

سیستم خبره فازی برای تعیین خطمشی ترمیم و نگهداری راه و جاده

پریا نثری^۱، الیس مسیحی^{۲*}، سید جواد موسوی^۳، محمد تیموری^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس

۴. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۲۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۶/۰۱/۰۷، تاریخ تصویب: ۹۶/۰۱/۲۰)

چکیده

جاده‌ها از مهم‌ترین زیرساخت‌های توسعه کشورها محسوب می‌شوند و نگهداری و ترمیم آن‌ها اهمیت فراوانی دارد. به علت عبور و مرور دائمی خودروها، تغییرات آب‌وهوایی و آسیب‌های دیگر، جاده‌ها در معرض فرسودگی تدریجی قرار دارند. در نتیجه، سازمان‌های راهداری کشورها با چالش‌های مختلفی مواجه می‌شوند. خطمشی‌های تعمیر و نگهداری مختلفی را براساس شرایط روسازی راه‌ها طراحی و تحلیل می‌کنند. به صورت سنتی، تصمیم‌گیری در مورد زمان و نحوه ترمیم و نگهداری به صورت گزینشی توسط متخصصان انجام می‌گیرد، ولی با توجه به زیاد بودن تعداد قطعات در شبکه راه‌ها، تکراری و غیرالگوریتمی بودن فرایند تصمیم‌گیری و نیاز به دقت به منظور عدم تخصیص بودجه اضافی، این کار باید به صورت خودکار با استفاده از یک سیستم پشتیبان تصمیم انجام گیرد. به منظور تعیین اقدامات لازم برای ترمیم و نگهداری قطعات شبکه راه‌ها، ابتدا باید شاخص‌های ارزیابی سطح جاده اندازه‌گیری شوند و سپس متناسب با میزان بودجه تخصیصی در بخش مدیریت روسازی و تخمین هزینه تعمیر هر قطعه، خطمشی مناسب سازمان برای هر یک از قطعات یا برای کل شبکه تعیین شود. در این پژوهش، یک سیستم خبره مبتنی بر قواعد فازی به منظور کمک به فرایند تصمیم‌گیری مدیران سازمان راهداری به منظور تعیین خطمشی نگهداری و ترمیم جاده‌ها توسعه داده شده است که موجب افزایش سرعت و دقت در تصمیم‌گیری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خطمشی ترمیم و نگهداری، سیستم خبره، مدیریت روسازی راه، موتور استنتاج فازی.

مقدمه

می‌شوند: ۱. اصطکاک میلیون‌ها چرخ روی جاده‌ها به تدریج سطح آن‌ها را صیقل می‌دهد که این وضعیت از مقاومت سطح جاده در برابر سرخوردن خودرو می‌کاهد. ۲. کوبیدن مداوم چرخ‌ها، لایه بالایی آسفالت را به سوی پایین و اطراف می‌فشارد و در قسمتی از جاده که بیشتر در معرض عبور چرخ‌هاست، فرورفتگی‌هایی ایجاد می‌کند. این وضع، رانندگی را خطرناک می‌سازد؛ زیرا فرورفتگی‌ها بر هدایت و کنترل ماشین اثر می‌گذارند و در آن‌ها آب جمع می‌شود. ۳. در اثر کم و زیاد شدن فشار بار وارده که در هنگام گذشتن چرخ‌ها بر سطح جاده اعمال می‌شود، کل جاده ترک برمی‌دارد. این فرایند مشابه با فرایند مشهور خستگی فلزات است؛ یعنی جاده در برابر یک نوبت بار سنگین مقاومت می‌کند، اما ساختار آن ممکن است در برابر بارهای مکرر و کوچک‌تر تاب نیاورد [۲]. خرابی جاده‌ها موجب اختلال و تأثیر منفی بر جریان ترافیک، افزایش مصرف

جاده‌ها و حمل و نقل جاده‌ای به عنوان رایج‌ترین نوع حمل و نقل از میان سایر گزینه‌ها (ریلی، هوایی، دریایی و...) یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های دست بشر هستند که نقشی مهم در توسعه اقتصادی و پیشرفت کشورها ایفا می‌کنند. همچنین، هر جاده‌ای در صورت تعمیر نشدن خطرناک می‌شود. فرسودگی جاده‌ها تدریجی اما مداوم است و مرمت آن‌ها به هزینه‌های هنگفتی نیاز دارد؛ برای مثال، در سال ۲۰۱۳ دولت بریتانیا ۱۲ میلیارد یورو فقط برای ترمیم آسفالت هزینه کرده است [۱]. فرسودگی فرایند پیچیده‌ای است و شرایط آب‌وهوایی یکی از عوامل این آسیب به شمار می‌آید، اما مقصر اصلی حرکت خودروها و به ویژه کامیون‌های سنگین است. خودروها به سه شیوه اصلی سبب ایجاد آسیب به کف پوش (آسفالت) جاده‌ها

سوخت و تأخیر زمانی می شود که در نتیجه سطح امنیت عبور و مرور پایین می آید؛ بنابراین، نگهداری از شبکه جاده ای وظیفه ای مهم به منظور حصول اطمینان از عملکرد مناسب آن است.

برای توسعه خط مشی مناسب نگهداری از شبکه جاده ای، اجرای سیستم های تصمیم یار مناسب ضروری است. سیستم مدیریت روسازی براساس منابع موجود ابتدا باید سازگار با هدف سازمانی باشد که عهده دار شبکه راه ها و حمل و نقل است. این سیستم باید چارچوب محاسباتی مشخص داشته باشد؛ مانند سیستم بهینه یابی شبکه، سیستم بهینه یابی پروژه و سیستم اطلاعات مدیریت روسازی. سیستم بهینه یابی شبکه باید شامل مدل های پیش بینی موقت کارایی روسازی و سیستم جمع آوری داده مرتبط با آن باشد [۳].

اولین گام در سیستم مدیریت روسازی، شناسایی و تعریف شبکه است. شبکه یک سیستم مدیریت روسازی است که در یک بانک اطلاعاتی واحد ذخیره می شود. هنگامی که شبکه شناسایی شود، شاخه و قطعه تعریف می شود. یک شاخه جزء قابل شناسایی شبکه و دارای عملکرد مشخص است؛ مانند یک خیابان یا باند فرود. هر شاخه را می توان به یک یا چند قطعه یکنواخت تقسیم کرد که درواقع کوچک ترین واحد مدیریتی است. براساس سطح اجرای مدیریت روسازی، جمع آوری داده برای هر قطعه فرایندی زمانبر است. خطا یا قضاوت نادرست در تقسیم بندی قطعات پس از جمع آوری داده ممکن است بسیار گران تمام شود. تقسیم بندی یک شاخه به قطعات براساس عوامل زیر انجام می گیرد: سازه روسازی، وضعیت ترافیک، تاریخچه ساخت، رتبه روسازی، تأسیسات زه کشی و شانه بندی و وضعیت روسازی [۴]. برای توسعه سیستم مدیریت روسازی باید موارد زیر در نظر گرفته شود: اهداف، روش ها و جمع آوری اطلاعات به صورت پیوسته و نظام مند و همچنین مرتبط با کارایی روسازی و اثر هزینه ای انواع تعمیر و نگهداری [۵].

سیستم مدیریت روسازی ممکن است شامل سیستم های اطلاعاتی چندرسانه ای برای نظارت بر وضعیت شبکه به صورت آن لاین نیز باشد که از طریق آن می توان شرایط و کارایی کلی، ویژگی های جغرافیایی و سایر

داده های زیرساخت را به دست آورد [۶]. برای سنجش وضعیت روسازی شاخص هایی باید در نظر گرفته شوند که عبارت اند از: PCI^۱، IRI^۲، SN^۳، شاخص افت و خیز، LCCA^۴ و... که براساس آن وضعیت هر قطعه و در نهایت وضعیت کلی یک شبکه مشخص می شود. در این پژوهش، شاخص وضعیت روسازی (PCI) به عنوان معیار شرایط سطح در نظر گرفته شده است. ارزیابی شرایط سطح شامل در نظر گرفتن عملکرد ساختاری و عملیاتی تحت چهار شاخص اصلی است: کیفیت سواری، امنیت، میزان خرابی سطح و مناسب بودن ساختار. PCI شاخصی عددی برای وضعیت روسازی است که مقادیری در بازه صفر (برای روسازی با وضعیت مردود) تا ۱۰۰ (برای روسازی با وضعیت عالی) دارد. محاسبه این شاخص براساس نتایج بصری بازرسی است که نوع، شدت و گستردگی خرابی را شناسایی می کند. شاخص بین المللی ناهمواری (IRI) ویژگی ریاضی «پروفایل طولی جاده»^۱ است. ناهمواری روسازی عبارت است از تغییر سطح از حالت هموار به طوری که بر دینامیک وسیله نقلیه، کیفیت سواری و بار دینامیکی سطح مؤثر باشد [۷]. این شاخص نشانگر راحتی و امنیت سواری یک جاده است.

شاخص PCI در ابتدای توسعه به تجهیزات گرانیقیمت و افراد متخصص نیاز ندارد و یک روش ساده بر پایه مشاهده خرابی روسازی است. روسازی بر پایه PCI رده بندی می شود [۸] که در محاسبه آن موارد زیر در نظر گرفته می شوند: قیرزدگی، ترک انعکاسی، وصله کاری، شیارزدگی، ترک خوردگی لبه، هوازدگی [۹]، ترک خوردگی بلوکی، چاله، پایین افتادگی لبه، ترک خوردگی هلالی، ترک پوست سوسماری، لایه لایه شدن، درزگیری، کنار رفتگی، موج زدگی و تورفتگی [۱۰]. برخی از خرابی های جاده که در محاسبه PCI در نظر گرفته می شود، در شکل ۱ نشان داده می شود. امروزه تلاش هایی برای به دست آوردن این شاخص وضعیت به صورت خودکار و با استفاده از روش های دورسنجی صورت گرفته است [۱۱].

PCI بحرانی روشی است که براساس آن تعیین می شود

۱. برش طولی از جاده که تغییرات ارتفاع را در طول برش نشان می دهد.

چندین پروژه به‌دست آمده است. PCI بحرانی به طیفی از PCI گفته می‌شود که با کاهش آن نسبت به زمان در آن طیف، هزینه نگهداری موضعی پیشگیرانه به‌صورت چشمگیر افزایش می‌یابد.

نگهداشتن وضعیت روسازی در سطحی بالاتر از PCI بحرانی نسبت به سطح پایین‌تر از آن از لحاظ اقتصادی به‌صرفه است یا خیر. این روش با استفاده از برنامه‌ریزی پویا در بهینه‌سازی شبکه و با توجه به هزینه چرخه عمر برای



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱. برخی از انواع خرابی‌های روسازی: (الف) موج‌زدگی [۱۲]، (ب) وصله‌کاری [۱۲]، (ج) قیرزدگی [۱۳].

بحرانی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی سه وضعیت را می‌توان برای یک قطعه در نظر گرفت: ۱. بالای PCI بحرانی؛ ۲. برابر طیف PCI بحرانی؛ ۳. پایین‌تر از PCI بحرانی.

خط‌مشی‌های سازمان بر پایه سه نوع عملیات نگهداری آسفالت زیر تعریف می‌شوند:

الف) نگهداری پیشگیرانه: یک راهبرد به‌منظور به‌تأخیرانداختن پیشرفت خرابی و برای کاهش نیاز به نگهداری و فعالیت‌های خدماتی منظم و مکرر برای بهبود یا ارتقای عملکرد و افزایش عمر آسفالت [۱۶].

ب) نگهداری اصلاحی (واکنشی): این روش نگهداری پس از یک نقص مانند کاهش اصطکاک یا به‌وجود آمدن شیارهای متوسط تا عمیق یا ترک‌های گسترده در آسفالت اجرا می‌شود [۱۷].

ج) نگهداری اورژانسی: در شرایط اورژانسی اجرا می‌شود؛ مانند یک تورم یا گودال شدید که به تعمیر فوری نیاز دارد. این روش تا فراهم شدن تعمیرات اساسی و دائمی به‌عنوان راه‌حلی موقت به‌کار می‌رود [۱۸].

رایج‌ترین انواع ترمیم و نگهداری برای هر قطعه شامل جدول ۱ است و با توجه به اینکه هزینه‌های مندرج در آن بر اساس نوع ترمیم توسط سازمان راه‌داری نبراسکا در

برای تعیین PCI بحرانی دستورالعمل زیر ارائه شده است [۱۴]:

۱. منحنی پیش‌بینی وضعیت خانواده قطعات روسازی ترسیم می‌شود و به‌صورت چشمی طیف PCI بحرانی تعیین می‌شود. طبق تعریف ارائه‌شده توسط شاهین و والتر، برای ترسیم این منحنی باید ابتدا خانواده قطعات روسازی تعیین شود، داده‌ها پالایش شود، تحلیل پیرامونی داده‌ها انجام گیرد، مدل خانواده توسعه داده شود و درنهایت منحنی ترسیم شود [۱۵].

۲. خط‌مشی نگهداری تعیین شود که در روش PAVER (توسعه داده‌شده در وزارت دفاع آمریکا) خط‌مشی موضعی پیشگیرانه انتخاب می‌شود.

۳. خط‌مشی برای قطعات به‌کاررفته و نمودار هزینه نگهداری در واحد سطح برای هریک از قطعات ترسیم می‌شود.

۴. طیف PCI بحرانی با توجه به گام‌های ۱ تا ۳ براساس قضاوت مهندسی انتخاب یا تصحیح می‌شود.

براساس مباحث مطرح‌شده، با توجه به تعریف PCI

ایالات متحده به طور دقیق گزارش شده است [۱۹]، در پژوهش حاضر از این منبع برای تخمین هزینه ها استفاده می شود. تمام هزینه ها در این جدول براساس دلار است، ولی در ادامه برحسب میلیون تومان محاسبه می شود. هریک از انواع ترمیم و نگهداری در دسته هایی قرار می گیرد که براساس خط مشی سازمان انتخاب می شوند. براساس خط مشی سازمان، ممکن است برخی از ترمیم ها انجام نگیرد.

اختیار قراردادن مهارت های خبره به دیگران طراحی می شوند و در نتیجه به نوعی الگوی فکری خبره را تقلید می کنند. هرچند اولین تحقیقات برای طراحی سیستم خبره در حوزه هوش مصنوعی صورت گرفت، کاربردهای آن از این حوزه فراتر رفته است. برای ساختن سیستم های خبره، دانش انسان به عنوان گزاره (حقایق ذخیره شده در ذهن) و فرایند در نظر گرفته می شود [۲۰]. سیستم های تصمیم یار، سیستم های اطلاعاتی رایانه ای هستند که شامل مدل های تصمیم تحلیلی و دانش با دامنه ویژه می شوند.

مروری بر سیستم های تصمیم یار نگهداری و تعمیرات راه ها

سیستم های خبره برنامه های رایانه ای هستند که برای در

جدول ۱. هزینه های ترمیم نگهداری برای جاده برحسب نوع ترمیم و نگهداری [۱۹]

ردیف	نوع ترمیم	هزینه (دلار بر هر ۱/۵ کیلومتر)*
۱	Crack seal/Fill	پر کردن درز بتن آسفالتی \$7,000 – \$9,000**
۲	Fog seal	فاگ سیل \$1,750 – \$2,500
۳	Scrub seal	اسکراپ سیل \$7,000 – \$8,000
۴	Slurry seal	اسلاری سیل (درزگیری دوغابی) \$40,000 – \$45,000
۵	Chip seal/Armor coat	اندود لایه ای \$8,000 – \$9,000
۶	Micro surfacing	پوشش ریزدانه \$41,000 – \$43,000
۷	Mill	خراشیدن \$7,500 – \$8,500
۸	Cold-in-place recycle	بازیافت سرد \$100,000 – \$115,000
۹	Hot-in-place recycle	بازیافت گرم \$22,000 – \$25,000
۱۰	Thin cold mix overlay	پوشش مختلط سرد نازک \$18,000 – \$25,000
۱۱	Thin hot mix overlay	پوشش مختلط گرم نازک \$45,000 – \$55,000
۱۲	Thick overlay	پوشش ضخیم \$195,000 – \$215,000
۱۳	Total reconstruction	بازسازی کلی \$525,000 – \$550,000

* این هزینه برای جاده ای با عرض ۷/۳ متر (۲۴ فوت) در نظر گرفته شده است.

** هزینه برای پر کردن ترک به شدت متغیر است، مقدار ذکر شده تخمینی است.

تصمیم گیری طراحی می شود که به تصمیم گیرنده کمک می کند در شرایط پیچیده تصمیماتی مؤثر و کارا بگیرد [۲۲]. ساختار سیستم خبره شامل پنج عنصر اصلی است: موتور استنتاج، دانش پایه، رابط کاربری، حافظه کاری و کسب دانش [۲۳]. در سیستم های خبره، روش های

هدف سیستم تصمیم یار، بهبود تصمیم گیری های فردی از طریق فراهم سازی آسان تر شناخت مسئله، ساختار مسئله، مدیریت اطلاعات، ابزارهای آماری و به کارگیری دانش است [۲۱]. این سیستم به منظور تولید سریع تر و راحت تر گزینه ها و افزایش آگاهی از نواقص در فرایند

فازی برای محاسبه PCI ارائه کرده است که برای دستورالعمل‌ها و سیاست‌های اداره حمل‌ونقل ایالت آلاباما مناسب است. این سیستم چهار ورودی شامل ترک‌های انعکاسی، ترک‌ها در مسیر چرخ‌ها و خارج آن و شیارشدگی است.

در پژوهش حاضر، برای اولین بار بر پایه تعریف PCI بحرانی، یک سیستم خبره فازی معرفی می‌شود. ورودی‌های این سیستم شامل وضعیت PCI براساس بحرانی بودن آن، نوع ترمیم، نگهداری لازم برای قطعات و بودجه موجود سازمان مسئول (راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای کشور) است. خروجی سیستم، خط‌مشی سازمان را برای انجام دادن تعمیرات روی قطعات مشخص می‌کند.

سیستم توسعه داده شده

مفروضات اولیه به این صورت است: ۱. مقدار PCI برای قطعات اندازه‌گیری و مشخص شده است، ۲. طیف PCI بحرانی با روش معرفی شده در ادبیات توسط مهندسان مشخص شده است، ۳. حدود بودجه سازمان به صورت یک متغیر زبانی مشخص است، ۴. انواع ترمیم و نگهداری لازم برای هر قطعه از شبکه مشخص شده است. در مدیریت در سطح شبکه مهندسان براساس پارامترهای گفته شده تصمیم می‌گیرند که خط‌مشی سازمان چگونه انتخاب شود و سپس براساس این خط‌مشی، نوع ترمیم و نگهداری‌های قابل انجام برای هریک از قطعات مشخص می‌شود. اینکه در هر خط‌مشی چه نوع ترمیم و نگهداری در نظر گرفته شود، یک فرایند تصمیم‌گیری مهندسی است. در این پژوهش، یک سیستم خبره برای تعیین خط‌مشی سازمان راهداری پیشنهاد شده و خروجی این سیستم با نظر چند متخصص در این زمینه اعتبارسنجی شده است.

فازیگر

برای هریک از پارامترهای ورودی، یک تابع عضویت فازی در نظر گرفته شده است که این توابع براساس اطلاعات به دست آمده طبق روش Delphi از خبرگان تعریف شده است [۳۰]. ابتدا فرض می‌شود طیف PCI بحرانی از ۵۳ تا ۷۲ است که با متغیر x_1 نمایش داده می‌شود. با توجه به اینکه طیف مورد نظر به صورت مشاهده‌ای براساس منحنی

استانداردی برای بازنمایی دانش به وجود آمده است که متداول‌ترین آن‌ها استفاده از قواعد استخراج شده است که به صورت اگر (شرایط) و آن‌گاه (اقدام) بیان می‌شود. هنگامی که بخش «اگر» قاعده توسط موتور استنتاج درستی آزمایی شود، اقدامات در بخش «آن‌گاه» انجام می‌گیرد. به این عملیات «شلیک کردن»^۵ می‌گویند [۲۴].

از آنجاکه دانش خبره باید با گزاره‌های زبانی بیان شود، همواره با ابهام در مفهوم، عدم قطعیت و تناقض همراه است؛ بنابراین، بهتر است قواعد براساس مجموعه‌های فازی بیان شوند. سیستم‌های خبره فازی امکان شلیک کردن همزمان قواعد قابل شلیک را فراهم می‌کنند [۲۰]. در نتیجه، استفاده از نظریه مجموعه‌های فازی در طراحی سیستم خبره در تصمیمات مدیریتی نیز مؤثر است. در پژوهش حاضر با چنین رویکردی، طراحی سیستم خبره فازی برای تخصیص نوع ترمیم و نگهداری ارائه شده است.

سان و جو [۲۵] در پژوهشی وجود محدودیت در بودجه اولویت‌بندی پروژه‌ها با استفاده از روش AHP و منطق فازی را بررسی کرده‌اند. آن‌ها از یک روش معنایی بر پایه گزاره‌های زبانی برای این اولویت‌بندی بهره بردند. این کار با استفاده از داده‌های به دست آمده از ناهمواری‌ها، افت و خیزها، نرخ اضمحلال، عمق شیارشدگی و ضریب اصطکاک انجام گرفته است. فعالیت‌های ترمیم و نگهداری توسط فرمان و فوا در [۲۶] اولویت‌بندی شده است و هدف، شناسایی رویکردی است که قضاوت مهندسی را بازتاب دهد. سه نوع AHP آورده شده و نتایج آن‌ها با ارزیابی مستقیم مقایسه شده است. هروی و اسماعیلی [۲۷] برای رسیدگی به عدم قطعیت‌ها با در نظر گرفتن هزینه‌های کاربری اضافه برای شرایط نامناسب روسازی در محاسبه LCCA از تئوری مجموعه‌های فازی استفاده کردند و از چرخه عمر عملکرد روسازی به عنوان معیار تابع هدف بهره بردند. لیو و سان [۲۸] برای ارزیابی کارایی سطح از شبکه عصبی با بهینه‌سازی فازی استفاده کردند. آن‌ها با کمک این شبکه نحوه تصمیم‌گیری مهندسی را شبیه‌سازی کردند که ورودی‌های سیستم شامل نرخ بیشینه ترک، بیشترین عمق شیارشدگی، ناهمواری، ضریب سختی و مقاومت در مقابل لیز خوردن بود. بیاچینی [۲۹] یک مدل استدلال

می شود) را براساس نظر خبرگان بدین صورت تعریف کرد: برای گروه بودجه کم، گروه بودجه متوسط، گروه بودجه زیاد و گروه بودجه بسیار زیاد توابع عضویت به ترتیب به صورت روابط ۴ تا ۷ تعریف می شوند که در آن ها هزینه ها برحسب میلیون تومان است.

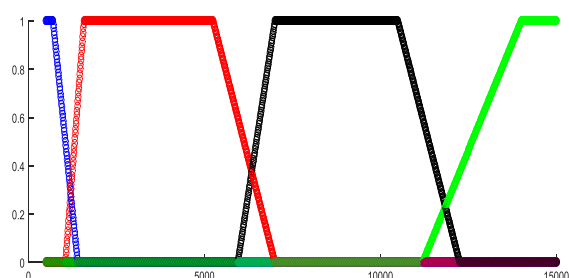
$$\mu_{LB}(x_2) = \begin{cases} 1 & x_2 < 700 \\ \frac{700-x_2}{700} & 700 \leq x_2 \leq 1400 \\ 0 & 1400 < x_2 \end{cases} \quad (۴)$$

$$\mu_{MB}(x_2) = \begin{cases} 0 & x_2 < 1050 \\ \frac{x_2-1050}{525} & 1050 \leq x_2 \leq 1575 \\ 1 & 1575 < x_2 < 5250 \\ \frac{7000-x_2}{1750} & 5250 \leq x_2 \leq 7000 \\ 0 & 7000 < x_2 \end{cases} \quad (۵)$$

$$\mu_{HB}(x_2) = \begin{cases} 0 & x_2 < 5950 \\ \frac{x_2-5950}{1050} & 5950 \leq x_2 \leq 7000 \\ 1 & 7000 < x_2 < 10500 \\ \frac{12250-x_2}{1750} & 10500 \leq x_2 \leq 12250 \\ 0 & 12250 < x_2 \end{cases} \quad (۶)$$

$$\mu_{VHB}(x_2) = \begin{cases} 0 & x_2 < 11200 \\ \frac{x_2-11200}{2800} & 11200 \leq x_2 \leq 14000 \\ 1 & 14000 < x_2 \end{cases} \quad (۷)$$

توابع عضویت برای بودجه کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد در شکل ۳ نشان داده می شود.



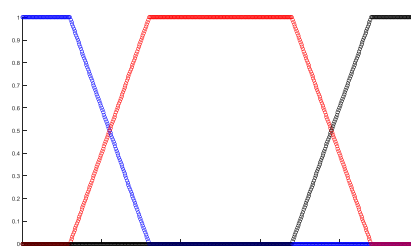
شکل ۳. توابع عضویت متغیر بودجه؛ چپ: بودجه کم، وسط-چپ: بودجه متوسط، وسط-راست: بودجه زیاد و راست: بودجه بسیار زیاد

ترسیم شده خانواده قطعات به دست می آید، در تعریف آن ابهامی وجود دارد که توسط توابع عضویت فازی و براساس نظر خبرگان قابل تعریف است. توابع عضویت PCI پایین تر از بحرانی، بحرانی و بالاتر از بحرانی به ترتیب با روابط ۱ تا ۳ تعریف می شوند.

$$\mu_{DP}(x_1) = \begin{cases} 1 & x_1 < 53 \\ \frac{58-x_1}{5} & 53 \leq x_1 \leq 58 \\ 0 & 58 < x_1 \end{cases} \quad (۱)$$

$$\mu_{CP}(x_1) = \begin{cases} 0 & x_1 < 53 \\ \frac{x_1-53}{5} & 53 \leq x_1 \leq 58 \\ 1 & 58 < x_1 < 67 \\ \frac{72-x_1}{5} & 67 \leq x_1 \leq 72 \\ 0 & 72 < x_1 \end{cases} \quad (۲)$$

$$\mu_{UP}(x_1) = \begin{cases} 0 & x_1 < 67 \\ \frac{x_1-67}{5} & 67 \leq x_1 \leq 72 \\ 1 & 72 < x_1 \end{cases} \quad (۳)$$



شکل ۲. توابع عضویت پایین تر از PCI بحرانی (چپ)، PCI بحرانی (وسط) و بالاتر از PCI بحرانی (راست)

مطابق نظر خبرگان، توابع عضویت برای تعریف موجودی اعتبارات (بودجه) سازمان براساس تعداد قطعات شبکه و سابقه هزینه های سازمان را می توان به چهار گروه کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم کرد. معمولاً گروه بودجه بسیار کم در نظر گرفته نمی شود؛ زیرا در مورد بودجه های بسیار کم سازمان توانایی هیچ نوع عملیات ترمیم و نگهداری را ندارد. اگر فرض شود در یک شبکه فقط ۱۰ قطعه وجود دارد و عرض قطعات ۷/۳ متر و طول آن ها ۱/۵ کیلومتر است، می توان توابع عضویت فازی برای میزان اعتبارات سازمان (که با متغیر x_2 نمایش داده

هستند، ابهام دارند. با تعریف متغیر فازی x_3 برای هزینه ترمیم خرابی، می‌توان این ابهام را به کمک توابع عضویت هزینه ترمیم فازی ۸ تا ۱۵ مدل کرد که شرح آن‌ها در جدول ۲ می‌آید. در این روابط، هزینه‌ها برحسب میلیون تومان است که از نظرهای خبرگان استخراج شده است. توابع عضویت بودجه براساس نوع ترمیم و نگهداری در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده می‌شود.

با توجه به نظر خبرگان، روش یا مجموعه روش‌های ترمیم و نگهداری را می‌توان براساس بودجه آن تعیین کرد. البته در تصمیم‌گیری مدیریتی، بودجه قابل‌تخصیص نیز مؤثر است. با توجه به اینکه دستگاه‌هایی به‌صورت خودکار میزان خرابی را تعیین می‌کنند، تخمین این هزینه‌ها به‌صورت خودکار برای هر قطعه امکان‌پذیر است [۱۱]. از آنجاکه این هزینه‌ها تخمینی و براساس تصمیمات مهندسی

جدول ۲. شرح کدها و روابط مجموعه روش‌های ترمیم

نوع ترمیم	کد	رابطه
فاگ سیل	A	(۸)
اسکراپ سیل (درزگیری سایشی)، خراشیدن، اندود لایه‌ای و پرکردن درز بتن آسفالتی	B	(۹)
اسلاری سیل (درزگیری دوغابی) و پوشش ریزدانه	C	(۱۰)
بازیافت سرد	D	(۱۱)
پوشش مختلط سرد نازک و بازیافت گرم	E	(۱۲)
پوشش مختلط گرم نازک	F	(۱۳)
پوشش ضخیم	G	(۱۴)
بازسازی کلی	H	(۱۵)

$$\mu_{SIS}(x_3) = \begin{cases} 0 & x_3 < 136.5 \\ \frac{x_3 - 136.5}{7} & 136.5 \leq x_3 \leq 143.5 \\ 1 & 143.5 < x_3 < 154 \\ \frac{161 - x_3}{7} & 154 \leq x_3 \leq 161 \\ 0 & 161 < x_3 \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{FoS}(x_3) = \begin{cases} 0 & x_3 < 5.6 \\ \frac{x_3 - 5.6}{200} & 5.6 \leq x_3 \leq 6.3 \\ 1 & 6.3 < x_3 < 8.05 \\ \frac{9.1 - x_3}{1.05} & 8.05 \leq x_3 \leq 9.1 \\ 0 & 9.1 < x_3 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{CPR}(x_3) = \begin{cases} 0 & x_3 < 343 \\ \frac{x_3 - 343}{14} & 343 \leq x_3 \leq 357 \\ 1 & 357 < x_3 < 395.5 \\ \frac{409.5 - x_3}{14} & 395.5 \leq x_3 \leq 409.5 \\ 0 & 409.5 < x_3 \end{cases} \quad (11)$$

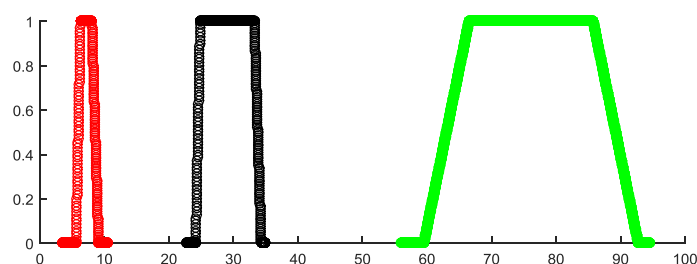
$$\mu_{ScS}(x_3) = \begin{cases} 0 & x_3 < 24.15 \\ \frac{x_3 - 24.15}{0.7} & 24.15 \leq x_3 \leq 24.85 \\ 1 & 24.85 < x_3 < 33.25 \\ \frac{34.3 - x_3}{1.05} & 33.25 \leq x_3 \leq 34.3 \\ 0 & 34.3 < x_3 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{TO}(x_3) = \begin{cases} 0 & x_3 < 665 \\ \frac{x_3 - 665}{28} & 665 \leq x_3 \leq 693 \\ 1 & 693 < x_3 < 735 \\ \frac{759.5 - x_3}{24.5} & 735 \leq x_3 \leq 759.5 \\ 0 & 759.5 < x_3 \end{cases} \quad (14)$$

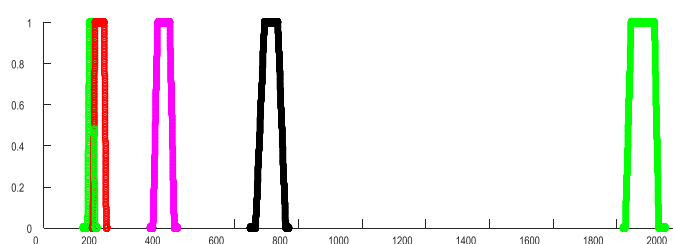
$$\mu_{TCO}(x_3) = \begin{cases} 0 & x_3 < 59.5 \\ \frac{x_3 - 59.5}{7} & 59.5 \leq x_3 \leq 66.5 \\ 1 & 66.5 < x_3 < 85.75 \\ \frac{92.75 - x_3}{7} & 85.75 \leq x_3 \leq 92.75 \\ 0 & 92.75 < x_3 \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{TR}(x_3) = \begin{cases} 0 & x_3 < 1827 \\ \frac{x_3 - 1827}{17.5} & 1827 \leq x_3 \leq 1844.5 \\ 1 & 1844.5 < x_3 < 1918 \\ \frac{1932 - x_3}{14} & 1918 \leq x_3 \leq 1932 \\ 0 & 1932 < x_3 \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{THO}(x_3) = \begin{cases} 0 & x_3 < 154 \\ \frac{x_3 - 154}{7} & 154 \leq x_3 \leq 161 \\ 1 & 161 < x_3 < 189 \\ \frac{196 - x_3}{7} & 189 \leq x_3 \leq 196 \\ 0 & 196 < x_3 \end{cases} \quad (13)$$



شکل ۴. توابع عضویت انواع روش های ترمیم و نگهداری به ترتیب از چپ به راست با کدهای A، B و E

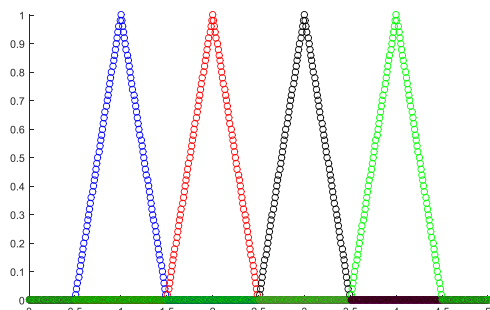


شکل ۵. توابع عضویت انواع روش های ترمیم و نگهداری به ترتیب از چپ به راست با کدهای C، D، F، G و H

زیرا در این صورت سازگاری بیشتری با ورودی های موتور استنتاج و ابهام موجود در تصمیمات نهایی دارد و نتایج نیز بهتر می شود. تابع عضویت خروجی به صورت رابطه ۱۶ تعریف می شود.

برای تعیین تابع عضویت خط مشی سازمان- که متغیر خروجی سیستم است و با y نشان داده می شود- ابتدا باید محدوده ای عددی از اولویت های سازمان تعیین شود که برای این منظور محدوده ۱ تا ۴ مناسب است. طبق نظر خبرگان برای تعریف توابع عضویت y ، به جای استفاده از تابع عضویت تکین از تابع عضویت مثلثی استفاده می شود؛

سازمان براساس نظر خبرگان به صورت خلاصه در ادامه بیان می شود.



شکل ۶. توابع عضویت خطمشی: چپ برای $p=1$ ؛ وسط-چپ برای $p=2$ ؛ وسط-راست برای $p=3$ ؛ راست برای $p=4$

$$\mu_p(y) = \begin{cases} 0 & y < (p-0.5) \\ \frac{y-(p-0.5)}{0.5} & (p-0.5) \leq y \leq p \\ \frac{(p+0.5)-y}{0.5} & p \leq y \leq (p+0.5) \\ 0 & (p+0.5) < y \end{cases} \quad (16)$$

که در آن p همان اولویت های ۱ تا ۴ است که به صورت زیر نام گذاری شده اند: ۱. موضعی موقتی؛ ۲. موضعی پیشگیرانه؛ ۳. فراگیر پیشگیرانه؛ ۴. اساسی. شکل ۶ نشان دهنده این توابع عضویت است.

تعریف قواعد

قواعد حاکم بر تصمیم گیری ها برای تعیین خطمشی

۱. اگر میزان اعتبارات کم باشد، آن گاه خطمشی سازمان موضعی موقتی است.
۲. اگر اعتبارات زیاد متوسط باشد، آن گاه خطمشی سازمان موضعی پیشگیرانه است.
۳. اگر اعتبارات سازمان زیاد باشد، آن گاه خطمشی سازمان فراگیر پیشگیرانه است.
۴. اگر اعتبارات سازمان بسیار زیاد باشد، آن گاه خطمشی سازمان تعمیر و نگهداری اساسی است.
۵. اگر میزان PCI قطعه پایین تر از بحرانی باشد و بودجه سازمان کم باشد، آن گاه خطمشی سازمان موضعی موقتی است.
۶. اگر میزان PCI قطعه بحرانی باشد و بودجه سازمان متوسط باشد، آن گاه خطمشی سازمان موضعی پیشگیرانه است.
۷. اگر میزان PCI قطعه بالاتر از بحرانی باشد، آن گاه خطمشی سازمان فراگیر پیشگیرانه است.
۸. اگر میزان PCI قطعه پایین تر از بحرانی است، آن گاه خطمشی سازمان ترمیم و نگهداری اساسی است.
۹. اگر نوع ترمیم و نگهداری A است، آن گاه خطمشی سازمان موضعی پیشگیرانه است.
۱۰. اگر نوع ترمیم و نگهداری B است، آن گاه خطمشی سازمان موضعی موقتی است.
۱۱. اگر نوع ترمیم و نگهداری C است، آن گاه خطمشی سازمان موضعی پیشگیرانه است.
۱۲. اگر نوع ترمیم و نگهداری D است، آن گاه خطمشی سازمان فراگیر پیشگیرانه است.
۱۳. اگر نوع ترمیم و نگهداری E است، آن گاه خطمشی سازمان موضعی پیشگیرانه است.
۱۴. اگر نوع ترمیم و نگهداری F است، آن گاه خطمشی سازمان فراگیر پیشگیرانه است.
۱۵. اگر نوع ترمیم و نگهداری G است، آن گاه خطمشی سازمان ترمیم اساسی است.
۱۶. اگر نوع ترمیم و نگهداری H است، آن گاه خطمشی سازمان ترمیم اساسی است.

$$y^* = \frac{\int_Y \mu_{FP2'}(y) \cdot y dy}{\int_Y \mu_{FP2'}(y) dy} \quad (21)$$

برای مشخص شدن تصمیم، فاصله مرکز ثقل با اولویت‌ها محاسبه می‌شود و اولویت با کمترین فاصله تا مرکز ثقل به عنوان خروجی و خط‌مشی سازمان انتخاب می‌شود:

$$D = \arg \min_p [dist(y_{out}, p)] \quad (22)$$

به کارگیری سیستم توسعه داده شده

موتور استنتاج با استفاده از ابزار فازی در نرم افزار MATLAB پیاده شده است. خروجی این سیستم برای PCI، نوع ترمیم و نگهداری و میزان بودجه فرضی و براساس پیشنهاد خبره برای شش سناریو در نظر گرفته شده است (جدول ۳). این نوع تصمیم‌گیری در تعمیر و نگهداری، خط‌مشی قابل اعمال برای هر قطعه را به طور جداگانه تعیین می‌کند. برای اعمال تصمیم به کل شبکه، می‌توان میانگین تصمیمات کل قطعات را به شبکه اعمال کرد یا با طراحی یک موتور استنتاج کل قطعات را در نظر گرفت. از آنجا که فرایند تصمیم‌گیری در تمام این سناریوها مشابه هم هستند، در ادامه به شرح دو نمونه سناریوی ۱ و ۶ بسنده می‌شود.

سناریوی ۱: در این سناریو، PCI قطعه براساس برآورد خرابی‌ها با مقدار ۷۸ محاسبه شده است که بالاتر از PCI بحرانی است. همچنین، هزینه تخمین زده شده برای ترمیم خرابی‌ها ۶۶۵ میلیون تومان است و با توجه به میزان ۸۷۵۰ میلیون تومان بودجه موجود، خبرگان نوع تعمیر و نگهداری فراگیر پیشگیرانه را پیشنهاد کرده‌اند. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار خروجی سیستم ۲/۵۴ است که با اعمال رابطه ۲۲ مقدار ۳ به دست می‌آید که منطبق با نظر خبرگان است. توابع عضویت ورودی و خروجی موتور فازی برای این سناریوی در شکل ۷ نشان داده می‌شود.

سناریوی ۶: در این سناریو، مقدار PCI قطعه ۳۰ به دست آمده است که کمتر از PCI بحرانی است، هزینه ترمیم ۱۷۵ میلیون تومان برآورد شده است. با توجه به اعتبارات سازمان که ۶۶۵ میلیون تومان است، خبرگان نوع ترمیم و نگهداری موضعی موقتی را پیشنهاد می‌کنند.

با فرض اینکه R_i قاعده i -ام ($i = 1, \dots, 16$) در موتور استنتاج باشد، برای تعیین تابع سطح درستی این استلزام‌ها از استلزام Mamdani زیر استفاده می‌شود:

$$\mu_D(x, y) = \min[\mu_{FP1}, \mu_{FP2}] \quad (17)$$

که در آن μ_D سطح درستی استلزام را بیان می‌کند و μ_{PF1} و μ_{PF2} به ترتیب درجه عضویت مقدم و تالی در استلزام است. قاعده ۱ دارای α -cut برابر ۱، قواعد ۲ تا ۶ دارای α -cut برابر ۰/۵ و قواعد ۷ تا ۱۶ دارای α -cut برابر ۰/۴ هستند که براساس نظر خبرگان و بر مبنای اهمیت آن‌ها در تصمیم‌نهایی تنظیم شده‌اند.

موتور استنتاج

نوع استنتاج به کاررفته از نوع GMP^۶ است و از آنجا که براساس استنتاج مجموعه فازی مربوط به یک متغیر زبانی مشخص می‌شود، می‌توان هم از اپراتور max-min و هم از اپراتور max-product استفاده کرد که در روابط ۱۸ و ۱۹ نشان داده می‌شوند.

$$(18)$$

$$\begin{aligned} \mu_{FP2'}(y) &= \max_{x \in X} \{ \min(\mu_{FP1'}(x), \mu_{FP1 \rightarrow FP2}(x, y)) \} \\ \mu_{FP2'}(y) &= \max_{x \in X} \{ \mu_{FP1'}(x) \cdot \mu_{FP1 \rightarrow FP2}(x, y) \} \end{aligned} \quad (19)$$

که در آن $\mu_{FP1'}$ مقدم جدید است که براساس استلزام موجود تالی جدید $\mu_{FP2'}$ را می‌دهد. ترکیب قواعد با استفاده از موتور استنتاج Mamdani انجام گرفته است که در آن برای نرم S از max استفاده شده است. در نتیجه، رابطه کلی آن به صورت رابطه ۲۰ است.

$$(20)$$

$$Q_M(x_1, x_2, x_3, y) = \max\{R_1(x_1, x_2, x_3, y), \dots, R_{16}(x_1, x_2, x_3, y)\}$$

و افاز یگر

برای اینکه به طور دقیق مشخص شود چه تصمیمی باید اتخاذ شود، ابتدا باید خروجی سیستم (y^*) غیر فازی شود. برای این کار مرکز ثقل تابع خروجی محاسبه می‌شود و مشخص می‌شود که این عدد به کدام اولویت نزدیک‌تر است. محاسبه مرکز ثقل به صورت رابطه ۲۱ است.

اعتبارات سازمان زیاد باشد برآورد هزینه ترمیم و نگهداری- که براساس نوع ترمیم و نگهداری تخمین زده می‌شود- تعیین‌کننده است که این موضوع در سناریوی ۳ مشخص است.

در صورتی که مقدار تعیین شده برای ورودی‌های سیستم فازی در جدول ۳ خارج از بازه مشخص شده برای ورودی‌های باشد، مقدار آن به‌طور خودکار برابر با انتهای بازه قرار داده می‌شود. این مورد در شکل‌های ۷ و ۸ مشخص است.

همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، خروجی سیستم ۲/۴۸ است که پس از اعمال رابطه ۲۲ مقدار ۲ به‌دست می‌آید. در این تصمیم‌گیری، میزان اعتبارات سازمان عامل اساسی در تصمیم‌گیری خبره است؛ زیرا با بودجه کم، سازمان در انجام دادن نوع ترمیم و نگهداری محدودیت بسیاری دارد. این موضوع در موتور استنتاج با در نظر گرفتن مقدار ۱ برای α -cut مربوط به قاعده R_1 لحاظ شده است. توابع عضویت ورودی و خروجی موتور فازی برای این سناریو در شکل ۸ نشان داده می‌شود، درحالی‌که اگر

جدول ۳. نتایج سیستم خبره و مقایسه با نظر خبرگان

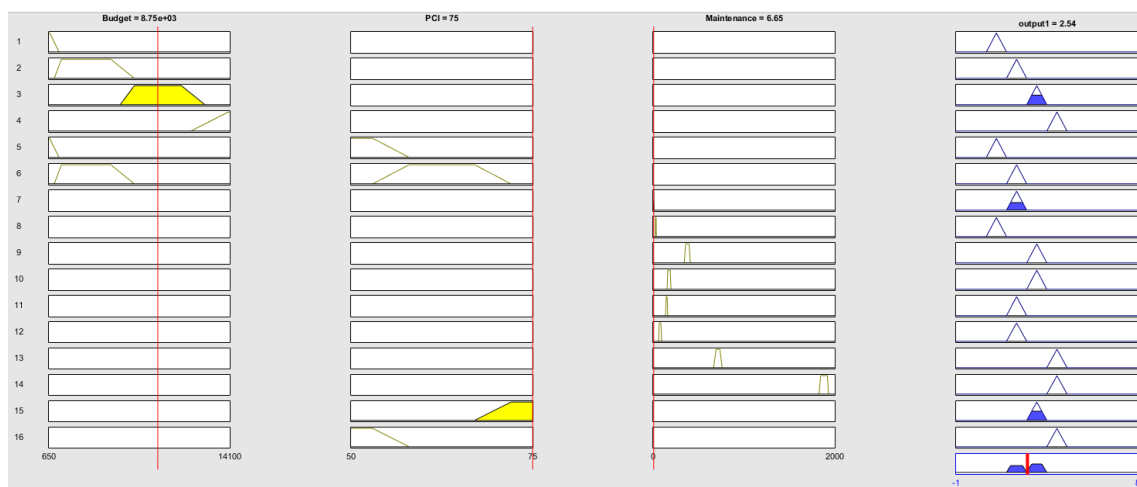
سناریو	PCI	هزینه و (نوع) ترمیم	میزان و سطح اعتبارات	خروجی سیستم قبل از اعمال (۲۲)	خروجی سیستم بعد از اعمال (۲۲)	نظر خبرگان
۱	۷۸	۶۶۵ (A)	۸۷۵۰ (زیاد)	۲,۵۴	۳	۳
۲	۵۹	۲۸ (B)	۷۰۰ (کم)	۱/۰۰	۱	۱
۳	۴۸	۸۵۵ (H)	۲۲۷۵۰ (بسیار زیاد)	۴,۰۰	۴	۴
۴	۶۰	۳۷۵ (D)	۳۵۰۰ (متوسط)	۲,۴۶	۲	۲
۵	۹۰	۷۲/۳۴ (E)	۸۷۵۰ (زیاد)	۲,۵۴	۳	۳
۶	۳۰	۱۷۵ (F)	۶۶۵ (کم)	۲,۴۸	۲	۲

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

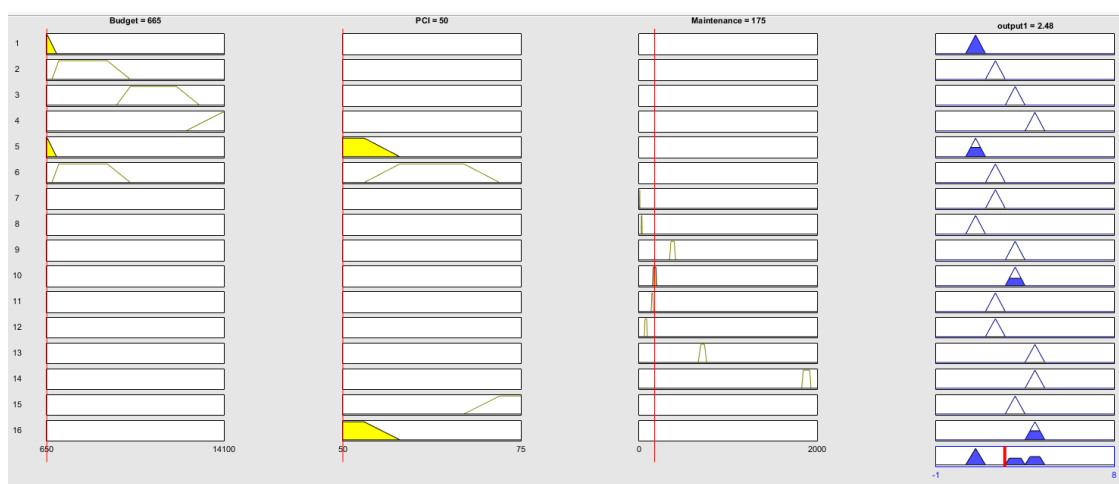
همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، خروجی این سیستم با نظر خبرگان تطابق کامل دارد. با توجه به اینکه پارامترهای ورودی فقط PCI، هزینه ترمیم و میزان اعتبارات است، روش تصمیم‌گیری خبره را می‌توان تقریباً به‌طور کامل در این سیستم وارد کرد که شامل قواعدی که خبره براساس آن تصمیم می‌گیرد، اولویت‌بندی این قواعد، نحوه استنتاج خبره و در نهایت جمع‌بندی‌ای است که خبره انجام می‌دهد. از آنجاکه دریافت نحوه تصمیم‌گیری از خبره و تبدیل آن به یک دانش صریح توسط متغیرهای زبانی صورت می‌گیرد، این دریافت دانش همیشه با ابهام همراه است.

در این پژوهش، برای مدل کردن این ابهام از نظریه مجموعه‌های فازی استفاده شده است و نتایجی رضایت‌بخش مطابق نظر خبرگان به‌دست آمده است.

استفاده از این سیستم برای زمانی مناسب است که تعداد قطعات بسیار زیاد و شبکه به‌شدت بزرگ باشد. بخش عمده و زمانبر در سیستم مدیریت روسازی، جمع‌آوری داده و تخمین هزینه برای خرابی‌هاست که این موضوع جنبه دیگری از مدیریت نگهداری است و باید در مورد آن تحقیق صورت گیرد. با توجه به این موضوع و همچنین نیاز به سرعت و دقت در تصمیم‌گیری برای تعیین خط‌مشی‌ای که براساس آن بودجه در نظر گرفته می‌شود، تصمیم‌گیری درست و با کمترین اشتباه بسیار حیاتی است. براساس تعداد زیاد قطعات در شبکه‌های بزرگ، این سیستم تصمیم‌یاری به مدیران کمک می‌کند تصمیمات سریع‌تر و با کمترین اشتباه را اتخاذ کنند. برای اطمینان از تصمیمات ارائه‌شده توسط سیستم، باید میزان پایداری آن در مقابل داده‌های اشتباه و تناقض نیز بررسی شود.



شکل ۷. ورودی‌ها و خروجی موتور فازی برای سناریوی ۱



شکل ۸. ورودی‌ها و خروجی موتور فازی برای سناریوی ۶

مدنظر قرار می‌گیرد. همچنین، برای ادامه کار، سیستمی طراحی می‌شود که برای تعیین خط‌مشی سازمان درمورد یک شبکه تمام قطعات را به‌طور همزمان مدنظر بگیرد.

در سیستم مدیریت نگهداری راه‌ها، برای تعیین خط‌مشی سازمان، پارامترهای دیگری نیز مدنظر گرفته می‌شوند که توسعه سیستم ارائه‌شده در این پژوهش با پارامترهای ورودی بیشتر و بررسی آن برای داده‌های یک شبکه راه‌های واقعی با تعداد قطعات زیاد در تحقیقات آینده

مراجع

1. BBC, (2014). "Estimated road repairs cost rises to £12bn, survey says", available at: <http://www.bbc.com/news/uk-26862992>
2. Chakrabarti, S., Kodikara, J. K. and Pardo, L. (2002). "Survey results on stabilisation methods and performance of local government roads in Australia", *Road Transp. Res.*, Vol. 11, No. 3, P. 3.

3. Kulkarni, R., Finn, F., Alviti, E., Chuang, J. and Rubinstein, J. (1983). "Development of a pavement management system", Technical report, Kansas Department of Transportation (1983-89), 122 p.
4. Shahin, M. Y. (2005). *Pavement management for airports, roads, and parking lots*, Vol. 501. Springer, New York.
5. Finn, F. N., Terrel, R. L., Le, C. R. and Garrison, W. A. (1976). "Development of pavement management systems for programming roadway maintenance", In *Chemical Abstracts*, Vol. 45, p. 286-330
6. Wang, Kelvin, Qiang Li, Kevin Hall, and Robert Elliott. "Experimentation with gray theory for pavement smoothness prediction". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1990 (2007): pp. 3-13.
7. Janoff, M. S., Nick, J. B., Davit, P. S. and Hayhoe, G. F. (1985). "Pavement roughness and rideability", *NCHRP Rep.*, No. 275.
8. Magazine, C. I. (1980). "Pavement condition index (PCI)", *Concr. Int.*, Vol. 2, No. 09.
9. Kohn, Starr D., and Mohamed Y. Shahin. (1984) "Evaluation of the Pavement Condition Index for Use on Porous Friction Surfaces". No. CERL-TR-M-351. Construction engineering research lab (army), Champaign IL, 1984.
10. VicRoads (2009), "Guide to Surface Inspection Rating", Technical Bulletin 50, State Government of Victoria Australia, Sept. 2009.
11. Schnebele, E., Tanyu, B. F., Cervone, G. and Waters, N. (2015). "Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment", *Eur. Transp. Res. Rev.*, Vol. 7, No. 2, PP. 1–19.
12. U.S. Department of Transportation, "Roadway Distresses (AC)," *U.S. Department of Transportation*. [Online]. Available: <https://faapaveair.faa.gov/Help/default.htm?url=Documents%2Froadwaydistressesac.htm>. [Accessed: 07-Feb-2017].
13. Texas Department of Transportation, "Principal Faults or Defects in Seal Coats or Surface Treatments," *Texas Department of Transportation*. [Online]. Available: http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/scm/principal_faults_or_defects_in_seal_coats_or_surface_treatments.htm. [Accessed: 07-Feb-2017].
14. Shahin, M. Y. and Walther, J. A. (1990). "Pavement maintenance management for roads and streets using the PAVER system", Technical Report M-90/05, US Army Construction Engineering Research Laboratory, July 1990.
15. Nunez M. M. and Shahin, M. Y. (1986). "Pavement condition data analysis and modeling", *Transportation Research Record*, Vol. 1070, pp. 125-132.
16. Labi, S. and Sinha, K. C. (2005). "Life-cycle evaluation of flexible pavement preventive maintenance", *J. Transp. Eng.*, Oct. 2005, pp. 744-751.
17. Foo, H. C. and Akhras, G. (1995). "Prototype knowledge-based system for corrective maintenance of pavements", *J. Transp. Eng.*, Vol. 121, No. 6, PP. 517–523.
18. Feng, C. M. and Wang, T. C. (2003). "Highway emergency rehabilitation scheduling in post-earthquake 72 hours", *J. 5th East. Asia Soc. Transp. Stud.*, Vol. 5, PP. 3276–3285.
19. Johanns, M. and Craig, J. (2002) "Pavement Maintenance Manual." Nebraska Department of Roads, USA.
20. Siler, W. and Buckley, J. J. (2005). *Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning*, John Wiley & Sons.
21. Santana, M. (1995). "Managerial learning: A neglected dimension in decision support systems", In *System Sciences. Proceedings of the Twenty-Eighth Hawaii International Conference on*, 1995, Vol. 4, PP. 82–91.
22. Yam, R. C. M., Tse, P. W., Li, L. and Tu, P. (2001). "Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 17, No. 5, PP. 383–391.
23. Haas, R., Hudson, W. R. and Zaniewski, J. P. (1994). *Modern pavement management*. Krieger Pub Co., ISBN: 978-0894645884.

24. Ritchie, S. G., Yeh, C.-I., Mahoney, J. P. and Jackson, N. C. (1987). "Surface condition expert system for pavement rehabilitation planning", *J. Transp. Eng.*, Vol. 113, No. 2, PP. 155–167.
25. Sun L. and Gu, W. (2010). "Pavement condition assessment using fuzzy logic theory and analytic hierarchy process", *J. Transp. Eng.*, Vol. 137, No. 9, PP. 648–655.
26. Farhan, J. and Fwa, T. (2009). "Pavement maintenance prioritization using analytic hierarchy process", *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, No. 2093, PP. 12–24.
27. Heravi, G. and Esmaeeli, A. N. (2013). "Fuzzy multicriteria decision-making approach for pavement project evaluation using life-cycle cost/performance analysis", *J. Infrastruct. Syst.*, Vol. 20, No. 2, pp. 04014002-1-7.
28. Liu, Y. and Sun, M. (2007). "Fuzzy optimization BP neural network model for pavement performance assessment", In *Grey Systems and Intelligent Services. GSIS 2007. IEEE International Conference on*, 2007, PP. 1031–1034.
29. Bianchini, A. (2012). "Fuzzy representation of pavement condition for efficient pavement management", *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, Vol. 27, No. 8, PP. 608–619.
30. Linstone, H. A. and Turoff, M. (1975). *The Delphi method: Techniques and applications*, Vol. 29. Addison-Wesley Reading, MA.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Pavement Condition Index
2. International Roughness Index
3. Slippery Number
4. Life Cycle Cost Assessment
5. Firing
6. Generalized Modus Ponens