نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۷، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۸۰۱ تا ۲۸۲۰
DOI: 10.22060/ceej.2020.17506.6585

ارائه یک روش جدید جهت برنامه ریزی فرآیند تعمیر و نگهداری روسازی راه ها

حمید بهبهانی[۱]، نوید ندیمی[۲,*] ، مصطفی خالقی[۱]

[۱] دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.
[۲] دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

خلاصه: راه‌ها از گسترده‌ترین زیرساخت‌های عمرانی و جزء سرمایه‌های ملی هر کشور محسوب می‌شوند. مدیریت ترمیم و نگهداری راه‌ها از مهم‌ترین امور برای حفظ وضعیت راه‌ها در حالت مطلوب بوده و چنانچه این امر به‌طور مناسب انجام نشود، هزینه های بیشتری در آینده وارد خواهد شد. دو موضوعِ تعیین نوع گزینه ترمیم و نگهداری و زمان بکارگیری آن در مبحث مدیریت تعمیر و نگهداری راه‌ها دارای اهمیت فراوان است. در این مقاله سعی شده است تا با ترکیب ابزارهای اولویت‌بندی، هوش مصنوعی و بهینه‌سازی روشی جهت انتخاب گزینه بهینه ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی در هر بازه زمانی ارائه شود. برای این منظور ابتدا برای اولویت‌بندی شاخه‌های شبکه روسازی از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده می‌شود. سپس با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مشخص بیشینه می‌شود. برای به دست آوردن احتمال انتخاب هر گزینهٔ ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی از سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده می‌شود. برای اجرای مدل پیشنهادی از یک شبکهٔ روسازی اطراف شهر ماهان (کرمان) استفاده می‌شود. بر اساس نتایج حاصل شده می‌توان گفت که الگوریتم به کار رفته در این مقاله می‌تواند با در نظر گرفتن پارامترها و شاخص‌های مختلف مربوط به شاخه‌ها و قطعات روسازی، سناریوهای مختلفی برای انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در بازه‌های زمانی یک ساله به سازمان متولی راه بدهد و این الگوریتم فرآیند انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات مختلف را تسهیل می‌کند و یک روش علمی و مدون جهت مدیریت تعمیر و نگهداری راه ها ارائه می‌دهد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:
مدیریت روسازی
فازی
بهینه سازی
ترمیم و نگهداری

۱- مقدمه

شبکهٔ روسازی یک مؤلفه کلیدی از زیرساخت‌های حمل و نقل هستند. این شبکه سرمایهٔ با ارزشی برای هر کشور بوده و باید به‌گونه‌ای اداره شود که در زمانی نسبتاً طولانی در سطح کیفی مناسب باقی بماند. با وجود اینکه کاربران راه‌ها به‌طور فزاینده‌ای تقاضای بهبود کیفیت، راحتی و ایمنی راه را دارند، اما امروزه در بسیاری از کشورها، به دلیل بحران اقتصادی، روند کسری بودجه در سازمان‌های مرتبط با راه در حال افزایش است. اضمحلال راه‌ها و زیرساخت‌های مرتبط، افزایش ترافیک و محدودیت‌های بودجه‌ای، تصمیم‌گیران سازمان‌های متولی راه‌ها را بیش از پیش به استفاده بهینه از منابع موجود برای نگهداری و حفظ این سرمایه سوق داده است.

مهندسان حوزهٔ راه از زمانی که روسازی‌های بتن آسفالتی و سیمانی وجود داشته‌اند به نگهداری آن‌ها و اعمال گزینه‌های ترمیم و نگهداری می‌پرداختند. راهبردها و روش‌های ترمیم و نگهداری گوناگونی توسط سازمان‌های متولی راه برای حفظ وضعیت روسازی‌ها و به تأخیر انداختن اضمحلال به کار گرفته شده است نوع و راهبرد انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری موضوع تحقیقات زیادی در سال‌های متمادی بوده است [۱]. عدم نگهداری مناسب یک راه باعث خرابی و زوال زودرس آن می‌شود. همچنین خرابی‌های راه باعث افزایش استهلاک وسایل نقلیه نیز می‌شود. سوانح و اتفاقات پیش‌بینی نشده نیز ممکن است در اثر خرابی‌های راه اتفاق بیفتد. هزینه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: navidnadimi@uk.ac.ir

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

نگهداری راه‌ها در ایران از ۳ تا ۱۰ درصد ارزش راه‌ها تغییر می‌کند و ضرورت دارد که نگهداری راه از آغاز بهره‌برداری آن شروع شده و عملیات نگهداری به‌طور مستمر و در طول عمر راه انجام شود [۲].

در مدیریت و نگهداری راه‌ها، مدیران بایستی بر اساس ورودی‌های گوناگون مانند اطلاعات مربوط به خرابی روسازی، ناهمواری، مقاومت لغزندگی، افت‌وخیز لایه‌ها، نرخ اضمحلال روسازی و ... اقدام به انتخاب گزینهٔ ترمیم و نگهداری مناسب در زمان مناسب کنند. مدیران متولی راه در بحث مدیریت ترمیم و نگهداری و راهبرد انتخاب گزینه‌ها باید برای برقراری تعادل بین بهبود عملکرد روسازی‌های مضمحل شده با وضعیت نامناسب سازه‌ای (ترمیم اساسی) و نگهداری سایر روسازی‌ها در وضعیت مناسب (نگهداری پیشگیرانه) تلاش کنند؛ اما نکته‌ای که حائز اهمیت است زیاد بودن و بعضاً پیچیده بودن متغیرهای ورودی در تصمیم‌گیری است. علاوه بر این، مدیریت روسازی معمولاً با طول زیادی از راه‌ها و یا شبکه گسترده‌ای از معابر مواجه است. می‌توان نتیجه گرفت که در بحث مدیریت ترمیم و نگهداری روسازی نیاز به یک روش سیستماتیک و علمی دقیق بوده و در این مقوله از مدل‌های ساده نمی‌توان بهره گرفت. این مقاله در نظر دارد تا با استفاده از چند ابزار علمی شامل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP[1])، برنامه‌ریزی ریاضی خطی (LP[2]) و سیستم استنتاج فازی (FIS[3]) به بحث مدیریت ترمیم و نگهداری در سطح شبکه و پروژه بپردازد. در اینجا ابتدا با استفاده از AHP شاخه‌های شبکه روسازی اولویت‌بندی می‌شوند. سپس با LP بیشینه نمودن احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری با لحاظ نمودن برخی محدودیت‌های مشخص انجام می‌شود. در مدل LP مورد نظر، احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری با FIS به عنوان یکی از قدرتمندترین روش‌ها در محاسبات نرم تعیین می‌شوند. به واقع نوآوری اصلی این مقاله در ارائه یک چارچوب تازه مبتنی بر ابزارهای تصمیم گیری ریاضی به‌طور هم‌زمان، جهت تعیین گزینهٔ بهینه ترمیم و نگهداری روسازی خواهد بود.

مقاله حاضر شش بخش دارد. در بخش دوم مروری بر ادبیات تحقیق مرتبط با موضوع مدیریت و نگهداری راه‌ها، انواع روش‌های متداول در نگهداری راه‌ها و غیره ارائه می‌شود. بخش سوم به تشریح روش تحقیق می‌پردازد. داده‌ها و نتایج تحقیق نیز به ترتیب در بخش‌های چهارم و پنجم ارائه می‌گردد. در نهایت بخش ششم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- مرور ادبیات تحقیق

به‌طورکلی سه موضوع اساسی در زمینه روسازی قابل طرح و پیگیری است. این موارد عبارت‌اند از: ساخت روسازی، مدیریت روسازی و تحقیق در زمینهٔ روسازی. درگذشته فقط به نگهداری روسازی‌ها توجه می‌شد و مدیریت روسازی‌ها امری ناآشنا بود. عامل تعیین‌کننده در انتخاب روش ترمیم و نگهداری مناسب، تجربهٔ مهندسین بود. همچنین توجه چندانی به هزینه‌های چرخه عمر و یا به اولویت‌بندی بر اساس ضرورت در سطح شبکه نمی‌شد. در اقتصاد امروزی به همان نسبت که از عمر روسازی‌های موجود می‌گذرد نیاز به یک روش سیستماتیک برای تعیین ضرورت‌ها در امر ترمیم و نگهداری بیشتر احساس می‌گردد. امروزه شبکه روسازی‌ها نیاز به مدیریت دارد و نگهداری به تنهایی دیگر کافی نیست [۳].

مدیریت یک شبکه روسازی به‌صورت دقیق و با جزییات کاری بسیار پیچیده و دشوار است. پیچیدگی این مسأله ناشی از نیاز به مدل‌های قابل‌اطمینان پیش‌بینی عملکرد روسازی و داده‌های وسیع مربوط به گذشته و حال خرابی‌های روسازی، تاریخچه ترمیم و نگهداری و بارگذاری ترافیکی تعداد زیادی از قطعات روسازی با مشخصات سازه‌ای متفاوت است. برای پیدا کردن راهبردهای بهینهٔ نگهداری روسازی‌ها در سطح سرویس مطلوب در طول دوره زمانی مشخص شده نیاز به برنامه مدیریت روسازی است. این برنامه می‌تواند با استفاده از مدل‌های اولویت‌بندی و بهینه‌سازی طرح‌ریزی شود [۴].

سازمان‌های متولی راه به دلیل محدودیت بودجه همیشه با چالش انتخاب اقتصادی‌ترین راهبردهای ترمیم و نگهداری روسازی که بتواند سطح خدمت را در حالی که استفاده از منابع موجود را بهینه می‌کند در بالاترین حد ممکن نگه دارد، روبرو هستند. این سازمان‌ها همیشه با این سؤال مواجه هستند که چه گزینه‌ای را در چه زمانی به کدام قطعه روسازی اعمال کنند؟ جواب این سؤال به دلیل پیچیدگی ذاتی مسأله باید با روش‌های سیستماتیک داده شود و از مدل‌های ذهنی ساده بهره زیادی نمی‌توان برد؛ بنابراین بعضی از سیستم‌های مدیریت روسازی از روش‌های اولویت‌بندی و بعضی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌کنند. تکنیک‌های بهینه‌سازی و اولویت‌بندی

1 Analytical Hierarchy Process
2 Linaear Programming
3 Fuzzy Inference System

نقش مهمی را در تعیین کیفیت و مقرون به صرفه بودن راهبردهای ترمیم و نگهداری ایفا می‌کنند [۴, ۵].

عموماً وضعیت روسازی‌ها در دسته‌بندی‌های کیفی مثل خوب، متوسط و بد بیان می‌شود و همچنین روش‌های ترمیم و نگهداری در دسته‌بندی‌های موضعی (پیشگیرانه و موقتی)، فراگیر پیشگیرانه و اساسی تقسیم‌بندی می‌شوند. هر کدام از دسته‌های روش‌های ترمیم و نگهداری خود شامل تعدادی گزینه است که هزینه واحد و تأثیرات متفاوتی دارند [۶]. ترمیم و نگهداری موضعی موقتی عبارت است از ترمیم و نگهداری موضعی که قابلیت بهره‌برداری روسازی را با رعایت ایمنی حفظ می‌کند. ترمیم و نگهداری موضعی پیشگیرانه به‌عنوان فعالیت‌هایی که هدف اولیه آن‌ها کاهش نرخ اضمحلال است تعریف می‌شود. این فعالیت پر کردن و آب‌بندی ترک‌ها را شامل می‌شود. ترمیم و نگهداری فراگیر پیشگیرانه فعالیت‌هایی هستند که با هدف اولیه کاهش نرخ اضمحلال در سطح گسترده‌ای از قطعات روسازی اعمال می‌شوند. این فعالیت‌ها بکار بردن آسفالت‌های حفاظتی برای روسازی‌های با رویه بتن آسفالتی را در بر می‌گیرند. برای روسازی‌های با رویه آسفالتی سه نوع ترمیم و نگهداری فراگیر پیشگیرانه تعریف شده است. این سه نوع بر اساس نوع خرابی‌های موجود در هر یک از قطعات روسازی اعمال می‌شوند. ترمیم و نگهداری اساسی به فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که منظور از آن‌ها تصحیح یا بهبود شرایط عملکردی یا سازه‌ای موجود در کل قطعه روسازی است [۳].

اگر یک گزینه ترمیم و نگهداری خاص در زمان‌های متفاوتی در طول عمر روسازی اجرا شود نتایج متفاوتی خواهد داشت (یا در یک زمان خاص بر روی روسازی‌هایی با شرایط متفاوت). زمانی که گزینه‌های نگهداری پیشگیرانه در زمان درست بر روی روسازی مناسب اجرا شوند تبدیل به ابزار مقرون به صرفه‌ای برای رسیدن به عمر و عملکرد مطلوب روسازی می‌شوند. گزینه‌هایی که خیلی زود اجرا شوند مزایای کمی خواهند داشت و برعکس گزینه‌هایی که خیلی دیر اجرا شوند بدون فایده خواهند بود و در افزایش عمر روسازی موفقیتی حاصل نمی‌شود؛ بنابراین برای هر روسازی یک زمان یا شرایط بهینه‌ای (یا یک محدوده زمان و شرایط بهینه) وجود دارد که در آن نسبت فایده به هزینه یک روش ترمیم و نگهداری حداکثر می‌شود [۷].

اگرچه اعمال نگهداری پیشگیرانه به روسازی‌های مضمحل شده می‌تواند تعمیرات ضروری را برای مدت کوتاهی به تعویق بیندازد، اما انجام این کار به هیچ وجه مقرون به صرفه نیست. زمانی که سازمان‌های متولی راه با تعدادی روسازی نیازمند تعمیرات اساسی مواجه هستند باید تلاش کنند تا راه‌حلی پیدا کنند که بتوانند تعادلی بین بهبود عملکرد روسازی‌های مضمحل شده و نگهداری سایر روسازی‌ها در وضعیت مناسب برقرار کنند تا روسازی‌هایی که در وضعیت مناسبی بوده‌اند به نقطه‌ای نرسند که دیگر اعمال نگهداری پیشگیرانه مؤثر نباشد [۸].

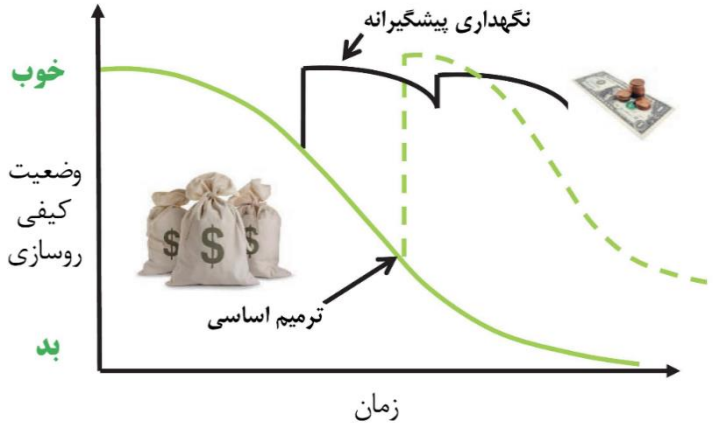
تجارب نشان می‌دهد اضمحلال روسازی از نقطه‌ای به بعد شتاب می‌گیرد تا به خرابی اساسی برسد. برای کاهش نرخ اضمحلال، گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قالب یک راهبرد مشخص برای حفظ وضعیت روسازی، ایمنی و کیفیت سواری باید به روسازی اعمال شوند تا روسازی با روشی اقتصادی بتواند دوره طرح خود را خدمت‌دهی کند (شکل ۱) [۱].

برای انتخاب گزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز سه روش وجود دارد که عبارت‌اند از: روش‌های مبتنی بر تجربیات قبلی، روش‌های مبتنی بر وضعیت کنونی و روش‌های مبتنی بر هزینه‌های چرخهٔ عمر روسازی. در روش انتخاب بر مبنای وضعیت کنونی روسازی لازم است تا ارزیابی کاملی از وضعیت روسازی صورت پذیرد. برای این منظور خرابی‌ها، ناهمواری، افت و خیز و نیز مقاومت لغزندگی روسازی بایستی ارزیابی شود [۳].

محققان بسیاری تا امروز تلاش کرده‌اند که مدل‌هایی برای نگهداری، ترمیم و تعمیر روسازی آسفالتی راه‌ها ارائه دهند و در این زمینه پژوهش‌های زیادی انجام شده است که در اینجا به چند مورد از این پژوهش‌ها اشاره می‌شود.

در سال ۲۰۱۳، هانتینگتون[1] و همکاران از درخت تصمیم‌گیری برای شناسایی گزینه ترمیم و نگهداری مناسب برای جاده‌های رویه‌دار وایومینگ[2] استفاده کردند. در این درخت تصمیم‌گیری، سه متغیر در نظر گرفته شده است: PSI[3]، عرض راه و عمق شیارشدگی [۹]. هلالی و همکاران (۱۹۹۶) یک سیستم مدیریت روسازی در سطح شبکه برای شبکه بزرگراه تورنتو توسعه دادند. این سیستم روسازی شامل ارزیابی وضعیت روسازی، مدل‌های اضمحلال قطعی

1 Huntington
2 Wyoming
3 Pavement Servicibility Index



شکل ۱. نمایش کیفی وضعیت روسازی و تأثیر نگهداری بر آن

Fig. 1. Qualitative display of pavement condition and effect of maintenance on it

تجربی، اولویت‌بندی ترمیم و نگهداری و تحلیل اولویت بودجه است. بودجهٔ بهینه و راهبردهای قابل اجرا ترمیم و نگهداری طی برنامه ۱۰ ساله توسط درخت‌های تصمیم‌گیری که ماحصل تجربه مهندسی و تجزیه و تحلیل اقتصادی هزینه‌های چرخه عمر بود، طراحی شد [۱۰]. معظمی و همکاران (۲۰۱۱) یک شاخص اولویت‌بندی ترمیم و نگهداری روسازی برای شبکه راه تهران با استفاده از AHP، با توجه به شاخص وضعیت روسازی، حجم ترافیک و رتبه راه مشخص کردند. مدل‌سازی منطق فازی مربوط به استنتاج انسان به عنوان گام بعدی برای یافتن نتایج دقیق موتور اولویت‌بندی ترمیم و نگهداری به کار گرفته شد [۱۱]. بابایی و نادران (۲۰۱۲) مدل مدیریت سطح شبکه مبتنی بر زنجیره مارکوف را ارائه دادند که می‌توانست پیش‌بینی شرایط روسازی و بهینه کردن منابع را هم‌زمان انجام دهد. برای اطمینان از حداکثر مقدار ممکن شبکه روسازی بالاتر از حداقل قابل قبول، این مدل بر روی توابع چند هدفه با اهداف زیر استفاده شد: به حداقل رساندن نسبت بدترین وضعیت در شبکه و به حداقل رساندن مقدار روسازی از تمام حالت‌ها که آستانه بحرانی را رد کردند به جز بدترین حالت [۱۲]. دلا گارزا[1] و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل تصمیم‌گیری ساده در سطح شبکه برای بهینه‌سازی ترمیم و نگهداری روسازی را بر اساس برنامه‌ریزی خطی با قیود بودجه سالانه و هدف عملکردی روسازی مورد نظر سازمان متولی راه توسعه دادند. پس از آن این مدل به شبکه روسازی بین ایالتی برای بررسی تعدادی از اهداف واحد ذیل اعمال شد: به حداقل رساندن تعداد قطعات روسازی در شرایط مختلف با محدودیت‌های بودجه یا اهداف عملکردی؛ به حداقل رساندن بودجه مورد نیاز در طول دوره برنامه‌ریزی برای رفع محدودیت‌ها؛ و به حداقل رساندن بودجه محدود سالانه مورد نیاز برای رفع محدودیت‌ها [۱۳]. وو[2] و همکارش (۲۰۰۸) یک روش پشتیبانی از تصمیم برای انتخاب پروژه‌های ترمیم و نگهداری بهینه بر اساس ترکیبی از سه روش را پیشنهاد کردند: خوشه‌بندی کی میانگین[3]، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح. از خوشه‌بندی کی میانگین برای دسته‌بندی پروژه‌های ترمیم و نگهداری به گروه‌های همگن مختلف و از AHP برای تعیین اهمیت هر گروه استفاده شد. برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای انتخاب پروژه‌های بهینه با هدف بیشینه‌سازی مزایای ترمیم و نگهداری با وجود محدودیت بودجه استفاده شد [۱۴]. بهدانوویچ[4] (۲۰۰۸) ساده‌ترین کاربرد منطق فازی در تصمیم‌گیری در مورد ضرورت راه‌حل‌های ترمیم و نگهداری برای قطعات روسازی را ارائه کرد. نرخ اضمحلال و ناهمواری طولی به عنوان ورودی‌های فازی و اعتماد به نیاز به ترمیم و نگهداری به عنوان خروجی فازی در نظر گرفته شد [۱۵]. الحدیدی[5] و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای برنامه‌ریزی اقدامات ترمیم و نگهداری با استفاده از الگوریتم ژنتیک همراه با مدل اضمحلال مبتنی بر زنجیره مارکوف معرفی کردند. مدل توسعه یافته در شبکه بزرگراه در مصر با در نظر گرفتن حداقل

1 De La Garza

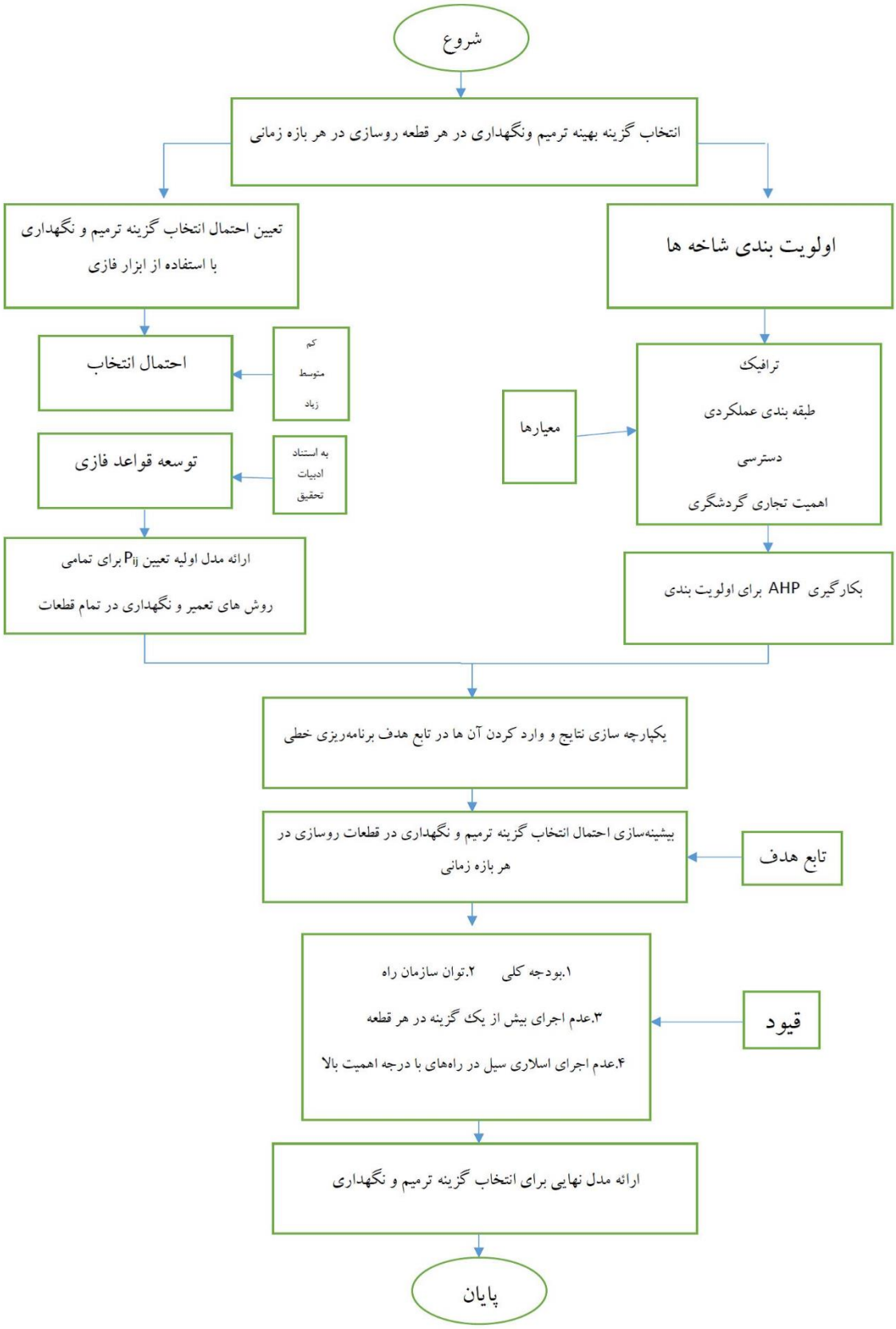
2 Wu
3 k-means clustering
4 Bohdanovich
5 Elhadidy

شدن هزینه‌های ترمیم و نگهداری و حداکثر شدن PCI اجرا شد [۱۶]. اباذا و آشور (۲۰۰۹) به توسعه یک مدل مدیریت روسازی جهت دستیابی به شرایط بهینه روسازی پرداختند. برای این منظور از مدل برنامه ریزی عدد صحیح استفاده و محدودیت هایی مرتبط با بودجه و شرایط بهبود لحاظ گردید. نتایج مدل نشان داد که کارایی مدل جهت دست‌یابی به شرایط بهینه روسازی بسیار بالا بوده است [۱۷]. گو و همکارانش (۲۰۱۲)، برای یک بازهٔ زمانی نامحدود یک مسأله بهینه سازی جهت کمینه کردن هزینه های چرخه عمر شامل هزینه های کاربران و هزینه های نگهداری و بازسازی ارائه کردند. برای این منظور از برنامه ریزی ریاضی غیرخطی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که چنانچه فعالیت های نگهداری به‌طور بهینه بکار گرفته شود، به شکل معناداری عمر خدمت دهی روسازی افزایش خواهد یافت که این موضوع هزینه های کلی چرخه عمر روسازی را کاهش خواهد داد [۱۸]. مدوری و مدانت (۲۰۱۳)، به ارائه یک مدل برنامه ریزی دینامیک تخمینی برای بهینه سازی فرآیند مدیریت روسازی پرداختند. این روش قادر خواهد بود تا مسائل پیچیده فرموله شده را استفاده از تکنیک های شبیه سازی و کاهش ابعاد تابع حل کند [۱۹]. یو و همکارانش (۲۰۱۵)، یک مدل بهینه سازی چندهدفه برای بهینه سازی برنامهٔ نگهداری روسازی آسفالتی در سطح پروژه استفاده کردند. اجزای تابع هدف شامل عنصر وضعیت روسازی، عنصر هزینه و عنصر محیط اطراف لحاظ شده است. نتایج مطالعه نشان داد که استفاده از این مدل می تواند به کاهش هزینه و تأثیرات محیطی به ترتیب در حد ۸۰/۳ درصد و ۷۷/۸ درصد و افزایش عملکرد روسازی تا ۱۴۶/۶ درصد منتج شود [۲۰]. احمد و همکاران (۲۰۱۸) از مدل بهینه‌سازی گروه ذرات چند هدفه گسسته با روش آشفتگی برای مدیریت ترمیم و نگهداری روسازی استفاده کردند. هدف اصلی این پژوهش یافتن استراتژی بهینه ترمیم و نگهداری برای روسازی‌های بتن آسفالتی با حداقل کردن هزینه ترمیم و نگهداری و حداکثر کردن عملکرد روسازی بود [۲۱]. خان و همکاران (۲۰۱۶) شبکه راه کوییزلند استرالیا را بر اساس معیارهای نوع روسازی، بارگذاری ترافیکی و استقامت روسازی به ۲۷ گروه تقسیم کردند، سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزار HDM-۴ با اهداف حداقل کردن هزینه‌ها و حداکثرسازی عملکرد روسازی سعی در پیدا کردن گزینه بهینه از بین ۳۶ راه موجود (۶ استاندارد حداقل بر اساس شاخص ناهمواری بین‌المللی تعریف شد و شش گزینه ترمیم و نگهداری) برای هر گروه از ۲۷ گروه تعریف شده، کردند [۲۲]. خاوندی و همکارش (۲۰۱۸) از مدل بهینه‌سازی چندهدفه قطعی برای مدیریت روسازی‌های انعطاف‌پذیر در سطح شبکه با اهداف حداقل کردن هزینه‌های سازمان، حداقل کردن هزینه‌های کاربران و حداکثر کردن ارزش باقیمانده روسازی‌ها در پایان دوره تحلیل استفاده کردند. برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامحدود، برای پیش‌بینی شرایط روسازی از مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی تگزاس و برای محاسبه هزینه کاربران نیز از مدل موجود در نرم‌افزار HDM-۴ بهره گرفتند [۲۳]. تورس-ماچی و همکارانش (۲۰۱۸)، به ارزیابی تأثیرات محیطی و محدودیت های بودجه ای به‌طور توأمان بر تصمیم گیری های مرتبط با نگهداری روسازی پرداختند. با توجه به اینکه به‌طور سنتی در بحث مدیریت روسازی بر جنبه های اقتصادی و فنی تمرکز می شود، موضوع تأثیرات زیست محیطی تصمیم گیری ها مورد غفلت قرار می گیرد. بر این اساس، این محققین به تحلیل تأثیر جنبه های زیست‌محیطی و مسائل اقتصادی به‌طور توأمان بر طراحی راهبردهای تعمیر و نگهداری روسازی راه ها پرداختند. بر اساس نتایج این تحقیق، روکش آسفالتی و میکروسرفیسینگ در زمان وجود محدودیت های بودجه ای در روسازی آسفالتی پیشنهاد شدند [۲۴]

بنابراین، با توجه به مرور ادبیات تحقیق حاضر می توان گفت که تحقیقات متنوعی در راستای ارائهٔ تصمیم بهینه برای مدیریت ترمیم و نگهداری روسازی راه ها انجام شده است. با توجه به رشد ابزارهای ریاضی متنوع مرتبط با بحث تصمیم گیری، استفاده از آن‌ها در حیطهٔ مدیریت عملیات ترمیم و نگهداری روسازی راه ها نیز مورد بررسی قرار می گیرد. در نتیجه مادامی که این ابزارها در حال گسترش هستند، استفاده از آن‌ها در موضوع مدیریت ترمیم و نگهداری راه ها نیز مطرح خواهد بود. همچنین بحث استفاده توأمان از دو یا چند ابزار نیز یکی از مقوله هایی است که در مباحث مرتبط با تصمیم گیری برای افزایش کارایی آن‌ها لحاظ می شود.

۳- روش تحقیق

هدف اصلی این مقاله ارائه چارچوبی با مدل‌سازی و برنامه‌ریزی ریاضی، برای تعیین گزینه بهینه ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی بتن آسفالتی در هر بازه زمانی است. در این راستا ابتدا با استفاده از



شکل ۲. فلوچارت روند انجام تحقیق

Fig. 2. Research flowchart

جدول ۱. هزینه اجرای گزینه‌های مختلف

Table 1. Cost of implementation of different options

i	گزینه ترمیم و نگهداری	هزینه واحد (تومان)
۱	پر کردن ترک	۶۹۰۰ (متر طول)
۲	فاگ سیل	۳۶۰۰ (هر مترمربع)
۳	اسلاری سیل	۴۷۰۰۰ (هر مترمربع)
۴	چیپ سیل	۳۵۰۰۰ (هر مترمربع)
۵	میکروسرفیسینگ	۱۰۰۰۰۰ (هر مترمربع)
۶	بازیافت	۳۱۲۰۰ (هر مترمربع به ازای هر ۱ سانتی‌متر)
۷	روکش	۵۱۱۰۰ (هر مترمربع به ازای هر ۱ سانتی‌متر)
۸	بازسازی	۱۰۰۰۰۰۰ (هر مترمربع)

مدل تحلیل سلسله مراتبی شاخه‌های موجود در شبکه روسازی مدنظر اولویت‌بندی می‌شوند. در گام بعد با استفاده از سیستم استنتاج فازی احتمال انتخاب هر گزینه ترمیم و نگهداری در هر قطعه روسازی به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از برنامه‌ریزی خطی تابع هدف با لحاظ نمودن تعدادی محدودیت بیشینه می‌شود. فلوچارت زیر روش تحقیق مقاله حاضر را نشان می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد در گام اول برای تمیز دادن قطعات روسازی که شرایط و ویژگی‌های یکسانی دارند ولی در شاخه‌هایی با خصوصیات و درجه اهمیت متفاوت قرار دارند، از مدل تحلیل سلسله مراتبی برای اولویت‌بندی شاخه‌های شبکه روسازی مد نظر استفاده شده است. این کار با در نظر گرفتن چهار پارامتر طبقه‌بندی عملکردی، ترافیک، دسترسی (تعداد راه جایگزین در صورت مسدود شدن راه برای اجرای عملیات ترمیم و نگهداری) و اهمیت تجاری گردشی شاخه‌ها انجام شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از نظر کارشناسان ماتریس مقایسات زوجی معیارها کامل شده و با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice ۱۱ اولویت‌بندی شاخه‌ها صورت گرفته است.

سپس با استفاده از برنامه‌ریزی خطی سعی در حداکثرسازی احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی شد. تابع هدف مدل برنامه‌ریزی خطی مد نظر مطابق فرم پایین است و قیود مربوطه در جدول ۲ آورده شده است:

$$MaxZ = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \omega_j * P_{ij} * X_{ij} \qquad (۱)$$

که در آن:

i= بیانگر شماره گزینه ترمیم و نگهداری است که جزییات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

j= نشان‌دهنده قطعات مختلف روسازی موجود در شبکه مد نظر در مقاله جاری است.

Z= تابع هدف که در اینجا بهینه کردن انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات شبکه روسازی است.

X_{ij}= متغیر تصمیم‌گیری به مفهوم اجرا یا عدم اجرای گزینه ترمیم و نگهداری i در قطعه j است (۰ یا ۱).

P_{ij}= احتمال انتخاب گزینه ترمیم و نگهداری i در قطعه روسازی j که ماحصل سیستم استنتاج فازی است.

ω_j= وزن مربوط به قطعات شاخه‌های شبکه روسازی که از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به دست آمده است.

لازم به ذکر است برای کنترل قید بودجه برنامه‌ریزی خطی نیاز است تا هزینه هر گزینه ترمیم و نگهداری مشخص باشد که هزینه هر یک از گزینه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. برای سهولت کار در صورت انتخاب شدن گزینه بازیافت یا روکش توسط مدل، ضخامت انجام کار به ترتیب ۱۰ و ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای محاسبهٔ هزینه پرکردن ترک در هر قطعه طول همان قطعه مبنای مقدار طول مورد نیاز برای پر کردن ترک فرض شد. کل بودجه موجود نیز در حالت نامحدود مبلغ ۶۶ میلیارد تومان و در حالت محدود ۳۰ میلیارد تومان در نظر گرفته شد.

قید دوم که مربوط به توان سازمان متولی راه است یک قید محلی

جدول ۲. قیود برنامه‌ریزی خطی
Table 2. Constraints of linear programming

محدودیت	جزییات	توضیحات
۱	$\sum_{i=1}^{8}\sum_{j=1}^{244} X_{ij} * C_{ij} \le TotalBudget$	هزینه کل قطعاتی که ترمیم و نگهداری می‌شوند نباید از بودجه بیشتر باشد. C_{ij} هزینه اعمال گزینه i در قطعه j
۲	$\sum_{j=1}^{244} X_{1j} \le C$ $\sum_{j=1}^{244} X_{ij} \le D \quad i = 2,3,4,5$ $\sum_{j=1}^{244} X_{ij} \le E \quad i = 6,7,8$	در هر سال سازمان متولی راه، تعداد مشخصی قطعه می‌تواند ترمیم کند (برای پر کردن ترک C، برای فراگیر پیشگیرانه D و برای ترمیم اساسی مقدار E)
۳	$\sum_{i=1}^{8} X_{ij} \le 1 \ , \forall j$	به هر قطعه روسازی تنها یک گزینه ترمیم و نگهداری می‌تواند اعمال می‌شود.
۴	if $\alpha_j \le 4$ then $X_{3j} = 0$	در قطعات با اهمیت بالا اسلاری سیل اجازه اجرا ندارد. α_j از جدول ۶ بدست می‌آید

است و بسته به عواملی همچون نیروی انسانی، تجهیزات و غیره، در هر منطقه متفاوت است. در این مقاله حداکثر توان برای انجام پرکردن ترک، فراگیر پیشگیرانه و اساسی به ترتیب ۳۰، ۲۰ و ۱۰ فرض شده است.

احتمال انتخاب گزینه ترمیم و نگهداری (P_{ij}) که در تابع هدف فوق آورده شده خروجی سیستم استنتاج فازی است. فازی به معنای فقدان وضوح است و این مفهوم فازی به دلیل مدل‌سازی مشابه استنتاج انسانی با یک الگوی پیچیده ریاضی است. سیستم استنتاج فازی از زیرمجموعه های محاسبات نرم است. محاسبات نرم روشی ابتکاری در راستای ایجاد سیستم های هوشمند است. حل مسائل پیچیدهٔ دنیای واقعی نیازمند بکارگیری سیستم های هوشمند است. این سیستم ها دارای توانایی تطبیق با محیط بوده و یاد می‌گیرند چگونه با تغییرات محیط سازگار شوند و در مقابل تغییرات محیطی تصمیم خاصی را اتخاذ نمایند. محاسبات نرم در واقع، توانایی های ذهن انسان را برای استدلال و فراگیری در یک محیط نامعین و نادقیق گرد هم می آورد.

سیستم استنتاج فازی یا به اختصار FIS، برای توصیف نظام مند دانش انسان و انجام استنتاج و اخذ یک تصمیم مناسب کاربرد دارد. مغز انسان اطلاعات غیردقیق و ناکامل فراهم آمده از طریق اندام های حسی را تفسیر و عکس العمل نشان می دهد. در سیستم استنتاج فازی سعی می شود بر اساس همین الگو و مطابق مغز انسان، بر اساس یک سری ورودی به خروجی مشخصی دست پیدا کرد. ساختار پایهٔ سیستم های استنتاج فازی از سه بخش مفهومی تشکیل می شود. بخش اول، قواعد هستند که در قالب یک سری دستور اگر- آنگاه، ترکیبی از ورودی ها و خروجی را بدست می دهند. بخش دوم، پایگاه داده است که توابع عضویت مورد استفاده در قواعد فازی در قالب آن تعریف می شود. در نهایت بخش سوم، سازوکار استنتاج است که روال استنتاج توسط آن و به کمک قواعد و حقایق موجود، برای رسیدن به یک خروجی معقول انجام می‌پذیرد. لازم به ذکر است که بطورکلی در توسعه قواعد فازی دو رویکرد وجود دارد. در رویکرد اول بر اساس داده های واقعی و آنچه که در واقعیت رخ داده قواعد تعیین می شود. رویکرد دیگر اما مبتنی بر نظرات متخصصین و افرادی است که نسبت به ویژگی های ورودی ها و تأثیر ترکیب آن‌ها بر خروجی شناخت دارند.

در بحث سیستم استنتاج فازی هدف تعیین مقدار خروجی بر اساس تعدادی ورودی خواهد بود که در این میان سازوکارهایی برای بدست آوردن خروجی وجود دارد؛ بنابراین قبل از هر چیز بایستی ورودی ها و خروجی(ها) مورد نظر مشخص شوند. سه نوع معروف از سیستم‌های استنتاج فازی عبارت‌اند از: ممدانی، سوگنو و تسوکاموتو. در اینجا از مدل فازی ممدانی استفاده می شود و بنابراین توضیحات ارائه شده نیز مربوط به این مدل خواهد بود. فرآیند استنتاج فازی از این مراحل تشکیل شده است:

- تعیین متغیرهای ورودی و خروجی و بازهٔ تغییرات هر یک از آن‌ها

- تبدیل متغیرهای ورودی و خروجی به متغیرهای زبان شناختی (فازی سازی متغیرها). با افزایش پیچیدگی یک سیستم، توانایی ما در اظهار دقیق و مشخص رفتار آن با رسیدن به یک آستانهٔ خاص کاهش می یابد و دقت و وضوح به دو خصوصیت در تقابل با هم تبدیل می شوند. بر همین اساس در سیستم فازی متغیرهای زبان شناختی معرفی شده است. یک متغیر زبان شناختی دارای ۵ رکن خواهد بود. ۱- نام متغیر، ۲- مجموعهٔ مقادیر یا اصطلاحات زبان شناختی، ۳- بازهٔ تغییرات متغیر ۴- قاعدهٔ نحوی به عنوان روشی که مقادیر زبان شناختی موجود در مجموعهٔ اصطلاحات بر اساس آن تولید می شود و ۵- قاعدهٔ معنایی که میزان عضویت هر یک از مقادیر یک متغیر به هر یک از مجموعه اصطلاحات زبان شناختی را نشان می دهد.

- توسعهٔ قواعد فازی: قواعد فازی نحوهٔ ترکیب متغیرهای ورودی برای دست‌یابی به مقادیر مختلف متغیرهای خروجی را نشان می دهد. برای این منظور از قواعد اگر-آنگاه برای فرموله کردن دستورات شرطی منطق فازی استفاده می شود. عملیات تفسیر یک قاعدهٔ اگر-آنگاه دارای دو بخش است. بخش اول ارزیابی فرض نام دارد و به فازی سازی ورودی و اعمال عملگرهای فازی می پردازد. بخش دوم اعمال ماحاصل بخش اول بر روی قسمت نتیجه است که با نام دلالت شناخته می شود. عملگرهای متنوعی نظیر AND و OR جهت ترکیب نمودن متغیرهای ورودی بر اساس مجموعه اصطلاحات زبان شناختی آن‌ها در فازی وجود دارد. عملگر AND می تواند شامل عملیات کمینه، ضرب یا غیره و عملگر OR می تواند شامل بیشینه، OR احتمالی یا ... باشد.

- مرحلهٔ چهارم در سیستم استنتاج فازی اعمال روش دلالت خواهد بود. قبل از اعمال روش دلالت بایستی وزن هر قاعده مشخص شود. هر قاعده دارای وزنی بین ۰ تا ۱ خواهد بود. دو روش مرسوم برای انجام فرآیند دلالت شامل کمینه که مجموعهٔ فازی متغیر خروجی را برش می دهد و ضرب که مجموعهٔ فازی متغیر خروجی را مقیاس می کند، خواهد بود. به ازای هر یک از قواعد فازی یک فرآیند دلالت صورت خواهد گرفت.

- مرحلهٔ پنجم تجمیع خروجی هاست. همان‌طور که گفته شد به ازای هر قاعدهٔ فازی یک مرتبه فرآیند دلالت بایستی صورت پذیرد. پس از آنکه این عملیات برای همهٔ قواعد صورت پذیرفت نتایج بایستی تجمیع شود. سه روش مرسوم برای تجمیع عبارت‌اند از: بیشینه، OR احتمالی و محاسبهٔ مجموع.

- نهایتاً مرحلهٔ آخر غیرفازی سازی است. در این فرآیند با توجه به نتیجه تجمیع شده از مرحله قبل و استفاده از روش هایی نظیر محاسبهٔ مرکز جرم، نیمساز، میانهٔ بیشینه (میانگین مقادیر بیشینه از مجموعهٔ خروجی)، بزرگ‌ترین بیشینه و در نهایت کوچک‌ترین بیشینه عملیات غیر فازی سازی برای تعیین مقدار خروجی انجام می شود.

با مرور ادبیات تحقیق در رابطه با عوامل و پارامترهای مؤثر بر انتخاب گزینه ترمیم و نگهداری متغیرهای ورودی فازی انتخاب شدند و با استفاده از نظرات کارشناسان، ۶ متغیر از مجموع متغیرهای مدنظر برای استفاده از سیستم استنتاج فازی در مدل ما جای گرفتند. پس از نهایی شدن متغیرهای ورودی توابع عضویت آن‌ها از نوع گوسی انتخاب گردید. توابع گوسی دارای این ویژگی بوده که تغییرات در تابع هدف را به‌طور نرم و آهسته برای هر یک از متغیرهای ورودی در نظر می‌گیرد.

هدف منطق فازی نگاشت از فضای ورودی به فضای خروجی است. یک ساز و کار ابتدایی در این راستا استفاده از یک مجموعه از دستورهای اگر-آنگاه تحت عنوان قواعد فازی است. این قواعد به‌طور موازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و ترتیب آن‌ها اهمیتی ندارد. برای نگاشت فضای ورودی به فضای خروجی نیاز به تابعی تحت عنوان تابع عضویت خواهد بود. تابع عضویت نموداری است که نحوهٔ نگاشت هر نقطه از فضای ورودی را به یک مقدار عضویت (درجه عضویت) بین ۰ تا ۱ تعریف می‌کند. تنها شرطی که تابع عضویت باید اجرا کند این است که خروجی آن بین ۰ تا ۱ باشد [۲۵, ۲۶]. برای رسیدن به

جدول ۳. بازه تغییرات متغیرهای ورودی سیستم استنتاج فازی

Table 3. Ranges of input variables of Fuzzy Inference System

متغیر	بازه تغییرات
PCI شاخص وضعیت روسازی	۰-۱۰۰
SN عدد سازه‌ای	۰-۱۰
IRI شاخص بین‌المللی ناهمواری	۰-۱۶
DV درصد ضریب کاهندگی ناشی از خرابی سازه‌ای	۰-۱۰۰
DPCI میزان کاهش *PCI* در یک سال	۰-۶
BPN عدد پاندول بریتانیایی	۰-۱۰۰

جدول ۴. نمونه جدول قواعد فازی

Table 4. A Sample of Fuzzy rules

PCI	*SN*	*IRI*	*DV*	*DPCI*	*BPN*	P_{ij}
کم	کم	کم	کم	کم	کم	متوسط
کم	کم	کم	کم	کم	متوسط	متوسط
کم	کم	کم	کم	کم	زیاد	متوسط
کم	کم	کم	کم	متوسط	کم	زیاد
کم	کم	کم	کم	متوسط	متوسط	زیاد
کم	کم	کم	کم	متوسط	زیاد	متوسط
کم	کم	کم	کم	زیاد	کم	زیاد
کم	کم	کم	کم	زیاد	متوسط	زیاد
کم	کم	کم	کم	زیاد	زیاد	زیاد
کم	کم	کم	متوسط	کم	کم	زیاد

این هدف در مقاله جاری بر مبنای ادبیات تحقیق برای هشت گزینه ترمیم و نگهداری شامل پر کردن ترک[1]، فاگ سیل[2]، اسلاری سیل[3]، چیپ سیل[4]، میکروسرفیسینگ[5]، بازیافت[6]، روکش[7] و بازسازی[8] به صورت مجزا یک جدول قواعد فازی که هر کدام مشتمل بر ۷۲۹ قاعده بود، توسعه داده شد. ده سطر از جدول قاعده مربوط به بازسازی برای نمونه در جدول ۴ آورده شده است. توجه شود که بین هر یک از متغیرهای ورودی در جدول ۴، AND وجود دارد.

لازم به ذکر است که هر دو مرحله فوق (برنامه‌ریزی خطی و سیستم استنتاج فازی) با کدنویسی در متلب انجام شده‌اند.

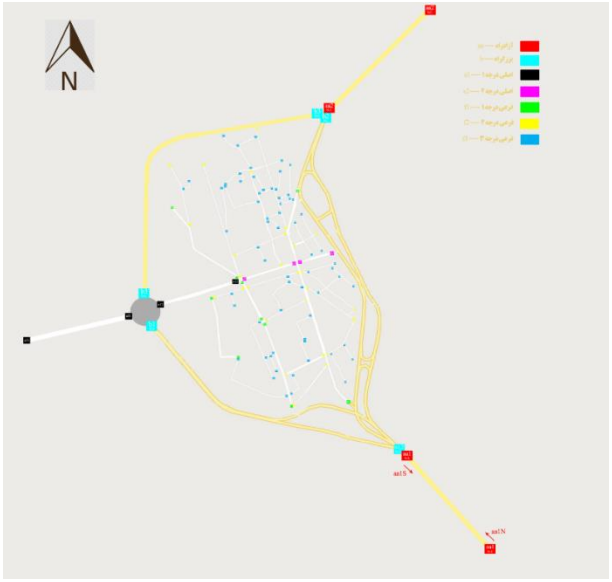
1 Crack Filling
2 Fog seal
3 Slurry Seal
4 Chip Seal
5 Microsurfacing
6 Recycle
7 Overlay
8 Reconstruction

لازم به ذکر است در این پژوهش از مدل‌های پیش‌بینی وضعیت روسازی استفاده نشده است و این امر بدین معناست که سازمان متولی راه برای استفاده از مدل ارائه شده می‌بایست هر سال تمامی پارامترها و شاخص‌های مربوط به مدل را برداشت کند که این کار از نظر عملیاتی و اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود. این مسأله به عنوان محدودیت پژوهش جاری است.

۴- داده‌های تحقیق

در این تحقیق برای نشان دادن نحوه عملکرد الگوریتم تعریف شده از یک مثال عددی بهره گرفته شده است. مثال عددی که با هدف نمایش نحوه به کارگیری و نتایج مدل جاری است با الگوگیری از شبکهٔ راه های شهر ماهان واقع در استان کرمان که در شکل ۳ نشان داده شده، انجام شده است.

لازم به ذکر است شبکه راه مذکور از ۶۶ شاخه و ۲۴۴ قطعه



شکل ۳. شبکه راه مورد مطالعه

Fig. 3. Case study road network

جدول ۵. نمونه‌ای از مشخصات شاخه‌های شبکه روسازی مورد مطالعه

Table 5. An example of the characteristics of the pavement network branches in the case study

ردیف	نام شاخه	طبقه‌بندی عملکردی	ترافیک (*AADT*)	اهمیت تجاری گردشی	دسترسی (تعداد راه جایگزین)	اهمیت (ترافیک + دسترسی)	طول شاخه (کیلومتر)
1	aa1N	آزادراه	6350	1	0	1	8.5
2	aa1S	آزادراه	6830	1	0	1	8.5
3	aa2N	آزادراه	7000	1	0	1	10
4	aa2S	آزادراه	6810	1	0	1	10
5	b1N	بزرگراه	6300	1	1	4	20
6	b1S	بزرگراه	5910	0	1	5	19
7	b2N	بزرگراه	5770	1	1	5	26
8	b2S	بزرگراه	6360	1	1	4	26
9	b3N	بزرگراه	6770	1	0	1	22
10	b3S	بزرگراه	6200	1	0	1	22

تشکیل شده است. برای نمونه چند سطر از مشخصات شاخه‌ها و قطعات شبکه روسازی شکل ۳ در جداول ۵ و ۷ آورده شده است.

پارامتر اهمیت تجاری گردشی که در ستون پنجم جدول ۵ آورده شده است، در سه دسته کم (عدد ۰)، متوسط (عدد ۱) و زیاد (عدد ۲) دسته‌بندی می‌شود و البته یک پارامتر محلی است و بستگی به نظر کارشناس سازمان متولی راه دارد.

پارامتر دسترسی که در ستون ششم آورده شده است به این نکته اشاره دارد که اگر یک قطعه از یک شاخه خاص روسازی برای اعمال گزینه ترمیم و نگهداری انتخاب شود آیا راه جایگزینی برای آن شاخه وجود دارد یا خیر؟ این پارامتر نیز در سه دسته کم (عدم وجود راه جایگزین)، متوسط (وجود یک راه جایگزین) و زیاد (وجود بیش از یک راه جایگزین) دسته‌بندی شده است.

جدول ۶. شاخص عددی تعریف شده برای پارامتر اهمیت شاخه‌های روسازی

Table 6. Numerical index defined as the parameter of pavement branches importance

اهمیت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
دسترسی	کم	کم	کم	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد
ترافیک	زیاد	متوسط	کم	زیاد	متوسط	کم	زیاد	متوسط	کم

جدول ۷. نمونه‌ای از مشخصات قطعات شبکه روسازی مورد مطالعه

Table 7. An example of the characteristics of the pavement network sections in the case study

نام قطعه	*PCI*	*SN*	*IRI*	درصد ضریب کاهندگی ناشی از خرابی سازه‌ای	کاهش *PCI* در یک سال	*BPN*	مساحت قطعه (مترمربع)
aa1N-5	57	7.7	1	86	4	55	11200
aa1S-1	47	7.9	3.8	43	5	25	14400
aa1S-2	86	8.9	3.1	30	2	97	16800
aa1S-3	49	8	4.6	84	5	53	12800
aa1S-4	89	6.3	4.1	16	2	90	16000
aa1S-5	54	8.2	3	82	3	90	8000
aa2N-1	78	8.5	3	6	2	78	13600
aa2N-2	69	6.2	4.9	68	3	80	15200
aa2N-3	71	8.8	4.5	67	2	90	16800
aa2N-4	58	6.2	1.6	9	5	43	12800
aa2N-5	72	7.2	1	31	2	24	12000

پارامتر اهمیت که در ستون هفتم آورده شده ترکیبی از ترافیک و دسترسی است. ترافیک که همان متوسط ترافیک روزانه سالیانه مورد نظر است به سه دسته کم (AADT[1]≤۲۵۰۰)، متوسط (AADT ۶۰۰۰ - ۲۵۰۰) و زیاد (AADT≥۶۰۰۰) تقسیم می‌شود. دسترسی هم شامل سه گروه کم (هیچ راه جایگزینی وجود ندارد)، متوسط (یک راه جایگزین وجود دارد) و زیاد (بیش از یک راه جایگزین وجود دارد) است. ترکیب حالات مختلف پارامترهای ترافیک و دسترسی همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است ۹ حالت می‌شود که عدد ۱ نشان‌دهنده اهمیت بالا و عدد ۹ نشان‌دهنده کمترین اهمیت است.

لازم به ذکر است در مجموع شبکه روسازی مد نظر ما از ۲۴۴ قطعه تشکیل شده است که برای نمونه چند سطر از داده‌های قطعات در جدول ۷ نشان داده شده است. اعداد لحاظ شده برای شاخص های PCI، SN، IRI، DV، DPCI و BPN صرفاً به عنوان یک مثال عددی و با هدف نمایش عملکرد مدل آورده شده‌اند. البته این موضوع لطمه ای به روش تحقیق پیشنهادی نخواهد زد، چرا که فرآیند ارائه شده وابسته به داده خاصی نبوده و با ارائه هر نوع داده ای که این ۶ متغیر را در بر داشته باشد می توان از سیستم استنتاج فازی خروجی دریافت کرد.

۵- نتایج تحقیق

در ابتدا ماتریس‌های مقایسه زوجی (بر اساس نظر خبرگان و کارشناسان برای معیارها و زیرمعیارهای مدنظر) که برای انجام فرآیند تحلیل سلسله مراتبی تشکیل شده‌اند و وزن شاخه‌های روسازی (ω_j) که به وسیله AHP با نرم‌افزار Expert Choice ۱۱ به دست آمده است را مشاهده می‌کنید.

در شکل ۴ اعداد نوشته شده در محور افقی نشان‌دهنده مقدار وزن و اسامی نوشته شده در محور عمودی نام شاخه‌های شبکه روسازی است که این اوزان به صورت دقیق در جدول ۱۲ نیز آورده شده است.

1 Average Annual Daily Traffic

جدول ۸. مقایسه زوجی معیارها

Table 8. Paired comparisons of criteria

	طبقه‌بندی عملکردی	ترافیک	دسترسی	اهمیت تجاری گردشی
طبقه‌بندی عملکردی	۱	۲	۴	۵
ترافیک		۱	۲	۳
دسترسی			۱	۳
اهمیت تجاری گردشی				۱

جدول ۹. مقایسه زوجی زیرمعیارهای ترافیک و اهمیت تجاری گردشی

Table 9. Paired comparisons of traffic and commercial-tourism sub-criteria

	زیاد	متوسط	کم
زیاد	۱	۳	۵
متوسط		۱	۳
کم			۱

جدول ۱۰. مقایسه زوجی زیرمعیارهای دسترسی

Table 10. Paired comparisons of access sub-criteria

	زیاد	متوسط	کم
زیاد	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$
متوسط		1	$\frac{1}{3}$
کم			1

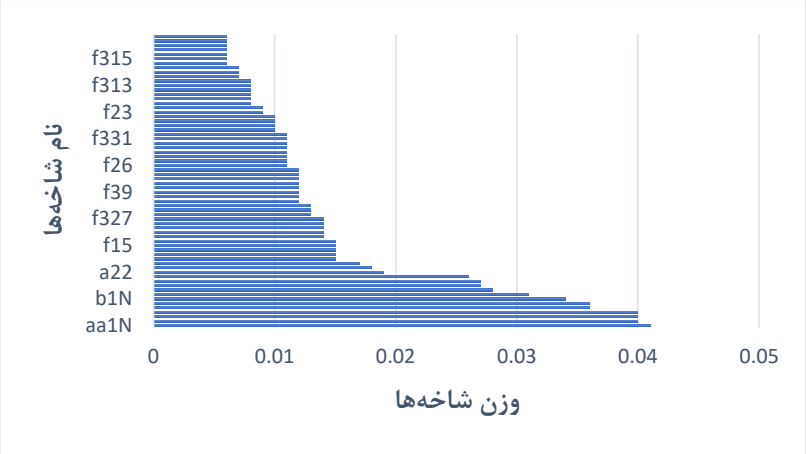
جدول ۱۱. مقایسه زوجی زیرمعیارهای طبقه‌بندی عملکردی

Table 11. Paired comparisons of functional classification sub-criteria

	آزادراه	بزرگراه	اصلی ۱	اصلی ۲	فرعی ۱	فرعی ۲	فرعی ۳
آزادراه	۱	۲	۳	۴	۶	۷	۸
بزرگراه		۱	۲	۳	۵	۶	۷
اصلی ۱			۱	۲	۴	۵	۶
اصلی ۲				۱	۳	۴	۵
فرعی ۱					۱	۳	۴
فرعی ۲						۱	۲
فرعی ۳							۱

احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی توسط مدل فازی محاسبه شده است. توابع عضویت برای شاخص‌های ورودی گوسی هستند. توابع عضویت برای متغیرهای ورودی در شکل ۵ نشان داده شده است.

جداول قواعد فازی توسعه داده شده برای گزینه‌های اسلاری سیل، چیپ سیل و میکروسرفیسینگ مشابه هم هستند. دلیل این



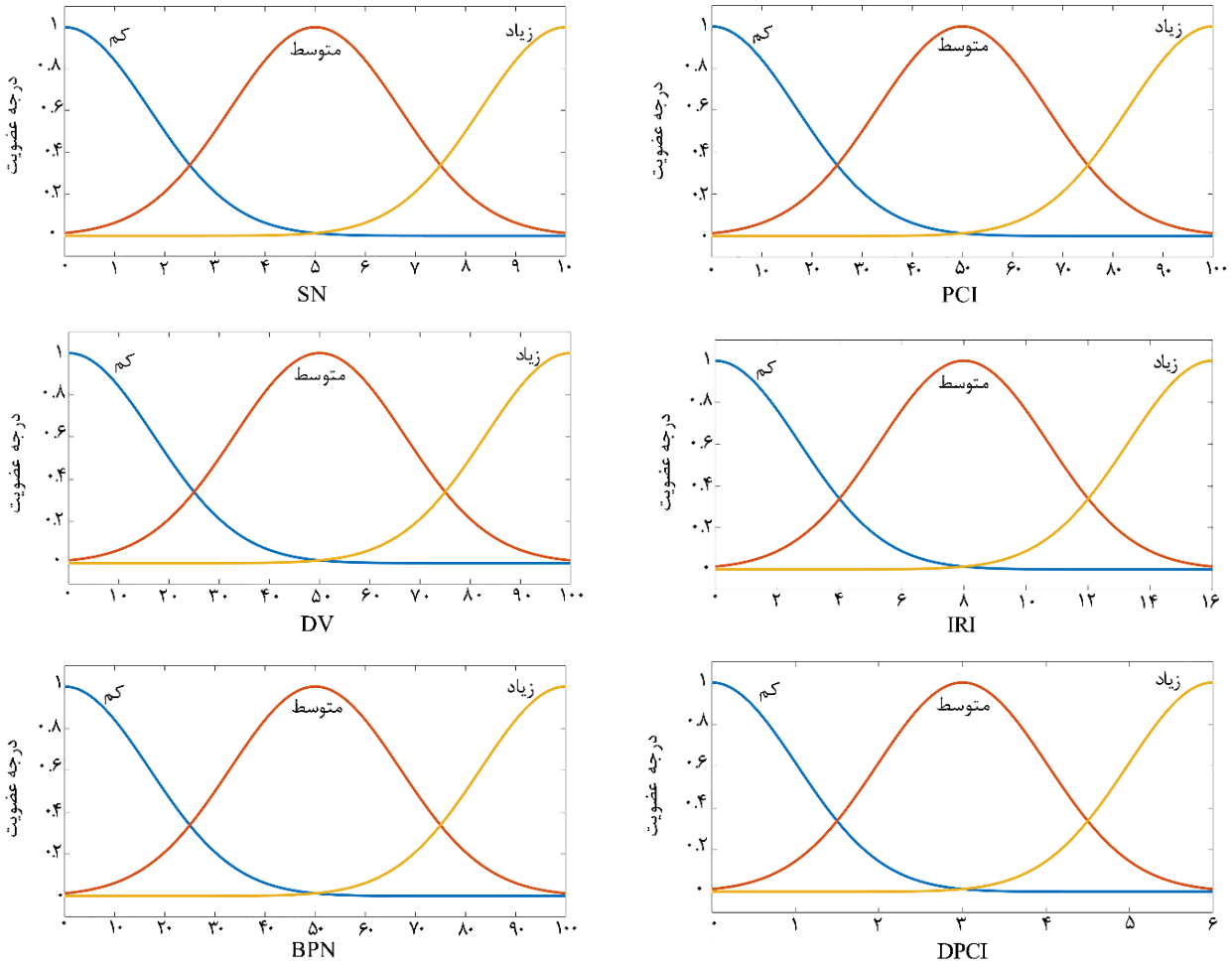
شکل ۴. نمودار اوزان شاخه‌های شبکه روسازی

Fig. 4. Weights diagram of pavement network branches

جدول ۱۲. وزن شاخه‌های شبکه روسازی

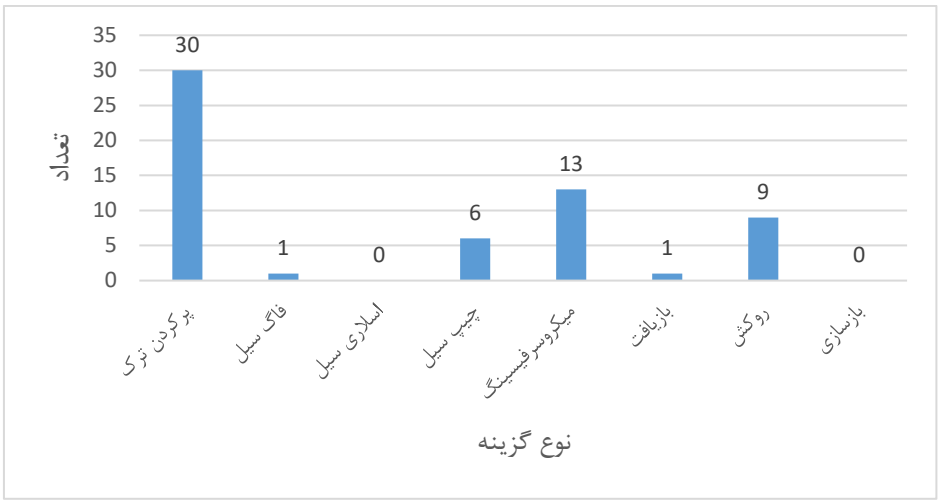
Table 12. Weight of pavement network branches

نام شاخه	وزن	نام شاخه	وزن	نام شاخه	وزن
aa1N	*0.041*	*f311*	*0.014*	*f21*	*0.01*
aa1S	*0.04*	*f318*	*0.014*	*f27*	*0.01*
aa2N	*0.04*	*f327*	*0.014*	*f324*	*0.01*
aa2S	*0.04*	*f24*	*0.013*	*f328*	*0.01*
b3N	*0.036*	*f212*	*0.013*	*f23*	*0.009*
b3S	*0.036*	*f214*	*0.013*	*f210*	*0.009*
b1N	*0.034*	*f33*	*0.012*	*f22*	*0.008*
b2S	*0.031*	*f36*	*0.012*	*f213*	*0.008*
b1S	*0.028*	*f39*	*0.012*	*f38*	*0.008*
a11	*0.027*	*f312*	*0.012*	*f310*	*0.008*
a12	*0.027*	*f323*	*0.012*	*f313*	*0.008*
b2N	*0.026*	*f326*	*0.012*	*f330*	*0.008*
a22	*0.019*	*f329*	*0.012*	*f28*	*0.007*
a21	*0.018*	*f333*	*0.012*	*f29*	*0.007*
f14	*0.017*	*f26*	*0.011*	*f325*	*0.007*
f11	*0.015*	*f211*	*0.011*	*f314*	*0.006*
f12	*0.015*	*f32*	*0.011*	*f315*	*0.006*
f13	*0.015*	*f34*	*0.011*	*f316*	*0.006*
f15	*0.015*	*f35*	*0.011*	*f317*	*0.006*
f25	*0.015*	*f319*	*0.011*	*f320*	*0.006*
f31	*0.014*	*f331*	*0.011*	*f321*	*0.006*
f37	*0.014*	*f332*	*0.011*	*f322*	*0.006*



شکل ۵. توابع عضویت ورودی برای مدل‌سازی با استفاده از سیستم استنتاج فازی

Fig. 5. Input membership functions for modeling by Fuzzy Inference System



شکل ۶. تعداد گزینه‌های انتخاب شده از هر روش

Fig. 6. Frequency of options selected from each method

جدول ۱۳. جزییات قطعات انتخاب شده برای ترمیم و نگهداری و نوع روش انتخاب شده

Table 13. Details of sections selected for maintenance and rehabilitation and type of selected method

شماره قطعه	نوع ترمیم و نگهداری	شماره قطعه	نوع ترمیم و نگهداری	شماره قطعه	نوع ترمیم و نگهداری
1	1	54	1	15	5
7	1	57	1	19	5
9	1	58	1	23	5
11	1	61	1	28	5
14	1	63	1	53	5
16	1	69	1	65	5
18	1	76	1	68	5
20	1	79	1	73	5
21	1	81	1	74	5
24	1	83	1	75	5
27	1	91	2	2	6
30	1	36	4	5	7
31	1	37	4	6	7
38	1	49	4	8	7
41	1	59	4	10	7
43	1	60	4	17	7
46	1	62	4	22	7
50	1	3	5	64	7
51	1	4	5	66	7
52	1	13	5	67	7

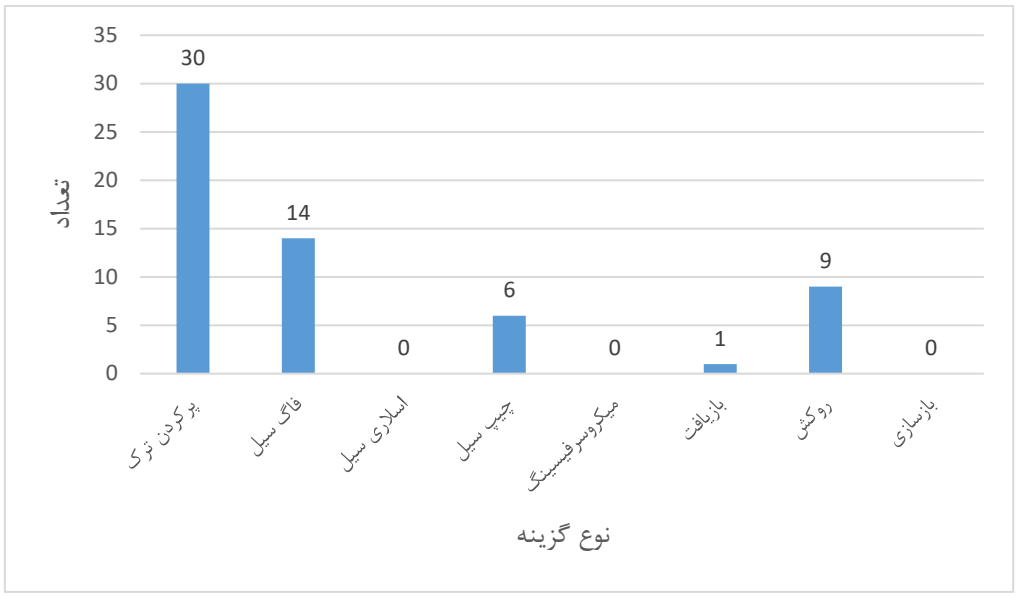
امر هم به ماهیت این روش‌ها و متغیرهای ورودی سیستم استنتاج فازی که در این مقاله در نظر گرفته شدند، برمی‌گردد. این گزینه‌ها بر روسازی‌هایی با شرایط تقریباً یکسان سازه‌ای می‌توانند اعمال شوند؛ چرا که تفاوت اصلی گزینه‌ها بیشتر در بحث هزینه و در ارتباط با ترافیک راه (چیپ سیل برای راه‌های کم تردد، اسلاری سیل برای راه‌های با تردد کم تا متوسط و میکروسرفیسینگ برای راه‌های با تردد متوسط تا زیاد)، اهمیت راه، زمان گیرش و اجرای گزینه است. در نتیجه مدل بدین شکل در نظر گرفته شده است که برای یک قطعه چنانچه راه اهمیت بالایی داشت، به عبارتی شاخص عددی اهمیت آن (پارامتر تعریف شده در جدول ۶) کمتر از ۵ بود مدل گزینه اسلاری سیل را برای این قطعات در نظر نمی‌گیرد.

در نهایت پس از کدنویسی در فضای متلب و اجرای مدل برنامه‌ریزی، نتایج مدل برای دو سناریوی مختلف با فرض بودجه نامحدود (اختصاص ۶۶ میلیارد تومان) و با فرض بودجه محدود (اختصاص ۳۰ میلیارد تومان) به صورت زیر خواهد بود.

ملاحظه می‌شود که در مثال حل شده در سناریوی اول به دلیل اینکه مقدار بودجه ۶۶ میلیارد تومان بود (فرض بودجه نامحدود) و کل پول هزینه شده قریب به ۶۰ میلیارد تومان شد، قید توان حاکم شده و مدل به اندازه مجموع توان در نظر گرفته شده برای سازمان متولی راه (مجموعاً ۶۰) قطعه برای ترمیم و نگهداری پیشنهاد کرده است. قطعات پیشنهاد شده برای دسته نگهداری پیشگیرانه اکثراً از نوع میکروسرفیسینگ هستند و در شاخه‌های با اهمیت بالا (شاخص عددی اهمیت کمتر از ۴) قرار دارند. در جدول ۱۳ نتایج مدل برای انتخاب قطعات با جزییات آورده شده است.

مدل برای بار دیگر با تغییر مقدار قید بودجه به ۳۰ میلیارد تومان و ثابت نگه داشتن توان اجرا شد و برای سناریوی جدید نتایج زیر حاصل شد.

بر اساس توان تعریف شده برای اجرای روش‌های ترمیم و



شکل ۷. تعداد گزینه‌های انتخاب شده از هر روش در سناریوی دوم

Fig. 7. Frequency of options selected from each method in the second scenario

جدول ۱۴. جزییات قطعات انتخاب شده برای ترمیم و نگهداری و نوع روش انتخاب شده

Table 14. Details of sections selected for maintenance and rehabilitation and type of selected method

شماره قطعه	نوع ترمیم و نگهداری	شماره قطعه	نوع ترمیم و نگهداری	شماره قطعه	نوع ترمیم و نگهداری
1	1	60	1	76	2
3	1	61	1	79	2
11	1	62	1	83	2
14	1	63	1	91	2
16	1	65	1	13	4
18	1	69	1	15	4
20	1	73	1	23	4
21	1	74	1	28	4
27	1	81	1	68	4
31	1	106	1	75	4
37	1	4	2	2	6
38	1	7	2	5	7
40	1	9	2	6	7
41	1	19	2	8	7
43	1	24	2	10	7
46	1	30	2	12	7
50	1	51	2	17	7
52	1	57	2	22	7
53	1	58	2	78	7
54	1	59	2	82	7

جدول ۱۵. تعدادی از قطعات انتخاب شده برای پر کردن ترک

Table 15. Some of the selected pieces for filling the crack

شماره قطعه	نام قطعه	*PCI*	*SN*	*IRI*	درصد ضریب کاهندگی ناشی از خرابی سازه‌ای	کاهش *PCI* در یک سال	*BPN*
1	aa1N-1	89	7.6	4	7	2	19
11	aa2N-1	78	8.5	3	6	2	78
46	b2N-9	90	8.4	3.2	23	4	68

نگهداری که در این مقاله برای پرکردن ترک ۳۰، فراگیر پیشگیرانه ۲۰ و اساسی ۳۰ عدد فرض شد، همان‌طور که ذکر شد مقدار بودجه مورد نیاز برای انتخاب بهینه قریب به ۶۰ میلیارد تومان بود. اکنون در سناریوی دوم که مقدار بودجه ۳۰ میلیارد تومان فرض شده است، ملاحظه می‌شود که مدل از حداکثر توان سازمان استفاده می‌کند، ولی گزینه‌های با هزینه کمتر را پیشنهاد می‌دهد (مانند فاگ سیل و چیپ سیل).

۶- نتیجه‌گیری

موضوع مدیریت تعمیر و نگهداری روسازی راه ها یکی از موضوعات مهم در زمینهٔ راه و ترابری بوده و هر ساله بودجه های زیادی برای این منظور اختصاص داده می شود. با توجه به گستردگی شبکهٔ راه های ایران و محدودیت های بودجه ای، لازم است تا در رابطه با تعیین شاخه های دارای اولویت ترمیم و نگهداری و نیز گزینهٔ بهینه برای ترمیم هر یک از قطعات شاخه های دارای اولویت در یک بازه زمانی مشخص پیش رو (معمولاً یک ساله) اقدام نمود. برای این منظور چنانچه عملیات به‌طور سنتی یا بر اساس سلیقه صورت پذیرد در نهایت شبکه روسازی دچار مشکل خواهد شد و هزینه های چرخهٔ عمر روسازی افزایش خواهد یافت. امروزه با رشد ابزارهای ریاضی مرتبط با تصمیم گیری، می توان به شکل علمی و اصولی برای تعیین شاخه های دارای اولویت و نیز تعیین گزینهٔ بهینهٔ ترمیم و نگهداری اقدام نمود. در این مقاله سعی شده تا با ترکیب ابزارهای اولویت‌بندی، هوش مصنوعی و بهینه‌سازی الگوریتمی برای تصمیم گیری در رابطه با انتخاب شاخه های دارای اولویت و نیز تعیین گزینهٔ بهینه برای ترمیم هر قطعه ارائه شود.

ابتدا برای تمیز دادن قطعات روسازی که شرایط و ویژگی‌های یکسانی دارند ولی در شاخه‌هایی با خصوصیات و درجه اهمیت متفاوت قرار دارند، از مدل AHP برای اولویت‌بندی شاخه‌های شبکه روسازی مد نظر استفاده شده است. در گام بعد با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی سعی بر آن شد تا به حداکثرسازی احتمال انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مشخص مانند بودجه موجود، توان سازمان متولی راه که بیانگر حداکثر تعداد قطعاتی است که سازمان می‌تواند در هر سال ترمیم و نگهداری کند، پرداخته شود. برای به دست آوردن احتمال انتخاب هر گزینه ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی از FIS استفاده شده است، بدین شکل که برای هر یک از گزینه‌های پر کردن ترک، فاگ سیل، اسلاری سیل، چیپ سیل، میکروسرفیسینگ، بازیافت، روکش و بازسازی یک جدول قاعده فازی بر اساس ادبیات تحقیق توسعه داده شد. در نهایت پس از کدنویسی در نرم‌افزار متلب مدل برای یک شبکه روسازی در شهر ماهان (کرمان) به کار گرفته شد.

نتایج این مقاله نشان داد که در اولویت‌بندی شاخه‌ها همان‌طور که انتظار می‌رفت طبقه‌بندی عملکردی بیشترین اثرگذاری را داشت و ملاحظه می‌شود که آزادراه‌ها با وزن حدود ۰/۰۴ بیشترین اهمیت را دارند. علاوه بر این ملاحظه می‌شود که بعضی شاخه‌ها با وجود طبقه‌بندی عملکردی مهم‌تر وزن کمتری گرفتند، مانند شاخه b۲N که بزرگراه است ولی وزن کمتری نسبت به شاخه‌های a۱۱ و a۱۲ که معرف دو راه اصلی درجه ۱ هستند، دارد. دلیل این امر سطح دسترسی پایین‌تر راه‌های اصلی مذکور نسبت به بزرگراه مدنظر است. البته از این موارد نمونه‌های متعددی در جدول ۱۲ وجود دارد.

مدل جاری در هر دو سناریوی بودجه‌ای گزینه‌هایی برای پر کردن ترک پیشنهاد می‌دهد که مطابق انتظار مقدار شاخص PCI آن‌ها بالاست و درصد ضریب کاهندگی ناشی از خرابی سازه‌ای کمی دارند، در جدول ۱۵ مشخصات تعدادی از این قطعات برای نمونه آورده شده است.

جدول ۱۶. تعدادی از قطعات انتخاب شده برای ترمیم اساسی

Table 16. Some of the selected pieces for basic healing

شماره قطعه	نام قطعه	*PCI*	*SN*	*IRI*	درصد ضریب کاهندگی ناشی از خرابی سازه‌ای	کاهش *PCI* در یک سال	*BPN*
10	aa1S-5	54	8.2	3	82	3	90
22	aa2S-6	45	6	4.8	57	3	52

در سناریوی اول با فرض بودجه نامحدود نتایج نشان می‌دهد که مدل ضمن استفاده از مجموع توان تعریف شده در قیود، از بین گزینه‌های پیشگیرانه بیشتر از میکروسرفیسینگ و برای قطعات موجود در شاخه‌های با اهمیت بالا استفاده می‌کند (با شاخص عددی اهمیت کمتر از ۵)، اما در سناریوی دوم با فرض بودجه محدود مدل مجدد از مجموع توان تعریف شده در قیود استفاده می‌کند ولی به سمت گزینه‌های با هزینه کمتر سوق پیدا می‌کند. ملاحظه می‌شود از بین گزینه‌های نگهداری پیشگیرانه تعداد فاگ سیل زیاد می‌شود.

مدل در هر دو سناریوی بودجه‌ای گزینه‌هایی را برای ترمیم اساسی پیشنهاد می‌دهد که وضعیت سازه‌ای مناسبی ندارند که اجمالاً مشخصات چند نمونه از این قطعات در جدول ۱۶ آورده شده است.

سازوکار به کار رفته در این مقاله یک الگوریتم مدون و علمی با تابع هدف جدید برای انتخاب گزینه بهینه ترمیم و نگهداری در قطعات روسازی در هر بازه زمانی ارائه می‌دهد و همچنین پارامترهای متعدد مرتبط با شاخه‌ها و قطعات شبکه روسازی در این مدل در نظر گرفته می‌شوند.

مراجع

[1] K.A. Abaza, Deterministic performance prediction model for rehabilitation and management of flexible pavement, International Journal of Pavement Engineering, 2)5) (2004) 121-111.

[2] m. fakhri, m. aalaleh, a. edrisi, introducing the optimal model of pavement maintenance and rehabilitation considering the cost of users for Iran, journal of transportation engineering, 3)7) (2016) 540-523.

[3] M.Y. Shahin, Pavement management for airports, roads, and parking lots, 2005.

[4] F. Javed, Integrated prioritization and optimization approach for pavement management, 2010.

[5] W.T. Chan, T. Fwa, K.Z. Hoque, Constraint handling methods in pavement maintenance programming, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 3)9) (2001) 190-175.

[6] K.A. Abaza, Expected performance of pavement repair works in a global network optimization model, Journal of infrastructure systems, 2)13) (2007) 134-124.

[7] D.G. Peshkin, T.E. Hoerner, K.A. Zimmerman, Optimal timing of pavement preventive maintenance treatment applications, Transportation Research Board, 2004.

[8] AASHTO, Pavement Management Guide, AASHTO, 2012.

[9] G. Huntington, A. Pearce, N. Stroud, J. Jones, K. Ksaibati, Mitigating impacts of oil and gas traffic on southeastern Wyoming county roads, Cheyenne: Wyoming Department of Transportation, (2013).

[10] K. Helali, T. Kazmierowski, A. Bradbury, M. Karan, Application of network-level pavement management system technology to a unique pavement deterioration problem, Transportation research record, 1)1524) (1996) 75-67.

[11] D. Moazami, H. Behbahani, R. Muniandy, Pavement rehabilitation and maintenance prioritization of urban roads using fuzzy logic, Expert Systems with Applications, 10)38) (2011) 12879-12869.

[12] M. Babaei, A. Naderan, Simultaneous Modeling for Pavement Performance Prediction and Optimal Resource Allocation: Goal Programming Approach with an Embedded Markov Decision Process, in: Transportation Research Board 91st Annual Meeting, Washington DC, United States, 2012.

[13] M. De La Garza, S. Akyildiz, D.R. Bish, D.A. Krueger, Network-level optimization of pavement maintenance

renewal strategies, Advanced Engineering Informatics, 4)25) (2011) 712-699.

[14] Z. Wu, G.W. Flintsch, Optimal Selection of Pavement Maintenance & Rehabilitation Projects, in: 7th International Conference on Managing Pavement Assets. TRB, Calgary Alberta, Canada, 2008.

[15] S.V. Bohdanovich, Fuzzy Logic in the Development of a Pavement Management System, in: 7th International Conference "Environmental Engineering." Vilnius Gediminas Technical University Publishing House "Technika," Vilnius, Lithuania, Citeseer, 2008, pp. -1114 1118.

[16] A.A. Elhadidy, E.E. Elbeltagi, M.A. Ammar, Optimum analysis of pavement maintenance using multi-objective genetic algorithms, HBRC Journal, 1)11) (2015) 113-107.

[17] K.A. Abaza, S.A. Ashur, Optimum microscopic pavement management model using constrained integer linear programming, International Journal of Pavement Engineering, 3)10) (2009) 160-149.

[18] W. Gu, Y. Ouyang, S. Madanat, Joint optimization of pavement maintenance and resurfacing planning, Transportation Research Part B: Methodological, 4)46) (2012) 519-511.

[19] Medury, S. Madanat, Incorporating network considerations into pavement management systems: A case for approximate dynamic programming, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 33 (2013) 150-134.

[20] B. Yu, X. Gu, F. Ni, R. Guo, Multi-objective optimization for asphalt pavement maintenance plans at project level: Integrating performance, cost and environment, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 41 (2015) 74-64.

[21] K. Ahmed, B. Al-Khateeb, M. Mahmood, Application of chaos discrete particle swarm optimization algorithm on pavement maintenance scheduling problem, Cluster Computing, 2)22) (2019) 4657-4647.

[22] M.U. Khan, M. Mesbah, L. Ferreira, D.J. Williams, Development of optimum pavement maintenance strategies for a road network, Australian Journal of Civil Engineering, 2)14) (2016) 96-85.

[23] A. Khavandi Khiavi, H. Mohammadi, Multiobjective optimization in pavement management system using NSGA-II method, Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2)144) (2018) 04018016.

[24] C. Torres-Machi, A. Osorio-Lird, A. Chamorro, C. Videla, S.L. Tighe, C. Mourgues, Impact of environmental assessment and budgetary restrictions in pavement maintenance decisions: Application to an urban network, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 59 (2018) 204-192.

[25] L.A. Zadeh, Fuzzy sets, Information and control, 3)8) (1965) 353-338.

[26] F.-T.M. Sandoz, A method to build membership functions application to numerical/symbolic interface building bobrowicz O.-choulet C.-haurat a, (1991).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Behbahani, N. Nadimi, M. Khaleghi, Introducing a New Method for the Pavements' Maintenance and Rehabilitation Planning, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 2801-2820.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17506.6585