ij} وزن هر معیار با توجه به پل موردنظر به دست می‌آید و مجموع این اوزان بیان کنندهٔ شاخص اولویت (d) برای پل j است.

جدول ۳. ارزیابی پلهای مورد نظر نسبت به عوامل ذکر شده

شماره پل	پل	سن پل	بار ترافیکی		خصوصیات بستر رودخانه	شرایط محیطی	نوع نقص	شدت خرابی
			مقدار $\frac{V}{C}$	سطح سرویس				
۱	تالار۱	بین ۲۰ تا ۵۰ سال	۰/۸۰۲	D	جریان سریع-شیب زیاد	معتدل و مرطوب	پوسته، قلوه کن شدن	زیاد
۲	تالار۲	بین ۲۰ تا ۵۰ سال	۰/۷۶۵	C	جریان سریع-شیب زیاد	معتدل و مرطوب	فرسودگی سطح پوسته، قلوه کن شدن	کم زیاد
۳	تجن۱	کمتر از ۲۰ سال	۰/۷۸۳	C	جریان آرام-شیب کم	معتدل و مرطوب	خرابی درز انبساط	متوسط
٤	تجن۲	کمتر از ۲۰ سال	۰/۸۵۷	D	جریان آرام-شیب کم	معتدل و مرطوب	فرسودگی سطح	کم
۵	گزنک	بیش از ۵۰ سال	۱/۱۲۷	F	-	سرد و کوهستانی	فرسودگی سطح خرابی‌سیستم‌زهکشی	متوسط کم
٦	وانا	بیش از ۵۰ سال	۱/۱۲۷	F	جریان سریع-شیب زیاد	سرد و کوهستانی	فرسودگی سطح پوسته، قلوه کن شدن	زیاد متوسط
۷	شیطان	بیش از ۵۰ سال	۱/۱۲۷	F	-	سرد و کوهستانی	فرسودگی سطح خرابی‌سیستم‌زهکشی آسیب نرده	زیاد متوسط متوسط
۸	گروازمال	بیش از ۵۰ سال	۱/۱۲۷	F	جریان سریع-شیب زیاد	سرد و کوهستانی	خرابی درز انبساط ترک خوردگی	متوسط متوسط
۹	ورسک	بین ۲۰ تا ۵۰	۰/۸۲٦	D	جریان آرام-شیب کم	سرد و کوهستانی	فرسودگی سطح خرابی‌سیستم‌زهکشی	کم متوسط
۱۰	طالع	بین ۲۰ تا ۵۰	۰/۸۲٦	D	جریان آرام-شیب کم	سرد و کوهستانی	پوسته، قلوه کن شدن فرسودگی سطح	زیاد زیاد
۱۱	محمدحسن‌خان	کمتر از ۲۰ سال	۰/٦۹	C	جریان آرام-شیب کم	معتدل و مرطوب	خرابی درز انبساط	کم
۱۲	خشکه آبندان۱	کمتر از ۲۰ سال	۰/٦۷۵	C	-	معتدل و مرطوب	خرابی درز انبساط	زیاد
۱۳	خشکه آبندان۲	کمتر از ۲۰ سال	۰/۷۹۸	C	-	معتدل و مرطوب	فرسودگی سطح	کم

٦. تعیین شاخص اولویت پلها

در جدول (٤) وزن معیارها و زیرمعیارها جهت تعیین شاخص اولویت هر پل بر اساس نقص‌های موجود بیان شده است. با توجه به اینکه در تعیین شاخص اولویت، پلها بر اساس نوع نقص رتبه‌بندی می‌گردند، بنابراین پلهایی که دارای بیش از یک نقص هستند (به عنوان نمونه پل شماره ۲)، به تعداد نقص‌هایشان تحت عنوان پلهای جداگانه شناخته می‌شوند (پل شماره ۲ که دارای دو نقص است، در جدول (٤) به صورت دو پل با نام‌های ۲-۱ و ۲-۲ به نمایش در آمده‌اند). با این کار اوزان پلهایی که بیش از یک نقص دارند تنها در ستون وزن نقص‌های موجود متفاوتند. علت تفکیک شاخص اولویت پلها بر اساس نوع نقص، صرفاً جهت کاربرد در مدل برنامه‌ریزی ریاضی است.

در جدول (۵) شاخص اولویت و اولویت‌بندی هر پل بر اساس نیاز به تعمیر و نگهداری جهت کاربرد در مدل برنامه‌ریزی ریاضی به منظور انتخاب روش تعمیر و نگهداری بهینه برای پلهای مورد مطالعه، با استفاده از روش مقیاس ترتیبی تعیین شده است.

۷. مدلسازی مساله انتخاب روش تعمیر و نگهداری بهینه پلها

برای حل مساله مذکور به منظور بیشینه‌سازی مطلوبیت (نسبت عمر به هزینه) با در نظر گرفتن محدودیت بودجه، در این پژوهش به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی پرداخته شده است.اندیس‌ها و نمادگذاری بکار رفته در این مدل به شرح زیر است:

۷-۱ اندیس‌ها

j اندیس مربوط به هر پل $(j = 1, \dots, n)$

جدول ٤. اعمال وزن‌ها برای هر پل

معیار	شرایط محیطی		بارترافیکی		خصوصیات بستر رودخانه		نقص‌های موجود				سن پل	
شماره پل	وزن معیار	وزن زیرمعیار	وزن معیار	وزن زیرمعیار	وزن معیار	وزن زیرمعیار	وزن معیار	وزن زیرمعیار	شدت خرابی	وزن معیار	وزن زیرمعیار
۱	۰/۱۸۵	۰/۳۲۲	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰/۵۵۳	۰/۳٦٦	۰/۱۸۸	۰/۷	۰/۰۷	۰/۳٦۱
۱-۲	۰/۱۸۵	۰/۳۲۲	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰/۵۵۳	۰/۳٦٦	۰/۱	۰/۳	۰/۰۷	۰/۳٦۱
۲-۲	۰/۱۸۵	۰/۳۲۲	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰/۵۵۳	۰/۳٦٦	۰/۱۸۸	۰/۷	۰/۰۷	۰/۳٦۱
۳	۰/۱۸۵	۰/۳۲۲	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰/٤٤۷	۰/۳٦٦	۰/۰۷۵	۰/۵	۰/۰۷	۰/۳۹۷
٤	۰/۱۸۵	۰/۳۲۲	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰/٤٤۷	۰/۳٦٦	۰/۱	۰/۳	۰/۰۷	۰/۳۹۷
۵-۱	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/٤۱۸	۰/۱٦٤	۰	۰/۳٦٦	۰/۱	۰/۵	۰/۰۷	۰/۳۹۷
۵-۲	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/٤۱۸	۰/۱٦٤	۰	۰/۳٦٦	۰/۰٤۵	۰/۳	۰/۰۷	۰/۲٤۲
٦-۱	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/٤۱۸	۰/۱٦٤	۰/۵۵۳	۰/۳٦٦	۰/۱	۰/۷	۰/۰۷	۰/۲٤۲
٦-۲	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/٤۱۸	۰/۱٦٤	۰/۵۵۳	۰/۳٦٦	۰/۱۸۸	۰/۵	۰/۰۷	۰/۲٤۲
۷-۱	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/٤۱۸	۰/۱٦٤	۰	۰/۳٦٦	۰/۱	۰/۷	۰/۰۷	۰/۲٤۲
۷-۲	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/٤۱۸	۰/۱٦٤	۰	۰/۳٦٦	۰/۰٤۵	۰/۵	۰/۰۷	۰/۲٤۲
۸-۱	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/٤۱۸	۰/۱٦٤	۰/۵۵۳	۰/۳٦٦	۰/۱۰۲	۰/۵	۰/۰۷	۰/۲٤۲
۸-۲	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/٤۱۸	۰/۱٦٤	۰/۵۵۳	۰/۳٦٦	۰/۰۷۵	۰/۵	۰/۰۷	۰/۲٤۲
۸-۳	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/٤۱۸	۰/۱٦٤	۰/۵۵۳	۰/۳٦٦	۰/۱۵۳	۰/۵	۰/۰۷	۰/۲٤۲
۹-۱	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰/٤٤۷	۰/۳٦٦	۰/۱۳۲	۰/۳	۰/۰۷	۰/۳٦۱
۹-۲	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰/٤٤۷	۰/۳٦٦	۰/۰٤۵	۰/۵	۰/۰۷	۰/۳٦۱
۱۰-۱	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰/٤٤۷	۰/۳٦٦	۰/۱۸۸	۰/۷	۰/۰۷	۰/۳٦۱
۱۰-۲	۰/۱۸۵	۰/٤٦۷	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰/٤٤۷	۰/۳٦٦	۰/۱	۰/۷	۰/۰۷	۰/۳٦۱
۱۱	۰/۱۸۵	۰/۳۲۲	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰/٤٤۷	۰/۳٦٦	۰/۰۷۵	۰/۳	۰/۰۷	۰/۳۹۷
۱۲	۰/۱۸۵	۰/۳۲۲	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰	۰/۳٦٦	۰/۰۷۵	۰/۷	۰/۰۷	۰/۳۹۷
۱۳	۰/۱۸۵	۰/۳۲۲	۰/۲۱۵	۰/۳۳٤	۰/۱٦٤	۰	۰/۳٦٦	۱	۰/۳	۰/۰۷	۰/۳۹۷

K اندیس مربوط به روش درمان

$K(j)$ اندیس مربوط به مجموعه‌ای از درمانهای امکانپذیر برای پل j

A اندیس مربوط به گروهی از پلهاست که به تعمیر نیاز دارند.

۷-۲ پارامترها

d_j شاخص اولویت مربوط به هر پل بر اساس نقص آن، با استفاده از تلفیق روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و مقیاس ترتیبی

a_{jk} نسبت عمر به هزینه (اثربخشی) مربوط به استفاده از روش درمان kام برای پل jام

C_{jk} هزینه استفاده از روش درمان kام برای پل jام

g یک ضریب وزنی است.

B میزان بودجه در دسترس است.

۷-۳ متغیرهای تصمیم

y_{jk} مساوی است با یک اگر روش درمان kام برای پل jام انتخاب گردد و در غیر اینصورت صفر است.

y_{total} تعداد کل درمانهایی که انجام می‌شود.

$$\max\ imise\left(\sum_{j\in A}\sum_{K\in K(j)} d_j a_{jk} y_{jk} + g y_{total}\right) \qquad (۳)$$

Subject to

$$\sum_{j\in A}\sum_{K\in K(j)} c_{jk} y_{jk} \le B \qquad (٤)$$

$$y_{total} = \sum_{j\in A}\sum_{K\in K(j)} y_{jk} \qquad (۵)$$

$$\sum_{K\in K(j)} y_{jk} \le 1 \quad , \quad \forall_j \in A \qquad (٦)$$

$$y_{jk} = 0/1 \quad , \quad \forall_j \in A \quad , \quad \forall_k \in k(j) \qquad (۷)$$

این مدل با هدف بیشینه‌سازی ارزش برنامه تعمیر و نگهداری ارائه شده است و بر حسب میزان هزینه، هدف آن اثربخشی روش‌های

جدول ۵. نتایج اعمال وزن‌ها

شماره پل	نوع نقص	شاخص اولویت (d_j)	اولویت بندی
۱	قلوه کن شدن	۰/۲۹۵۵	۷
۱–۲	فرسودگی سطح	۰/۲۵۸۳	۱۳
۲–۲	قلوه کن شدن	۰/۲۹۵۵	۷
۳	خرابی درز انبساط	۰/۲٤٦۲	۱٤
٤	فرسودگی سطح	۰/۲٤۳۵	۱۵
۱–۵	فرسودگی سطح	۰/۲۱۱۵	۱۸
۲–۵	خرابی سیستم زهکشی	۰/۱۹۸۱	۲۰
۱–٦	فرسودگی سطح	۰/۳۰۹۵	۳
۲–٦	قلوه کن شدن	۰/۳۱۸۳	۱
۱–۷	فرسودگی سطح	۰/۲۱۸۸	۱۷
۲–۷	خرابی سیستم زهکشی	۰/۲۰۱٤	۱۹
۱–۸	آسیب نرده	۰/۳۰۲٦	۵
۲–۸	خرابی درز انبساط	۰/۲۹۷٦	٦
۳–۸	ترک خوردگی	۰/۳۱۱۹	۲
۱–۹	فرسودگی سطح	۰/۲۷۳۱	۱۰
۲–۹	خرابی سیستم زهکشی	۰/۲٦۵۰	۱۲
۱–۱۰	قلوه کن شدن	۰/۳۰۵۰	٤
۲–۱۰	فرسودگی سطح	۰/۲۸۲٤	۹
۱۱	خرابی درز انبساط	۰/۲٤۰۷	۱٦
۱۲	خرابی درز انبساط	۰/۱۷۸٤	۲۱
۱۳	فرسودگی سطح	۰/۲٦۹۰	۱۱

درمانی و تعداد مواردی است که تحت درمان قرار دارند.

ضریب وزنی g به منظور قادر ساختن کاربران جهت تعیین اهمیت نسبی اهداف متناقض (استفاده از درمانهای با اثربخشی بالا در مقابل تعمیر پلهای بیشتر) بکار گرفته شده است. مقادیر کم g منجر به کاربرد درمانهای با هزینه و اثربخشی بالا برای تعداد محدودی از پلها با اولویت تعمیر و نگهداری بالا می‌شود، از طرفی دیگر، مقادیر زیاد g منجر به تعمیر تعداد زیادی از پلها بر اساس لیست اولویت می‌شود، اما، درمانهای با هزینه و اثربخشی کم انتخاب می‌شوند.

با توجه به محدودیت‌های مدل، رابطه (٤) نشان‌دهنده محدودیت بودجه در دسترس است، رابطه (۵) بیان کننده تعداد کل پلهایی است که مورد تعمیر قرار می‌گیرند و رابطه (٦) تضمین می‌کند که برای هر نقص تنها یک روش درمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این مدل به ارائه یک برنامه تعمیر و نگهداری بر اساس شاخص اولویت مربوط به هر پل و با در نظر گرفتن محدودیت بودجه در دسترس، به‌منظور بیشینه کردن اثربخشی درمان و تعداد پلهایی که تحت درمان قرار می‌گیرند می‌پردازد.

با حل مدل می‌توان دریافت که در تمامی موارد، تخصیص منابع از موارد پل با اولویت بالا شروع می‌شود. برای مقادیر کم g (در مقایسه با متوسط

a_{jk})، تعداد محدودی از پلها درمان می‌شوند، اما درمانها با اثربخشی (و هزینه) بالا انتخاب می‌شوند. از طرفی دیگر برای مقادیر زیاد g، حداکثر تعداد ممکن از موارد پلها درمان می‌شوند، اما درمانهای با اثربخشی (و هزینه) کمتر انتخاب می‌شوند. نتایج حاصل از جواب‌ها برای مقادیر متوسط g (در مقایسه با متوسط ajk) با توجه به تعداد پلهایی که تعمیر می‌شوند و اثر بخشی درمانهای انتخاب شده متعادل‌ترند.

۸. روش‌های درمانی

در این بخش روش‌های تعمیر و نگهداری امکان پذیر هر نقص به صورت خلاصه در جدول (٦) بیان شده است.

جدول ٦. روش‌های تعمیر و نگهداری

نوع نقص		روش و مواد تعمیر
پوسته‌شدگی	۱	از یک لایهٔ نازک ملات وصلهٔ اپوکسی برای آب‌بندی ناحیه و جلوگیری از نفوذ آب به فولاد تقویتی می‌توان استفاده کرد.
	۲	از سیمآنهای خاص زودگیر و بتن پرسیمان با اسلامپ کم نیز برای این تعمیرات استفاده می‌شود.
قلوه‌کن شدن	۱	وصله: می‌توان از هر دو مادهٔ سیمان پرتلند با گیرش کنترل شده و بتن با ضریب سیمان بالا، تحت شرایط کنترل شدهٔ اختلاط و استانداردهای بتن‌ریزی استفاده کرد.
	۲	روکش کردن: این روش تعمیر نیز از دو راه اجرا می‌شود: (۱) چسباندن ملات یا بتن صلب سیمان پرتلند با نسبت پایین آب به سیمان و حداکثر ۲/۵ سانتی‌متر اسلامپ؛ (۲) چسباندن ملات یا بتن سیمان پرتلند که لاتکس مایع هم به آن افزوده شده است.
	۳	تعویض: راه دیگر تصحیح، برداشتن و تعویض تمام روکش است.
ترک‌خوردگی	۱	تزریق اپوکسی.
	۲	تزریق پلیمر.
	۳	همچنین می‌توان بتن را به اندازهٔ کافی برداشت تا عمق آزاد بیشتری فراهم شود و وصله‌ای با عمق بیشتر با استفاده از بتن اصلاح شده با لاتکس (LMC) که این نوع بتن مقاومت اولیه، مقاومت خستگی و دوام بالا را داراست، اجرا کرد.
فرسودگی سطح	۱	تمیز کردن ترک‌ها و پر کردن آنها با امولسیون دوغاب یا مخلوطی از آسفالت مایع و ماسه.
	۲	برداشتن سطوح ناسالم به صورت مقطع مربعی یا مستطیلی از رویه تا عرشه و پر کردن آن با آسفالت داغ.
	۳	برداشتن تمامی سطوح از رویه تا عرشه و ریختن آسفالت و فشردن آن با غلتک.
خرابی سیستم زهکشی	۱	تمیز کردن سیستم تخلیه آب عرشه با استفاده از فشار آب یا میلهٔ گمانه زنی.
	۲	تعویض سیستم‌های زهکشی که آسیب دیده‌اند و یا کوتاه هستند.
آسیب نرده	۱	تعمیر نرده‌های فولادی با صافکاری، جوش قطعات و سپس رنگ‌آمیزی و گالوانیزه کردن آن.
	۲	تعویض نرده‌های آسیب دیده با نرده‌های جدید.
خرابی درز انبساط	۱	شستشوی درز و تمیز کردن آن از آشغال و نخاله.
	۲	پیچ و پرچ‌های شل درز باز و دوباره تنظیم شود و بتن خراب شده عرشه در محل‌درز با مخلوط بتن کم انقباض تعویض گردد.
	۳	درز دوباره ساخته شود (یعنی بتن کهنه برداشته شود، تسمه‌های اضافی و یا جدید در محل جوش شوند).
فرسایش پی	۱	در صورتی که پی در آب قرار داشته باشد بایستی به وسیلهٔ کانال‌های انحراف یا فرازبند موقت آب را از محل کار دور کرد، سپس بتن ناسالم تا رسیدن به بتن سالم برداشته شود و اگر نصب مهارها و میله‌های تقویتی لازم است، آنها نصب شوند و سپس قالب بر اساس اندازه‌های طرح اصلی پی تهیه شود. در نهایت بتن جدید دارای طرح اختلاط خوب قوی، با اسلامپ کم، در قالب ریخته شود.
	۲	همچنین می‌توان تعمیرات فوق را با استفاده از روش شاتکریت انجام داد.
جابجایی یا آسیب تکیه‌گاه	۱	تعویض مصالح تجزیه شده در نزدیک تکیه‌گاه.
	۲	علاوه بر تعویض مصالح خراب، تکیه‌گاه تنظیم و قسمتی از تیر و تکیه‌گاه تقویت شود.
	۳	تعویض تکیه‌گاه که این امر نیز نیاز به تکیه‌گاه موقتی مناسب دارد.
	٤	تعویض تکیه‌گاه وتقویت قسمتی از تیر.

۹. هزینه اثربخشی روش‌های تعمیر و نگهداری پلهای مورد مطالعه

با توجه به نقص‌های موجود، نظر کارشناسان و قیمت واحد روش‌های تعمیر و نگهداری، هزینه و اثربخشی (نسبت عمر به هزینه) روش‌های درمانی پلهای مورد مطالعه در جدول (۷) بیان شده است. همچنین در این پژوهش امکان پذیری روش‌های تعمیر و نگهداری پلها با توجه میزان خرابی و نظر کارشناسان در نظر گرفته شده است.

جدول ۷. هزینه و اثربخشی روش‌های درمانی

شماره پل (j)	نوع نقص	روش‌های درمانی (k)	هزینه (میلیون تومان) (c_{jk})	نسبت عمر/هزینه (a_{jk})
		۱	۲	۱
۱	قلوه کن شدن	۲	۳/۲	۰/۹٤
		۳	٤	۱/۲۵
		۱	۲/۷	۰/۳۷
۱-۲	فرسودگی سطح	۲	۵/۲۵	۰/۵۷
		۳	۷/۵	۰/۸
		۱	۱/۲۵	۱/٦
۲-۲	قلوه کن شدن	۲	۲	۱/۵
		۳	۲/۵	۲
		۱	۱/۸	۰/۳۳
۳	خرابی درز انبساط	۲	٦/٤۸	۰/٤٦
		۳	۱۲/٦	۰/٤۸
		۱	۰/۲۲٤	٤/٤٦
٤	فرسودگی سطح	۲	۲	۱/۵
		۳	۲/۸	۲/۱٤
		۱	۰/۳۳٦	۲/۹۸
۱-۵	فرسودگی سطح	۲	۳	۱
		۳	٤/۲	۱/٤۳
۲-۵	خرابی سیستم زهکشی	۱	۱/۲	۰/۵
		۲	۳/۵	۱/٤۳
		۱	×	×
۱-٦	فرسودگی سطح	۲	۵	۰/٦
		۳	۷	۰/۸٦
		۱	۳	۰/٦۷
۲-٦	قلوه کن شدن	۲	٤/۸	۰/٦۳
		۳	٦	۰/۸۳
		۱	×	×
۱-۷	فرسودگی سطح	۲	٦/۲۵	۰/٤۸
		۳	۷/۵	۰/۸

ادامه جدول ۷. هزینه و اثربخشی روش‌های درمانی

شماره پل (j)	نوع نقص	روش‌های درمانی (k)	هزینه (میلیون تومان) (c_{jk})	نسبت عمر/هزینه (a_{jk})
۲-۷	خرابی سیستم زهکشی	۱	۰/٦	۱
		۲	۱/۸	۲/۷۸
۱-۸	آسیب نرده	۱	٤/٥	۰/٦۷
		۲	۹	۰/٥٥
۲-۸	خرابی درز انبساط	۱	۱/۸	۰/۳۳
		۲	٦/٤۸	۰/٤٦
		۳	۱۲/٦	۰/٤۸
۳-۸	ترک خوردگی	۱	۷/۲	۰/۲۸
		۲	۸/۱	۰/۲٥
		۳	٦/۳	۰/٦۳
۱-۹	فرسودگی سطح	۱	×	×
		۲	۲/۲٥	۱/۳۳
		۳	۳/۱٥	۱/۹
۲-۹	خرابی سیستم زهکشی	۱	۱/۱	۰/٥٤
		۲	۳/۳	۱/٥۱
۱-۱۰	قلوه کن شدن	۱	٤/۲٥	۰/٤۷
		۲	٦/۸	۰/٤٤
		۳	۸/٥	۰/٥۹
۲-۱۰	فرسودگی سطح	۱	×	×
		۲	۷	۰/٤۳
		۳	۹/۸	۰/٦۱
۱۱	خرابی درز انبساط	۱	۰/۹	۰/٦۷
		۲	۳/۲٤	۰/۹۳
		۳	٦/۳	۰/۹٥
۱۲	خرابی درز انبساط	۱	×	×
		۲	۳/۹٦	۰/۷٦
		۳	۷/۷	۰/۷۸
۱۳	فرسودگی سطح	۱	۰/۲۸	۳/٥۷
		۲	۲/٥	۱/۲
		۳	۳/٥	۱/۷۱

۱۰. انتخاب روش تعمیر و نگهداری بهینه

با استفاده از شاخص اولویت حاصل از تلفیق روش‌های AHP Fuzzy و مقیاس ترتیبی که در جدول شماره (٥) و هزینه و اثربخشی روش‌های درمانی که در جدول شماره (۷) بیان شده است و وارد نمودن آنها در مدل ریاضی، با فرض اینکه مقدار بودجه در دسترس (B) برابر با ٥۰ درصد مجموع گران ترین روش‌های درمانی یعنی ٦۱/۱۲٥ میلیون تومان و مقدار ضریب ثابت (g) برابر با متوسط a_{jk} ها یعنی ۱/۰۷ و حل مدل با استفاده نرم‌افزار تحقیق در عملیات GAMS برنامه تعمیر و نگهداری بهینه حاصله به شرح زیر است. شکل(۲) پیاده‌سازی مدل ارائه شده در نرم‌افزار تحقیق در عملیات GAMS را نشان می‌دهد.

```
parameter
d(j),a(j,k),c(j,k);


$CALL GDXXRW.EXE moredi.xlsx  par=d rng=sheet1!W6:X28 Rdim=1  par=a
$GDXIN  moredi.gdx
$LOAD  d,a,c
$GDXIN

binary variables
y(j,k)    ;

positive variables
yt ;

scalars

g Averageofa /1.07/

B budjet /61.125/    ;


variable o the objectiv function value;

equations

cost objecive function
Eq1
Eq2
Eq3(j) ;

cost  ..  o=e= sum((j,k),d(j)*a(j,k)*y(j,k))+ g*yt                ;
Eq1 .. sum((j,k),c(j,k)*y(j,k))=l=B;
Eq2 .. yt=e=sum((j,k),y(j,k));
```

شکل ۲. پیاده‌سازی مدل در نرم‌افزار GAMS

روش‌های تعمیر و نگهداری انتخاب شده در جداول (۸)، (۹) و (۱۰)، نتایج حاصل از حل مدل توسط نرم‌افزار تحقیق در عملیات GAMS با توجه به شاخص اولویت هر پل، مقدار بودجه در دسترس، اثربخشی، هزینه روش‌های درمانی و با هدف بیشینه‌سازی مطلوبیت (نسبت عمر به هزینه) را نشان می دهند. در حالتی که ضریب ثابت (g) برابر با مقداری کمتر از متوسط اثربخشی روش‌های درمانی(a_{jk})، یعنی ۰/۱ در نظر گرفته شد، روش‌های درمانی با اثربخشی بالا که دارای هزینه بیشتری هستند، انتخاب شده است، در نتیجه با توجه به محدودیت بودجه، در این حالت تعداد نقصهای کمتری درمان شدند. در حالتی که مقدار (g) برابر با متوسط اثربخشی روش‌های درمانی یعنی ۱/۰۷ است تعادل بین دو خواسته متناقصِ تعمیر حداکثر تعداد پل ها و انتخاب روش‌های درمانی با اثربخشی بالا برقرار شده و روش‌های درمانی بهینه انتخاب می‌شوند. همچنین در حالتی که ضریب ثابت (g) برابر با مقداری بیشتر از متوسط اثربخشی روش‌های درمانی(a_{jk})، یعنی۲ در نظر گرفته شود، روش‌های درمانی با اثربخشی کمتر که دارای هزینه کمتری هستند، انتخاب می‌شوند، در نتیجه با توجه به محدودیت بودجه، در این حالت تعداد نقص‌های بیشتری درمان می شوند، اما در این پژوهش به دلیل اینکه مقدار بودجه در دسترس، برای درمان تمامی نقص‌ها (در حالتی که مقدار (g) برابر با متوسط اثربخشی روش‌های درمانی یعنی ۱/۰۷ باشد) کافی بود، تفاوتی بین حالتی که مقدار (g) برابر با متوسط (a_{jk}) و بیشتر از متوسط (a_{jk}) بود، ایجاد نشده است.

جدول ۸. نتایج حاصل از حل مدل (g=۲)

شماره پل	روش درمان انتخابی توسط GAMS
۱	۱
۱-۲	۱
۲-۲	۳
۳	۱
٤	۳
۱-۵	۱
۲-۵	۱
۱-٦	۲
۲-٦	۱
۱-۷	۲
۲-۷	۲
۱-۸	۱
۲-۸	۱
۳-۸	۳
۱-۹	۳
۲-۹	۱
۱-۱۰	۱
۲-۱۰	۲
۱۱	۱
۱۲	۲
۱۳	۱

جدول ۹. نتایج حاصل از حل مدل (g=۱/۰۷) (حالت بهینه)

شماره پل	روش درمان انتخابی توسط GAMS
۱	۱
۱-۲	۱
۲-۲	۳
۳	۱
٤	۳
۱-۵	۱
۲-۵	۱
۱-٦	۲
۲-٦	۱
۱-۷	۲
۲-۷	۲
۱-۸	۱
۲-۸	۱
۳-۸	۳
۱-۹	۳
۲-۹	۱
۱-۱۰	۱
۲-۱۰	۲
۱۱	۱
۱۲	۲
۱۳	۱

جدول ۱۰. نتایج حاصل از حل مدل (g=۰/۱)

شماره پل	روش درمان انتخابی توسط GAMS
۱	۳
۱-۲	۳
۲-۲	۳
۳	۱
٤	۳
۱-۵	۱
۲-۵	۲
۱-٦	۳
۲-٦	۱
۱-۷	–
۲-۷	۲
۱-۸	۱
۲-۸	۱
۳-۸	۳
۱-۹	۳
۲-۹	۲
۱-۱۰	۱
۲-۱۰	–
۱۱	۱
۱۲	۲
۱۳	۱

به عنوان نمونه برای پل شماره ۵-۲ در حالتی که g کوچک‌تر از متوسط (a_{jk}) باشد، روش درمان ۲ با اثربخشی ۱/٤۳ انتخاب شده است و در حالتی که g برابر و یا بیشتر از متوسط (a_{jk}) باشد، روش درمان ۱ با اثربخشی ۰/۵ انتخاب شده است. همچنین برای پل شماره ۱-۷ در حالتی که g کوچک تر از متوسط (a_{jk}) باشد، هیچ روش درمانی انتخاب نشده و در حالتی که g برابر و یا بیشتر از متوسط (a_{jk}) باشد، روش درمان ۲ با اثربخشی ۰/٤۸ انتخاب شده است.

۱۱. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از منابع داخلی و خارجی و مقالات علمی، مطالب کافی در مورد تعمیر و نگهداری پلها شناسایی شد. سپس با استفاده از مطالعات میدانی و مصاحبه با متخصصین امر، به شناسایی معیارهای مؤثر در ایمنی کاربران، عملکرد و سرعت خرابی پلهای مورد مطالعه اقدام گردید. پس از شناسایی معیارها و تحلیل پاسخ آنها با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره AHP Fuzzy، به بررسی دقیق هر یک از پلها نسبت به هر یک از

عوامل پرداخته شده است. سپس شاخص اولویت و اولویت‌بندی هر یک از پلها بر اساس نقص‌های موجود به منظور کاربرد در مدل برنامه‌ریزی ریاضی، با استفاده از روش مقیاس ترتیبی تعیین گردید. در نهایت با حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی توسط نرم‌افزار تحقیق در عملیات GAMS، که با هدف بیشینه سازی مطلوبیت (نسبت عمر به هزینه) در این پژوهش ارائه شده است، روش تعمیر و نگهداری بهینه برای هر پل با توجه به شاخص اولویت هر پل، میزان بودجه در دسترس و اثربخشی روش‌های درمانی انتخاب شد.

۱- با توجه به بررسی‌های به عمل آمده و نظر کارشناسان به منظور گزینش عوامل تاثیرگذار بر ایمنی کاربران، عملکرد و سرعت خرابی پلها معیارهای نقص‌های موجود و بار ترافیکی به ترتیب با وزن‌های ۰/۳٦٦ و ۰/۲۱۵ قبل از معیارهایی همچون شرایط محیطی، خصوصیات بستر رودخانه و سن پل با اوزان ۰/۱۸۵، ۰/۱٦٤ و ۰/۰۷ جهت تعیین شاخص اولویت پلها در نظر گرفته می‌شوند.

۲- نتایج حاصل نشان می‌دهند که پس از تلفیق دیدگاه کارشناسان نسبت به عوامل تأثیرگذار بر ایمنی کاربران، عملکرد و سرعت خرابی پلها با ارزیابی پلهای موردنظر نسبت به هریک از عوامل و استفاده از روش مقیاس ترتیبی پلهایی مانند: گروازمال، وانا، طالع، تالار۲، تالار۱، ورسک و پل خشکه آبندان۲ در اولویت‌های بالاتری از نظر نیازشان به تعمیر و نگهداری نسبت به سایر پلها، قرار دارند.

۳- نتایج حاصل از حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی نشان می‌دهد، در حالتی که مقدار ضریب ثابت(g) کمتر از متوسط اثربخشی روش‌های درمانی (a_{jk}) باشد، روش‌های تعمیر و نگهداری با اثربخشی بالا که دارای هزینه بیشتری هستند انتخاب می‌گردند، در نتیجه با توجه به محدودیت بودجه، در این حالت تعداد نقص‌های کمتری درمان می‌شوند. در حالتی که ضریب ثابت (g) برابر با مقداری بیشتر از متوسط اثربخشی روش‌های درمانی(a_{jk})، در نظر گرفته شود، روش‌های درمانی با اثربخشی کمتر که دارای هزینه کمتری هستند، انتخاب می‌شوند، در نتیجه در این حالت تعداد نقصهای بیشتری درمان می شوند. در حالتی که مقدار (g) برابر با متوسط اثربخشی روش‌های درمانی (a_{jk}) باشد، تعادل بین دو خواسته متناقصِ تعمیر حداکثر تعداد پل ها و انتخاب روش های درمانی با اثربخشی بالا برقرار شده و روش های درمانی بهینه انتخاب می شوند.

۱۲. مراجع

- آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران، (۱۳۷۵) معاونت امور فنی، دفتر تحقیقات و معیارهای فنی، مرکز تحقیقات و مطالعات وزارت راه و ترابری (نشریه ۱٦۱)، انتشارات سازمان برنامه و بودجه.

- Arunraj, N. S. and Maiti, J. (2010) "Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming", Safety Science, Feb, Vol. 48, No. 2, pp. 238–247.

- Bocchini, P. and Frangopol, D. M. (2011) "A probabilistic computational framework for bridge network optimal maintenance scheduling", Reliability Engineering & System Safety, Feb, Vol. 96, No. 2, pp. 332–349.

- Brito, J., Branco, F. A., Thoft-Christensen, P. and Sorensen, J. D. (1997) "An expert system for concrete bridge management", Engineering Structures, Vol. 19, No. 7, pp. 519–526.

- Chang, D. Y. (1996) "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP", European Journal of Operational Research, Vol. 95, pp. 649-655.

- Enright, M. P. and Frangopol, D. M. (1999) "Maintenance planning for deteriorating concrete bridges", Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 12, pp. 1407–1414.

- Freudenthaler, B., Gutenbrunner, G., Stumptner, R., and Kung, J. (2008) "Case-based Decision Support for Bridge Monitoring", in proceeding of the third international Multi-Conference on Computing in the global information technology, pp. 31-36.

- Hassan, S. H., Ahzahar, N., Fauzi, M. A. and Eman, J. (2012) "Waste management issues in the north-

- Sobanjo, J. O. and Thompson, P. D. (2004) "Project planning models for Florida's bridge management system", Technical Report, Florida Department of Transportation, Florida, USA.

- Wang, X. and Chapman, J. (2003) "Analysis of past NBI rating for predicting future bridge system preservation need", Transportation Research Center, Louisiana, USA.

- Wang, Y. M. and Elhag, T. M. S.(2008) "Evidential reasoning approach for bridge condition assessment" Expert Systems with Applications, Jan Vol. 34, No. 1, pp. 689–699.

- Wang, Y. M. and Elhag, T. M. S.(2007) "A fuzzy group decision making approach for bridge risk assessment", Computers & Industrial Engineering, Aug, Vol. 53, No. 1, pp. 137–148.

- Xiao, Z., Chen, L. and Zhong, B. (2010) "A model based on rough set theory combined with algebraic structure and its application: Bridges maintenance management evaluation", Expert Systems with Applications, , Jul, Vol. 37, No. 7, pp. 5295–5299.

- Yehia, S., Abudayyeh, O., Fazal, I. and Randolph, D. (2008) "A decision support system for concrete bridge deck maintenance", Advances in Engineering Software, Mar, Vol. 39, No. 3, pp. 202–210.

ern region of Malaysia", ASEAN Conference on Environment-Behaviour Studies, Riverside Majestic Hotel, Kuching, Sarawak, Malaysia, Procedia- Social and Behavioral Science, July, Vol .42, pp. 175-181.

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

- Jones, H. and William C. (2002) "Highway bridge replacement and rehabilitation program (HBRRP)", Division Administrator, Federal Highway Administration (FHWA), U.S.A.

- Lee, C. K. and Kim, S. K. (2007) "GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks", Automation in Construction, Mar, Vol. 16, No. 2, pp. 153–164.

- Lee, J. H., Sanmugarasa, K., Loo, Y. C. and Blumenstein, M. (2008) "Improving the reliability of a bridge management system (BMS) using an ANN-based Backward Prediction Model (BPM)", Journal of Automation in Construction, Vol. 17, No. 6, pp.758-772.

- Okasha, N. M. and Frangopol, D. M. (2009) "Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability, redundancy and life-cycle cost using GA", Structural Safety, Nov, Vol. 31, No. 6, pp. 460–474.

- Orcesi, A. D. and Frangopol, D. M. (2011) "Optimization of bridge maintenance strategies based on structural health monitoring information", Structural Safety, Jan, Vol. 33, No. 1, pp. 26–41.

- Robelin, C. A. and Madanat, S. M. (2006) "A bottom-up, reliability based bridge inspection, maintenance and replacement optimization model", Proc, Transportation Research Board (TRB) Meeting.

- Sasmal, S. and Ramanjaneyulu, K.(2008) "Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach", Expert Systems with Applications, Vol. 35, No. 3, pp. 1430–1443.