ارائه مدل بهینه تعمیر و نگهداری روسازی با در نظر گرفتن هزینه کاربران برای ایران

منصور فخری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
محمد آلاله (نویسنده مسئول)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
علی ادریسی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
E-mail: mohammad.alaleh870508@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۳/۰٤/۲۰ پذیرش: ۱۳۹٤/۰۲/۲۰

چکیده

سیستم مدیریت روسازی، روش و یا عملکردی ایجاد می‌کند که مدیران از آن در هدایت و کنترل منابع خود در جهت کاهش هزینه‌ها استفاده می‌کنند. در این بین، استفاده بهینه از فعالیت‌های بهسازی، نقش قابل توجهی در کاهش هزینه‌های مدیریت راه دارد. در این پژوهش، یک مدل برای بهینه کردن فعالیت‌های تعمیر و نگهداری راه ارائه می‌شود و دو تابع هدف به طور هم زمان بهینه می شوند. دو تابع هدف مورد نظر در مدل عبارتند از: ۱)کمینه کردن هزینه کاربران راه ۲) کمینه کردن هزینه مدیریت راه. از مدل تحقیق، برای بهسازی روسازی محور بوئین زهرا - ساوه استفاده شده و پیش‌بینی عملکرد روسازی با استفاده از فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف صورت گرفته است. بر اساس جواب بهینه مدل، به ترتیب کل هزینه مدیریت راه و کاربران راه، ۲۱/۵ و ۱۳۵۳٤میلیارد ریال به‌دست آمده است که نشان می دهد هزینه‌های کاربران راه در برابر هزینه‌های مدیریت راه، بسیار بیشتر است. بنابراین در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، باید این هزینه هنگفت مورد توجه قرار گیرد. همچنین نتایج مدل نشان می‌دهند فعالیت‌های پیشگیرانه نسبت به روکش آسفالتی، در کاهش هزینه‌های کاربران (بر واحد هزینه) بیشتر موثر است و مقدار هزینه‌های بهسازی در سال‌های اولیه دوره برنامه‌ریزی، تاثیر بسیار زیادی در کل هزینه‌های بهسازی مدیریت راه دارند. بنابراین مدیریت مذکور باید در سال‌های اولیه دوره برنامه‌ریزی، بودجه مناسب و کافی برای طرح‌های بهسازی اختصاص دهد.

واژه های کلیدی: نگهداری راه، هزینه کاربران، فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف

۱. مقدمه

سیستم مدیریت روسازی، روش و یا عملکردی ایجاد میکند که مدیران از آن، در هدایت و کنترل منابع خود درجهت کاهش هزینه‌ها استفاده می‌کنند [Hass, Hudson, 2000]. در این بین، استفاده بهینه از فعالیت‌های بهسازی، نقش قابل توجهی در کاهش هزینه‌های مدیریت راه دارد. در سال‌های اخیر، علم نگهداری راه به یک موضوع کلیدی در مدیریت‌های راه تبدیل شده [Chou and Le, 2011] و سبب شده است تمرکز این اداره ها از ساخت راه‌های جدید به نگهداری راه‌های موجود تغییر کند. اگرچه نگهداری راه‌ها، یکی از فعالیت‌های پرهزینه در زمینه حمل و نقل به شمار می‌آید [Wang et al. 2003, Abbas et al. 2007, Byrne et al. 2009, Yang et al. 2009, Ying and Salari, 2010, Deshpande et al. 2010, Bianchni and Bandini, 2010, Lajnef et al. 2011, Wang and Li, 2011] اما می‌توان با یک برنامه‌ریزی بهینه و مناسب، هزینه‌های نگهداری را کاهش داد. جهت رسیدن به این هدف، فرد تصمیم گیرنده با موانع بزرگی از جمله تعیین قطعه‌هایی از روسازی که نیاز به بهسازی دارند، تعیین زمان و چگونگی بهسازی آن قطعه‌ها و این‌که کدام گزینه‌های مرمت و نگهداری باید استفاده شود، روبرو می‌گردد [Gao, Xie, Zhang, 2012]. مدل‌سازی فعالیت‌های مرمت و نگهداری، یک راه حل مناسب برای غلبه بر این موانع است. با گسترش یک مدل مرمت و نگهدای راه و پیدا کردن جواب بهینه آن، می‌توان بر این مشکلات غلبه کرد. بنابراین، با استفاده از جواب بهینه مدل، می‌توان به یک برنامه‌ریزی بهینه و مناسب دست یافت که در این راستا، توجه به دو نکته ضروری است:

۱- در مسئله برنامه‌ریزی نگهداری راه بهتر است گزینه‌های بهسازی هر باند، بر مبنای نرخ خرابی و ترافیک عبوری آن باند طرح شوند. برای مثال، بر اساس آیین نامه آشتو(۱۹۹۳)، یک قطعه[1] روسازی(یک‌طرفه) که دارای دو باند است، به ترتیب باندهای سمت راست و چپ، ۸۰ و ۲۰ درصد ترافیک عبوری را به خود اختصاص می‌دهند و در این صورت اقتصادی نیست، باند سمت چپ که ترافیک آن یک چهارم باند سمت راست است، دارای الگوهای بهسازی مشابه با باند سمت راست باشد. در شکل‌های ۱(الف)و ۲(ب) دو روسازی که باندهای آنها خرابی‌های متفاوتی دارند، ارائه شده است که نشان می‌دهد طراحی گزینه‌های مرمت مشابه برای باندهای مختلف مناسب نیست

۲- برای دست‌یابی به یک برنامه‌ریزی مناسب، هزینه کاربران راه نیز، مانند هزینه مدیریت راه اهمیت فراوانی دارد و نیازمند بررسی و ارزیابی است.[Gao and Zhang, 2013]. هزینه کاربران راه، یکی از هزینه‌های مهم در برآورد اقتصادی پروژه‌های ترمیم و نگهداری روسازی راه می‌باشد. از هزینه‌های عملیاتی وسایل‌نقلیه[2] می‌توان به منظور مقایسه سیستم‌های حمل‌ونقل، تعیین منابع استفاده کنندگان از راه، کمک و... استفاده نمود [Fakhri, 2007]. همچنین با توجه به روند افزایشی قیمت سوخت و ناوگان حمل و نقل کشور، کاهش هزینه کاربران راه نیز حائز اهمیت است. بنابراین با اعمال گزینه‌های مناسب نگهداری راه در زمان‌های مناسب، علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌های مرمت و نگهداری، می‌توان این هزینه‌ها را نیز کاهش داد [Shormaij, 2012]. از این رو، در مقاله حاضر، به بررسی برنامه‌ریزی فعالیت‌های بهسازی راه با در نظر گرفتن دو نکته بالا، پرداخته می‌شود. در واقع هدف این پژوهش، توسعه یک مدل بهسازی راه است که بتواند با در نظر گرفتن این موارد، گزینه های

(الف) (ب)

شکل ۱. باندهای مختلف با خرابی‌های مختلف

مرمت را تعیین نماید. ساختار مقاله حاضر این گونه طراحی شده است: بخش دوم مروری بر ادبیات موضوعی است. در بخش سوم مطالعه موردی و در بخش چهارم روش تحقیق تشریح گردیده است که شامل پیش‌بینی عملکرد روسازی[3]، محاسبه هزینه کاربران[4]، مدل‌سازی فعالیت‌های بهسازی است. در بخش پنجم، روش حل مدل ارائه می‌شود. در بخش ششم، نتایج حاصل از حل مدل و در پایان نیز، نتایج به‌دست آمده به اختصار بیان می‌گردد.

۲. مروری بر کارهای انجام شده

تاکنون، محققان بسیاری در چند دهه اخیر به دنبال روشهای مختلفی برای کاهش هزینه های نگهداری روسازی بوده‌اند و در این راستا مقالات و کتاب های متعددی منتشر شده است. مقاله گلابی، کالکارنی و وی، در سال ۱۹۸۲ میلادی، نخستین مقاله‌ای بود که مفهوم برنامه‌ریزی بهینه فعالیت‌های بهسازی راه‌ها را معرفی کرد. آنها در تحقیق خود، عملکرد روسازی را با استفاده از مدل‌های احتمالاتی پیش‌بینی کردند [Golabi, Kulkarni and Way, 1982]. در سال ۱۹۹۸ میلادی، سازمان فدرال راه‌های آمریکا با حل یک مسئله بهینه سازی نگهداری راه، گزینه‌های تعمیر و بهسازی بهینه یکی از آزاد راه‌های ایالت ایندیانا را تعیین کرد. این برنامه‌ریزی بهینه، سبب صرفه‌جویی در بودجه و منابع (نیروی انسانی ، تجهیزات و مصالح) شد و سطح سرویس راه نیز افزایش پیدا کرد [Chan and Hoque, 2000]. فریرا، سانتوس و آنتونس در سال ۲۰۰۲، یک مدل بهینه‌یابی تک هدفه توسعه دادند که در آن، هزینه‌های بهسازی مدیریت راه کمینه شد. در این مدل، ارزیابی راه با توجه به مقدار ترک روسازی، شیارشدگی و خردشدگی سطحی صورت گرفت و عملکرد روسازی با استفاده از مدل‌های قطعی پیش‌بینی شد [Ferriera, Santos and Antunes, 2002]. وو و خرارد در سال ۲۰۰۹ با حل یک مسئله بهینه‌یابی، فعالیت‌های مرمت و نگهداری بهینه ۸۰۰۰ کیلومتر از راه‌های کشور آمریکا را تعیین کردند. در این تحقیق، دو تابع هدف در نظر گرفته شد: ۱) کمینه کردن هزینه‌های بهسازی مدیریت راه ۲) ماکزیمم کردن سطح سرویس راه [Wu and Gerardo, 2009]. جائو و ژانگ در سال ۲۰۱۳، با در نظر گرفتن دو تابع هدف هزینه کاربران و هزینه‌های بهسازی، یک مدل خطی را برای تعیین گزینه‌های بهسازی بهینه یکی از آزادراه‌های کشور هنک کنگ گسترش دادند. [Gao and Zhang, 2013].

مقالات مورد بررسی تاکنون، بر اساس این که باندهای مختلف یک راه با وجود بار ترافیکی متفاوت، خرابی یکسانی دارند، ارائه شده‌اند. در واقع آنچه تاکنون در ادبیات موضوعی مورد استفاده قرار گرفته است، طراحی گزینه‌های بهسازی مشابه برای باندهای مختلف یک راه بوده است. در این حالت، فرض موجود چندان قابل پذیرش نیست و برنامه‌ریزی فعالیت‌های بهسازی بر این اساس، نمی‌تواند مناسب نیست. فراهم کردن مدلی که بتواند تعمیر و بهسازی هر باند را بر مبنای نرخ خرابی و ترافیک عبوری آن باند طرح نماید، می‌تواند در بهینه‌یابی هزینه‌های نگهداری راه به ویژه برای سازمان‌های متولی امر نگهداری راه، تأثیر بسزایی داشته باشد. همچنین به دلیل آنچه در مورد اهمیت هزینه کاربران راه ذکر شد، در این نوشتار سعی شده است یک مدل جدید جهت تعیین هزینه کاربران راه نیز ارائه گردد. بنابراین این مقاله به دنبال طراحی مدلی است که بتواند با در نظر گرفتن این دو ویژگی، گزینه‌های بهسازی را تعیین کند.

۳. مطالعه موردی

محور بوئین زهرا – ساوه، بخشی از راه اصلی شمالی جنوبی قزوین – سه راهی اشتهارد – ساوه – سلفچگان است. جاده مذکور با طول ۸۹ کیلومتر، ۱۷/۵ کیلومتر آن چهار خطه و مابقی آن دو خطه است. در این تحقیق، بخش چهار خطه راه (مسیر رفت) مورد بررسی قرار گرفته که به ترتیب در جداول (۱) و (۲) میزان ترافیک، مشخصات سازه‌ای روسازی و ESAL این محور در سال۱۳۹۲ آورده شده است. لازم به ذکر است با توجه به در دسترس بودن داده‌های ترافیکی محور مورد نظر تا سال ۱۳۸٦، نویسندگان تحقیق سعی کرده اند با استفاده از حداقل داده‌های در دسترس مانند نرخ رشد ترافیک محور مورد نظراطلاعات ترافیکی راه به سال۱۳۹۲، به روز کنند. همچنین مشخصات روسازی محور مانند اطلاعات ترافیکی تا سال ۱۳۸٦ در دسترس

بود و نویسندگان تحقیق سعی کرده اند با استفاده یکی از مطمئن‌ترین روش‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی (با استفاده ازمعادله پترسون که با همکاری بانک جهانی به‌دست آمده و برای تعیین آن به طور گسترده از داده‌های روسازی کشورهای مختلف استفاده شده است) وضعیت روسازی را در سال ۱۳۹۲ پیش‌بینی کند.

همچنین موقعیت این محور در شبکه راه‌های کشور در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۲. موقعیت محور بوئین زهرا - ساوه در شبکه راه‌های کشور

٤. روش تحقیق

٤-١ پیش‌بینی عملکرد روسازی

یکی از مهم‌ترین مولفه‌های یک مدل بهینه‌یابی، روش پیش‌بینی عملکرد روسازی است [Meneses and Ferreira, 2013]. دو دسته عمده مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی عبارتند از: مدل‌های قطعی، مدل‌های احتمالاتی. در مدل‌های قطعی، از معادلات رگرسیون برای پیش‌بینی عملکرد روسازی در آینده استفاده می‌شود، در حالی که مدل‌های احتمالاتی عمدتا از توزیع احتمالی مارکوف استفاده می کنند [Ferreira, Santos, Antunes, 2002]. رفتار روسازی به عواملی مانند وضعیت آب و هوا، مشخصات سازه روسازی، میزان ترافیک و روند اضمحلال روسازی بستگی دارد که در آینده کاملا مشخص نیستند. به همین دلیل مدل‌های قطعی نمی‌توانند تضمین کننده یک قطعه راه، در یک حالت کیفی مشخص در آینده باشند [Ng, Zhang, Waller, 2011]، اما در فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف، ویژگی‌های ماتریس احتمالی انتقال آن، سبب می‌شود فرد تصمیم گیرنده به نتایج تخمینی رضایت بخشی دست یابد [Madanat, Wan .Ibrahim, 1995]

در این تحقیق با توجه به توضیحات مذکور، پیش‌بینی عملکرد روسازی محور بوئین زهرا- ساوه با استفاده از فرآیند مارکوف صورت گرفته است. پیش‌بینی عملکرد روسازی با استفاده از فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف، شامل پنج مرحله زیر است:

٤-١-١ زمان تصمیم‌گیری

زمان تصمیم‌گیری، نقطه زمان‌هایی هستند که فعالیت‌های بهسازی راه شروع می‌شوند [Gao, Zhang, 2013]. در این روش، زمان تصمیم‌گیری ابتدای هر سال و مدت از کار افتادگی(تاخیر) فعالیت‌های بهسازی راه ناچیز فرض می‌شوند. همچنین افق تصمیم‌گیری برای یک

جدول۱. میزان ترافیک محور بوئین زهرا-ساوه در سال ۱۳۹۲

نام محور	سبک				سنگین				رفت و برگشت
	سواری	مینی بوس	جمع	اتوبوس	کامیون دو محوره	کامیون سه محوره	کامیون چهار محوره و بیشتر	جمع	
بوئین زهرا- ساوه	۱۷۸۶	۳۹۷	۲۱۸۳	۱۹۸	٤۸۵۹	۸۹۳	۱۷۸٦	۷۷۳٦	۹۹۱۹

جدول ۲. مشخصات سازه‌ای روسازی و ESAL محور بوئین زهرا- ساوه در سال ۱۳۹۲

ESAL سنگین(میلیون)	ESAL سبک(میلیون)	SNC	SN	CBR	کیلومتر(مسیر یکطرفه)
۵/۵۱۷	۱/۰۵۸۲	۵/۱۷۵۷	۳/۳۶	۲۵	۳۳/۵-۳۵
۵/۵۱۷	۱/۰۵۸۲	۵/۰۴۵۷	۳/۲۳	۲۵	۴۵/۵-۴۸/۵
۵/۵۱۷	۱/۰۵۸۲	۷/۰۲۵۷	۵/۲۱	۲۵	۷۶-۸۹

دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله (۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲) در نظر گرفته شده است.

٤-۱-۲ مجموعه حالت‌های کیفی راه

عملکرد کاربران راه به مسیر راه، درجه و انحنای قطعه‌های راه، تعداد خطوط و ناهمواری راه بستگی دارد. ناهمواری راه، یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی عملکرد راه و تعیین هزینه کاربران راه است. شاخص ناهمواری راه[۵] (IRI) بازه مشخصی ندارد که بتوان بر مبنای آن، عملکرد روسازی را به حالت‌های کیفی معینی طبقه‌بندی کرد. از این رو، فرد تصمیم‌گیرنده هنگام استفاده از IRI به عنوان شاخص عملکرد روسازی در فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف، با مشکل مواجه می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، در این پژوهش شاخص کیفیت سواری[۶] تعریف شده که به ترتیب کوچکترین و بزرگترین مقادیر این شاخص، صفر و پنج هستند [Gao and Zhang, 2013]. در این نوشتار، عملکرد راه با استفاده از شاخص کیفیت سواری به پنج حالت کیفی طبقه‌بندی می‌شود. این پنج حالت‌های کیفی، بصورت مجموعه $S=\{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$ تعریف می‌گردند. جدول (۳) مقادیر RQI و IRI هر یک از حالت‌های کیفی روسازی را نشان می‌دهد.

٤-۱-۳ مجموعه گزینه‌های مرمت و نگهداری

در این تحقیق، برای ساده سازی بحث، چهار گزینه بهسازی k_1 عدم عملیات، k_2 نگهداری پیشگیرانه، k_3 روکش آسفالتی و k بازسازی روسازی) فرض شده‌است. این فعالیت‌ها، به صورت مجموعه $K=[k_1, k_2, k_3, k_4]$ تعریف می‌شوند. گزینه‌های بهسازی مذکور، تاثیرات مختلفی بر راه دارند. بازسازی روسازی می‌تواند یک قطعه راه را در هر حالت کیفی به وضعیت عالی تبدیل کند. عدم عملیات نیز هیچ تأثیری بر عملکرد راه ندارد و فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه نیز فقط راه را از حالت خوب به حالت عالی تبدیل می‌کنند [Smilowitz and Madanat, 2000]. برای تعیین اثر بهبودی روکش آسفالتی (٤ سانتی متری) بر روسازی موجود، از نتایج مطالعات [Gao, Zhang, 2013] استفاده شده است. با توجه به توضیحات مذکور، ماتریس احتمالی بهبودی برای هر یک از گزینه‌های بهسازی در جدول (٤) ارائه شده است.

٤-۱-٤ ماتریس احتمالی خرابی

هسته اصلی در فرآیند تصمیم گیری مارکوف، ماتریس مربعی موسوم به ماتریس احتمالی خرابی است [Ziadi, 2009]. با استفاده از ماتریس احتمالی خرابی، احتمال نزول یک قطعه راه از یک حالت کیفی به حالت کیفی دیگر تعیین می‌شود .[Gao, Zhang, 2013] در تحقیق [Ortiz, Costello, Snaith,

جدول ۳. مقادیر RQI و مقدار IRI مربوط به هریک از هر حالت‌های کیفی روسازی

حالت‌های عملکردی	محدوده RQI	محدوده IRI	نماینده مقادیر RQI	نماینده مقادیر IRI
s_1(عالی)	$۴ \le RQI \le ۵$	۰/۳۲۳ ≤ IRI ≤ ۱/۱۶۹	٤/۵	۰/٦۸۳
s_2(خوب)	$۳ \le RQI \le ۴$	۱/۱۷ ≤ IRI ≤ ۲/۵۲۹	۳/۵	۱/۷۸٤
s_3(متوسط)	$۲ \le RQI \le ۳$	۲/۵۳ ≤ IRI ≤ ٤/٤۰۹	۲/۵	۳/٤۰۵
s_4(ضعیف)	$۱ \le RQI \le ۲$	٤/٤۱ ≤ IRI ≤ ٤/۸۰۸	۱/۵	۵/۵٤٤
s_5(خراب)	$۰ \le RQI \le ۱$	٤/۸۰۹ ≤ IRI ≤ ۹/۷۲٦	۰/۵	۸/۲۰۲

جدول ٤. ماتریس احتمالی بهبودی گزینه‌های مرمت و نگهداری مختلف

	عدم عملیات					نگهداری پیشگیرانه					روکش آسفالتی					بازسازی نوسازی				
	S1	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**
S1	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰		۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
S2	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
S3	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۳۷	۰/٦۳	۰	۰	۰
S4	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰/۲۳	۰/۷۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰
S5	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰/۱۱	۰/۸۹	۰	۰	۰	۰	۰

2006] سه روش جدید برای استخراج درایه‌های ماتریس خرابی، پیشنهاد و به‌وسیله شش پایگاه داده‌ای ارزیابی شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش زیر هرچند منحنی زوال به‌دست آمده، برازش مناسبی با داده‌های واقعی ندارد اما بررسی هیستوگرام‌های مربوط به توزیع وضعیت روسازی نشان می‌دهد که این روش، بهترین مدل برای استخراج درایه‌های ماتریس است. در روش مذکور، هدف کمینه کردن اختلاف بین توزیع حالت‌های واقعی با حالت‌های پیش‌بینی شده توسط ماتریس احتمالی خرابی است.

$$Minimize\ \mathrm{Z} = \sum_{\mathrm{t}}\sum_{\mathrm{j}} (a_t(\mathrm{i}) - \acute{a}_t(\mathrm{i}))^2 \quad , \qquad (۱)$$

$$\forall\, i, j = 1,2, \ldots\ldots, n \quad , \quad 0 \le P_{ij} \le 1 \quad , \quad \sum_j P_{ij} = 1$$

$$a_t = \acute{a}_{t-1}.[DPM] \qquad (۲)$$

در معادلات بالا، $a_t(\mathrm{i})$ درایه i ام توزیع پیش‌بینی شده توسط ماتریس احتمالی خرابی در سال t، $\acute{a}_t(\mathrm{i})$ درایه i ام بردار حالت واقعی به‌دست آمده در سال t که با استفاده از معادله (۳) تعیین می‌شود و DPM ماتریس احتمالی خرابی می‌باشد [Ortiz, Cos-tello and Snaith, 2006].

$$R(t) = 1.04[R_0 + 263(SNC+1)^{-5} NE(t)]e^{0.0153t} \qquad (۳)$$

که در آن، NE(t) جمع تجمعی ESAL تا سال t (میلیون بر خط عبوری)، SNC عدد سازه‌ای اصلاح شده با در نظر گرفتن اثر CBR و R_0 ناهمواری اولیه روسازی می‌باشد [harvey, 2012].

متغیرهای تصمیم‌گیری در مسئله بهینه‌سازی بالا، درایه‌های ماتریس احتمالی خرابی (P_{ij}) هستند. در این تحقیق، با استفاده از روش بالا و به کمک معادلات ۱، ۲ ماتریس خرابی باندهای ۱ (دارای ۸۰ درصد ترافیک) و ۲ به‌دست آمده و نتایج در جدول (۵) آورده شده است .

٤-١-٥ ماتریس احتمالی انتقال

ماتریس احتمالی انتقال، احتمال انتقال یک قطعه راه از یک حالت کیفی به حالت کیفی دیگر را مشخص می‌کند. با فرض انتقال یک قطعه راه از یک حالت کیفی به حالت کیفی دیگر در سال t+1، فقط بستگی به فعالیت‌های بهسازی و حالت کنونی راه در سال t دارد و مستقل از همه حالت‌های کیفی و فعالیت‌های بهسازی گذشته است، ماتریس احتمالی انتقال یک قطعه راه را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\mathrm{P_{ij}}(k) = \Pr(\mathrm{s_{t+1}} = \mathrm{j} \,|\, s_t = i\,, k_t = \mathrm{k}) \quad , \qquad (٤)$$
$$\forall\, \mathrm{i,j} \in \mathrm{S}\ , k \in \mathrm{K}, t \in T$$

که در آن، $\mathrm{P_{ij}}(k)$ احتمال انتقال یک قطعه راه به حالت کیفی j در سال t+1، وقتی که روسازی در حالت کنونی i قرار دارد و فعالیت بهسازی k در سال t صورت می‌گیرد، S مجموعه حالت‌های کیفی، K مجموعه فعالیت‌های بهسازی و t زمان تصمیم‌گیری می‌باشد.

از ترکیب اثر بهبودی فعالیت‌های بهسازی و اثر خرابی راه، احتمال انتقال یک قطعه راه را، از یک حالت کیفی به حالت کیفی دیگر تعیین می‌گردد. رویکرد عددی این روش، به صورت معادله (۵) است:

$$P_{ij}(k) = \textstyle\sum_{z \in s} P_{iz}(k) P_{zj} \quad , \quad \forall\, \mathrm{i,j} \in \mathrm{S}\ , k \in \mathrm{K} \qquad (۵)$$

که در معادله (۵)، $\mathrm{P_{zj}}$ احتمال خرابی راه از حالت کیفی z به حالت کیفی j و $P_{iz}(k)$ احتمال بهبودی راه از حالت کیفی i به حالت کیفی z ، هنگامی که فعالیت بهسازی k انجام می‌شود [Zhang and Gao, 2012].

با توجه به توضیحات بالا، ماتریس احتمالی انتقال برای هر یک از گزینه‌های بهسازی به‌دست آمده و نتایج در جداول (٦) و (٧)

جدول ۵. ماتریس احتمالی خرابی برای هر خط عبوری(باند)

	خط عبوری ۱					خط عبوری ۲				
	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5
S1	۰/۷۱	۰/۲۹	۰	۰	۰	۰/۸۵	۰/۱۵	۰	۰	۰
S2	۰	۰/۸۷	۰/۱۳	۰	۰	۰	۰/۹۲	۰/۰۸	۰	۰
S3	۰	۰	۰/۸۷	۰/۱۳	۰	۰	۰	۰/۹	۰/۱	۰
S4	۰	۰	۰	۰/۸۸	۰/۱۲	۰	۰	۰	۰/۹	۰/۱
S5	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱

جدول ٦. ماتریس احتمالی انتقال خط عبوری ١

	عدم عملیات					نگهداری پیشگیرانه					روکش آسفالتی					بازسازی نوسازی				
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
S_1	٠	/٢٩	٠	٠	٠	/٧١	/٢٩	٠	٠	٠	/٧١	/٢٩		٠	٠	/٧١	/٢٩	٠	٠	٠
		٠				٠	٠				٠	٠				٠	٠			
S_2	٠	/٨٧	/١٣	٠	٠	/٧١	/٢٩	٠	٠	٠	/٧١	/٢٩		٠	٠	/٧١	/٢٩	٠	٠	٠
		٠	٠			٠	٠				٠	٠				٠	٠			
S_3	٠	/٨٧	/١٣	٠	٠	٠	٠	/٨٧	/١٣	٠	/٢٦	/٦٦	/٠٨	٠	٠	/٧١	/٢٩	٠	٠	٠
			٠					٠	٠		٠	٠	٠			٠	٠			
S_4	/١٢	/٨٨	٠	٠	٠	٠	٠	٠	/٨٨	/١٢	٠	/٢	/٧	/١	٠	/٧١	/٢٩	٠	٠	٠
	٠	٠							٠	٠				٠		٠	٠			
S_5	١	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠	١	٠	٠	/١	/٨	/١	/٧١	/٢٩	٠	٠	٠
														٠	٠	٠	٠			

جدول ٧. ماتریس احتمالی انتقال خط عبوری ٢

	عدم عملیات					نگهداری پیشگیرانه					روکش آسفالتی					بازسازی نوسازی				
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
S_1	٠	٠	٠	/٠١٥	/٠٨٥	٠	٠	٠	/٠١٥	/٠٨٥	٠	٠	٠	/٠١٥	/٠٨٥	٠	/٠١٥	/٠٨٥		
S_2	٠	٠	/٠٠٨	/٠٩٢	٠	٠	٠	/٠١٥	/٠٨٥	٠	٠	٠	٠	/٠١٥	/٠٨٥	٠	/٠١٥	/٠٨٥		
S_3	٠	/٠١	/٠٩	٠	٠	٠	/٠٩	/٠١	٠	٠	٠	٠	٠	/٠٦٣	/٠٣٢	٠	/٠١٥	/٠٨٥		
S_4	/٠١	/٠٩	٠	٠	٠	/٠٩	٠	٠	/٠٧١	/٠٨	٠	٠	٠	/٠٢١	٠	٠	/٠١٥	/٠٨٥		
S_5	١	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠	/٠١	/٠٨١	/٠٠٩	٠	٠	٠	٠	٠	/٠١٥	/٠٨٥		

نشان داده شده است.

٤-٢ محاسبه هزینه کاربران

HDM-4[٧] هزینه عملکردی وسایل نقلیه را بر اساس مشخصات جاده (ناهمواری راه، عرض جاده، سربالایی، سرپایینی و ...) و مشخصات وسایل نقلیه (مانند سرعت جریان آزاد، وزن وسایل نقلیه، قیمت سوخت و روغن، هزینه تعیر و نگهداری وسیله نقلیه، و....) تعیین می‌کند. از آنجایی که برای عوامل تشکیل دهنده هزینه‌های سفر، از جمله سفرهای کاری مسافران، درصد استفاده شخصی از وسیله نقلیه و ارزش ریالی ساعات کاری و غیر کاری مسافران، بار و هزینه تصادفات، هیچگونه آماری در کشور ایران وجود ندارد این مقادیر برابر صفر در نظر گرفته شده و در تحلیل فقط از عوامل هزینه‌های عملیاتی وسیله نقلیه استفاده گردیده است. هزینه عملکردی انواع وسایل نقلیه با استفاده از **HDM-4** محاسبه شده است که نتایج به صورت تابعی از ناهمواری راه در

جدول ٨. توابع هزینه عملکردی انواع وسایل نقلیه بر حسب ناهمواری راه (سال ١٣٩٢)

وسیله نقلیه	معادله هزینه عملکردی وسیله نقلیه (ریال بر کیلومتر بر وسیله نقلیه)
سواری	$-٠/٢٥٧٧\ IRI^{٣}+١٣/٢٩٥٤\ IRI^{٢}+١/٩٢٠٢IRI+٣١٧٢/٩$
مینی بوس	$-١/٢٥\ IRI^{٣}+٤٦/٢٠٤\ IRI^{٢}-٣٦/٩٩٦IRI+٥٧٤١/٢$
اتوبوس	$-٣/٢٦٩١\ IRI^{٣}+٩١/٣١٥٥\ IRI^{٢}+٨٣٩/٣٢٨٤IRI+١٠٠٨٧$
کامیون دو محوره	$-٢/٤٥٣\ IRI^{٣}+٨٦/٦\ IRI^{٢}+٢٩٨/٩IRI+١٣١٢٧$
کامیون سه محوره	$-٤/٢٩٦٣\ IRI^{٣}+١٣٨/٢٩١٤\ IRI^{٢}+٤٠٠/٠٤+١٧٢٦٠$
کامیون چهار محوره و تریلی	$-٣/٧٥٢٧\ IRI^{٣}+١١٢/٤٠٢٣\ IRI^{٢}+١١١٧/٣IRI+٢٣٣٦٢$

جدول (۸) آورده شده است.

با استفاده از جداول (۳) و (۸) هزینه عملکردی وسایل نقلیه در حالت‌های کیفی مختلف روسازی به‌دست آمده و در جدول (۹) نشان داده شده است.

٤-۳ مدل سازی مسئله بهسازی راه

در سال ۲۰۰۹ [Wu and Flintsch, 2009] یک مدل مرمت و نگهداری راه ارائه کردند. در این مدل، نه تنها هزینه کاربران در نظر گرفته نشد بلکه قادر نبود طرح‌های مرمت و بهسازی هر باند را بر مبنای مقدار ترافیک و نرخ خرابی آن باند تعیین کند. با توجه به مدل ارائه شده توسط [Wu and Flintsch, 2009] و پارامتر خط عبوری تعریف شده در مدل [Gao and Zhang, 2013]، مدل پیشنهادی جدیدی ارائه می‌شود که می تواند گزینه های تعمیر و بهسازی هر باند را متناسب با مقدار ترافیک و خرابی آن و هزینه کاربران تعیین کند. در این پژوهش، دو تابع هدف برای مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است و مقادیر آن‌ها به‌طور هم‌زمان کمینه می‌شوند: ۱)کمینه کردن کل هزینه‌های کاربران راه ۲)کمینه کردن کل هزینه‌های بهسازی. در این مدل، سطح سرویس راه به صورت وضعیت میانگین وزنی محاسبه می‌شود. برای محاسبه سطح سرویس روسازی، وزن‌های بیشتر به حالت‌های کیفی بهتر نسبت داده می‌شوند. به عبارت دیگر، به حالت‌های کیفی ۱، ۲، ۳، ٤ و۵، به ترتیب وزن‌های ۵، ٤، ۳، ۲ و ۱ اختصاص داده می‌شود.

٤-۳-۱ فرضیات مدل

پارامتر نرخ کاهش ارزش پول ملی(نرخ تنزیل) و نرخ افزایش هزینه ها(نرخ تورم): با توجه به شرایط اقتصادی کشور، تعیین پارامتر نرخ تنزیل و نرخ تورم برای دوره زمانی ۱۰ سال آینده، بسیار سخت است. در واقع پیش‌بینی نرخ تنزیل و نرخ تورم در سال های آتی از حوصله بحث این مقاله خارج است. به همین دلیل با توجه به شرایط کنونی کشور، مقدار ثابت ۲۵ درصد برای هر دو پارامتر مذکور در کل دوره برنامه ریزی فرض شده است.

پارامتر نرخ افزایش بودجه و ضریب تخصیص آن: تعیین پارامتر نرخ افزایش بودجه نیز مانند پارامتر نرخ تنزیل و نرخ تورم، تعیین آن در سال‌های آینده بسیار سخت است. بری ساده‌سازی بحث، نرخ افزایش بودجه با نرخ تنزیل برابر فرض شده است. اما با توجه به شرایط اقتصادی کشور، این فرض تقریبا آرمانی است. به همین دلیل ضریب تخصیص ۰/۳۳ برای بودجه فرض شده است. با توجه به آمار سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، مقدار ضریب تخصیص در سال‌های اخیر عددی بین ۰/٤٦ تا ۰/۸۱ بوده است اما نویسندگان تحقیق عدد ۳۳/۰ را فرض کرده‌اند تا پارامتر ضریب تخصیص در جهت اطمینان انتخاب شده باشد و توانایی مدل پژوهش، در برنامه‌ریزی بهینه فعالیت های بهسازی در شرایط کمبود بودجه نیز نشان داده شود.

پارامتر توزیع ترافیک باندها و وزن آنها: پارامتر توزیع ترافیک بر اساس آیین نامه آشتو (۱۹۹۳) انتخاب شده است (۰/۸ برای باند سمت راست و ۰/۲ برای باند سمت چپ). همچنین در این تحقیق، اهمیت هر دو باند برای مدیریت راه یکسان فرض شده است. بنابراین وزن هر یک از باندها برابر با مقدار مساوی ۰/۵ فرض شده است.

پارامتر بودجه: هزینه نگهداری راه‌ها بین ۳ تا ۱۰ درصد ارزش راه است [Abtahi, 2010]. با محاسبه ارزش راه با استفاده از

جدول ۹. هزینه عملکردی وسایل نقلیه در حالت‌های کیفی مختلف روسازی در سال ۱۳۹۲(ریال بر کیلومتر بر وسیله نقلیه)

حالتهای عملکردی مختلف	سواری	مینی بوس	اتوبوس	کامیون دو محوره	کامیون سه محوره	کامیون چهار محوره و تریلی
S1	۳۱۸۰	۵۷۳۷	۱۰۷۰۲	۱۳۳۷۱	۱۷۵۹۷	۲٤۱۷٦
S2	۳۲۱۸	۵۸۱۵	۱۱۸۵٦	۱۳۹۲۲	۱۸۳۹۰	۲۵٦۹۱
S3	۳۳۲۵	٦۱۰۲	۱۳۸۷۵	۱۵۰۵۲	۲۰۰۵٦	۲۸۳۲۱
S4	۳۵۵۱	٦۷٤۳	۱٦۹۹۰	۱۷۰۲۸	۲۲۹۹۷	۳۲۳۷۱
S5	۳۹٤۸	۷۸٦۵	۲۱۳۱۰	۲۰۰۵۱	۲۷٤۷٤	۳۸۰۱٦

فهرست‌بهای واحد پایه رشته راه سال ۱۳۹۲- رسته راه و ترابری و انتخاب عدد ۵ درصد برای نگهداری راه، بودجه تعیین شده است (ارزش راه با استفاده از فهرست‌بها ۲۳/۴۵ میلیارد تومان[۸] برآورد شده است.بنابراین مقدار بودجه سالانه برابر است با: میلیارد تومان۱/۲=۰/۰۵×۲۳/۴۵).

پارامتر هزینه فعالیت‌های بهسازی: بر اساس فهرست بهای واحد پایه رشته راهداری سال۱۳۹۲- رسته راه‌وترابری تعیین شده است.

پارامترهای حد مجاز استفاده از کل فعالیت های بهسازی(P): با توجه به محدودیت منابع نیروی انسانی و مصالح، حداکثر توانایی مدیریت راه در بهسازی سالانه محور نظر، ۲۵ درصد کل راه فرض شده است.

پارامترهای حد مجاز استفاده از فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه (Q): با توجه به محدودیت منابع نیروی انسانی و مصالح، حداکثر توانایی مدیریت راه در استفاده سالانه از فعالیت‌های پیشگیرانه، ۱۵ درصد کل راه فرض شده است.

پارامتر حد مجاز وضعیت خراب روسازی :(R_5) حداکثر میزان وضعیت خراب راه در هر سال، ۱۰ درصد کل راه فرض شده است.

٤-۳-۲ توابع هدف و محدودیت‌ها

توابع هدف: Z_1 و Z_2 به ترتیب بیانگر توابع هدف کل هزینه کاربران راه و کل هزینه‌های بهسازی در طول دوره برنامه‌ریزی هستند.

$$Min: \quad (٦)$$
$$VOC: Z_1 = \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M}\sum_{v=1}^{V}\frac{1}{(1+d)^t}.voc_{vjt}.R_{mjt}.L_m .AADT_{1392}.\frac{X_v}{100}.(1+r_v)^t.\alpha_m.365$$

$$Min: \quad (٧)$$
$$Z_2 = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{(1+d)^t}N_m.R_{mi(t-1)}.x_{mitk}.C_{mkt}.L_m$$

که در آن:

$$R_{mjt} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K} R_{mi(t-1)}.x_{mitk}.T_{ijkm} \quad (٨)$$

$$\forall m \in M, j \in J, t \in T$$
$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M} N_m.R_{mi(t-1)}.x_{mitk}.C_{mkt}.L_m \le \alpha\frac{1}{(1+\acute{d})^t}B_t \quad \forall t \in T \quad (٩)$$

$$\sum_{j=1}^{J} R_{mjt} = 1 \qquad \forall m \in M, t \in T \quad (١٠)$$

$$\sum_{k=1}^{K} x_{mitk} = 1 \qquad \forall m \in M, t \in T, i \in I \quad (١١)$$

$$\sum_{j=1}^{j}\sum_{m=1}^{M}\frac{R_{mjt}.w_m.N_m.(6-j)}{\sum_{m=1}^{M}\frac{N_m}{M}} \ge L \quad \forall t \in T \quad (١٢)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\frac{R_{m5t}.w_m.N_m}{\sum_{m=1}^{M}\frac{N_m}{M}} \le R_5 \quad \forall t \in T \quad (١٣)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{i=1}^{I}\frac{N_m.w_m.R_{mi(t-1)}.x_{mit2}}{\sum_{m=1}^{M}\frac{N_m}{M}} \le Q \quad \forall t \in T \quad (١٤)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\frac{\sum_{i=1}^{I}N_m.w_m.R_{mi(t-1)}.\sum_{k=2}^{K}x_{mitK}}{\sum_{m=1}^{M}\frac{N_m}{M}} \le P \quad \forall t \in T \quad (١٥)$$

$$0 \le x_{mitK} \le 1 \quad \forall m \in M, j \in J, t \in T, k \in K \quad (١٦)$$

که در این مدل، m نماینده خط عبوری، v بیانگر نوع وسیله نقلیه، i و j نشان‌های حالت‌های کیفی روسازی،t نمایه سال در افق برنامه‌ریزی وk بیانگر نوع فعالیت بهسازی می‌باشد. (V = ٦، I = J = ٥، M = ٢، K = ٤ و T = ١٠). L_m طول خط عبوری m، N_m تعداد خطوط عبوری دارای مشخصات یکسان(در یک جهت) با خط عبوری m. در محاسبه N_m، خط عبوری m نیز در نظر گرفته می‌شود (N_1=N_2=١)، X_v درصد وسیله نقلیه v، r_v رشد سالانه وسیله نقلیه v و $AADT_{1392}$ میانگین ترافیک روزانه سالانه (در یک جهت) در سال۱۳۹۲(۹۹۱۹) است. مقادیر X_v وr_v در جدول(۱۰) نشان داده شده‌اند. d نرخ تنزیل، $\acute{d}$ نرخ افزایش بودجه، $\bar{d}$ نرخ تورم($B_t = B_0(1+\acute{d})^t$ و $\bar{d} = d = d' =$ ۰/۲۵) و voc_{vjt} هزینه عملکردی وسیله نقلیه v به ازای یک کیلومتر مسافت در سال t و در حالت کیفی j می‌باشد ($voc_{vjt} = voc_{vj(1392)}(1+\bar{d})^t$)

هزینه عملکردی وسایل نقلیه مختلف در سال ۱۳۹۲ با استفاده از جدول (۹) به‌دست می‌آیند. α_m ضریب توزیع ترافیک خط عبوری m، w_m وزن خط عبوری m، R_{mit} درصد روسازی خط عبوری m در حالت کیفی i و در پایان سال t است. به عبارت دیگر R_{mi0} درصد اولیه روسازی خط عبوری m در وضعیت i در شروع افق برنامه‌ریزی(سال ۱۳۹۲) است. درصد اولیه حالت‌های کیفی مختلف روسازی در سال ۱۳۹۲، در جدول (۱۱) آورده شده است. x_{mitk} کسری از روسازی خط عبوری m در حالت کیفی i که در سال t به‌وسیله فعالیت k بهسازی می‌شود. T_{ijkm} احتمال انتقال روسازی خط عبوری m از حالت کیفی i به حالت کیفی j، هنگامی که فعالیت k صورت می‌گیرد و C_{mkt} هزینه بهسازی یک کیلومتر از خط عبوری m به‌وسیله گزینه بهسازی k در سال t است ($C_{mkt} = C_{MK(1392)}(1 + \bar{d})^t$) . هزینه هر یک از گزینه‌های مرمت و نگهداری در سال ۱۳۹۲، در جدول(۱۱) آورده شده است.

α ضریب تخصیص بودجه، Q حداکثر درصد کل راه که می‌تواند سالانه به‌وسیله فعالیت‌های پیشگیرانه، نگهداری شود(۱۵ درصد)، P حداکثر درصد کل راه که می تواند هر سال بهسازی شود(۲۵ درصد)، L سطح سرویس کنونی راه(۳/۲۷۵) و R_s حد مجاز وضعیت خراب روسازی (۱۰درصد) در هر سال می‌باشد. معادله (۸) بیانگر درصد روسازی خط عبوری m در وضعیت j و در پایان سال t است. معادله (۹) محدودیت بودجه سالانه را نشان می‌دهد. معادله (۱۰)بیان می‌کند، مجموع درصدهای روسازی خط عبوری m در همه حالت‌های کیفی در پایان سال t باید ۱۰۰ شوند. معادله (۱۱) نشان می‌دهد، مجموع درصدهای روسازی خط عبوری mدر وضعیت i که به‌وسیله فعالیت‌های بهسازی در سال t تعمیر شده‌اند، باید ۱۰۰ شوند. معادله (۱۲) نشان می‌دهد، سطح سرویس سالانه روسازی نباید کمتر از سطح سرویس کنونی راه (۲۵۷/۳) شود. معادله (۱۳) نشان می‌دهد، درصد کل روسازی در وضعیت خراب نباید از ۱۰ درصد کل راه تجاوز کند(به دلیل اینکه، حالت کیفی خراب بیشترین نقش در افزایش هزینه کاربران راه را دارد). معادله (۱٤) کنترل می‌کند، نباید بیش از ۱۵ درصد کل روسازی در هر سال به‌وسیله فعالیت‌های پیشگیرانه نگهداری شود. معادله (۱۵) کنترل می‌کند، نباید بیش از یک چهارم کل روسازی در هر سال، بهسازی شود و معادله (۱٦) نشان می‌دهد، متغیرهای تصمیم‌گیری، عدد غیر منفی و کوچکتر مساوی ۱ هستند.

۵. حل مدل

معمولا حل مدل‌های بهینه‌یابی دو هدفه بسیار پیچیده می‌باشد. با تبدیل این مدل‌ها به مدل‌های تک هدفه تا حدودی می‌توان بر این پیچیدگی غلبه کرد. مجموعه جواب‌های بهینه پارتو از جمله روش‌های پرکاربردی است که به کمک آن می‌توان مدل‌های دو هدفه را به مدل‌های تک هدفه تبدیل کرد. رویکرد عددی این روش در بخش‌های ۵-۱ و ۵-۲ ارائه گردیده است.

۵-۱ تولید مجموعه جواب‌های بهینه پارتو[9]

روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توانند مجموعه جواب‌های بهینه

جدول ۱۰. X_v درصد وسیله نقلیه v و r_v رشد سالانه وسیله نقلیه v

	سواری	مینی بوس	اتوبوس	کامیون دو محوره	کامیون سه محوره	کامیون چهار محوره و تریلی
	$v = ۱$	$v = ۲$	$v = ۳$	$v = ٤$	$v = ٥$	$v = ٦$
X_v	۱۸	٤	۲	٤۹	۹	۱۸
r_v	۰/۰٤	۰/۰٤	۰/۰٦۸	۰/۰٦۸	۰/۰٦۸	۰/۰٦۸

جدول ۱۱. درصد اولیه حالت‌های کیفی مختلف برای هر خط عبوری و هزینه‌های نگهداری مربوط به گزینه‌های مختلف مرمت و نگهداری در سال ۱۳۹۲ (میلیون ریال بر خط عبوری برکیلومتر)

خطوط عبوری	هزینه فعالیت‌های مرمت و نگهداری				درصد حالت‌های کیفی مختلف				
	k_1	k_2	k_3	k_4	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
۱	۰	۱۰۸	۹۱۷	٦۷۰۷	۰	٤٥/۷۱	۳۱/٤۳	۸/٥۷	۱٤/۲۹
۲	۰	۱۰۸	۹۱۷	٦۷۰۷	۲۰	٤۰	۱۷/۱٤	۸/٥۷	۱٤/۲۹

پارتو را تولید کنند. روش سمپلکس چند هدفه و روش مجموع وزنی از جمله روش‌هایی هستند که بیشترین کاربرد را دارند.

در روش مجموع وزنی، با استفاده از ضرایب وزنی که به هر تابع اختصاص داده می‌شود چند تابع هدف، تبدیل به یک تابع هدف می‌شوند. بدیهی است انتخاب وزن هر تابع هدف، از موضوعات اصلی در استفاده از این روش است .[Wu and Flintsch, 2009] الگوریتم سیمپلکس، توسط جورج دانتزینگ در سال ۱۹۴۷ میلادی شکل گرفت. روش سیمپلکس، یک جواب قابل قبول در یکی از رئوس چندضلعی فراهم می‌کند و سپس در راستای اضلاع چندضلعی به طرف رئوسی با مقدار بالاتری از تابع هدف حرکت می‌کند تا این که به نقطه بهینه برسد. این الگوریتم در حل مدل‌های برنامه ریزی خطی بسیار کارآمد است[10] [Hillier and Lieberman, 2001].

انتخاب یک روش بهینه‌یابی خاص، بستگی به اطلاعات در دسترس، دقت جواب بهینه و نرم افزارهای در دسترس دارد. در این پژوهش، به دلیل ساده بودن روش مجموع وزنی در تولید مجموعه جواب‌های بهینه‌یابی پارتو، از این روش استفاده شده است. رویکرد عددی روش مذکور به صورت زیر است:

$$\min F(x_1, x_2, x_3, \dots., x_n; w_1, w_2, w_3, \dots., w_p) = \sum_{k=1}^{p} w_p F_k(x_1, x_2, x_3, \dots., x_n) \quad (۱۷)$$

محدودیت‌ها :

$$g_i(x_1, x_2, x_3, \dots., x_n) \le 0 \qquad i = 1,2, \dots., m \quad (۱۸)$$

$$h_j(x_1, x_2, x_3, \dots., x_n) = 0 \qquad j = 1,2, \dots., s \quad (۱۹)$$

که در آن x_1، x_2 و..... x_n متغیرهای تصمیم‌گیری، (w_1، w_2، ... ،w_p) $F(x_1, x_2, \dots, x_n; w_1$ تابع چند هدفه، w_k وزن kامین تابع هدف، $F_1() = P$, $F_2()$,...., $F_p()$ توابع تک هدفه نرمال شده (مقدار بین ۰ و ۱ و یا در حالت کلی بین ۰ و S)، $g_1(), g_2(), \dots, g_m() = m$ محدودیت‌های نامعادله‌ای، $h_1(), h_2(), \dots, h_s() = s$ محدودیت‌های معادله‌ای و m، P، n و s عددهای صحیح می‌باشند. معادلات (۱۷) تا (۱۹) یک مسئله بهینه‌یابی تک هدفه است که در آن مقادیر w_kها ثابت می‌باشند. به ازای ضرایب وزنی مختلف، هر جواب بهینه معادلات (۱۷) تا (۱۹)، یک عضو از مجموعه جواب‌های بهینه پارتو محسوب می‌شود. در نتیجه، با حل مسئله بهینه یابی مذکور، به ازای ضرایب وزنی مختلف، مجموعه جواب های بهینه پارتو تشکیل می‌شوند [Wu and Flintsch, 2009]. در این پژوهش، حل مسئله بهینه‌یابی تک‌هدفه با استفاده از جعبه بهینه سازی متلب ۲۰۱۲ (الگوریتم کمینه سازی مدل‌های غیرخطی به روش برنامه‌ریزی ترتیبی[11]) صورت گرفته است. لازم به ذکر است به دلیل محدودیت در تعداد صفحات، از تشریح روش حل مسئله بهینه‌یابی تک هدفه خودداری شده است.

۵-۲ انتخاب جواب قابل قبول و رضایت بخش

یکی از مشکلات فرد تصمیم گیرنده، انتخاب بهترین جواب از بین مجموعه جواب‌های بهینه پارتو است. در این تحقیق، جواب رضایت بخش بر اساس کوتاهترین فاصله نرمال شده، انتخاب می‌شود. با حل بهینه معادله (۷) به ازای همه بردارهای وزنی (۱، ۰، ۰... و ۰)، (۰، ۱، ۰.. و ۰)، ... و (۰، ۰، ۰... و ۱)، دامنه مقادیر همه توابع هدف {($F_{1\text{-min}}$، $F_{1\text{-max}}$)، ($F_{2\text{-min}}$، $F_{2\text{-max}}$)، ... ،($F_{p\text{-min}}$، $F_{p\text{-max}}$)} به‌دست می‌آید. در روش مذکور، جوابی که کوتاه‌ترین فاصله نرمال شده با حل ایده آل را دارد، به عنوان جواب قابل قبول انتخاب می‌شود.

این فاصله با استفاده از مراحل زیر به‌دست می‌آید :

۱) با حل بهینه معادله (۱۷) به ازای بردارهای وزنی مختلف و با فرض انتخاب N بردار وزنی، N جواب بهینه پارتو به‌دست می‌آید. N نقطه پارتو به‌دست آمده (P بعد برای هر نقطه)، به‌وسیله معادله (۱۰) در مقیاس S (۰-۱۰۰ یا ۰-۱) نرمال می‌شوند:

$$Z_j = \left(\frac{F_1(X_j)-F_{1-min}}{F_{1-max}-F_{1-min}} \times S \; \frac{F_2(X_j)-F_{2-min}}{F_{2-max}-F_{2-min}} \times S, \dots, \frac{F_p(X_j)-F_{p-min}}{F_{p-max}-F_{p-min}} \times S\right) \quad (۲۰)$$

که در آن، x_j بردار متغیر تصمیم‌گیری (N، ...، 2، 1)، Z_j نقطه بهینه پارتو نرمال شده، $F_k(x_j)$، kامین تابع تک هدفه و p، ...، 2، $k = 1$ است.

۲) نقطه ایده آل در P بعد برابر است با $Z^* = (Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_p^*)$. بسته به اینکه هدف کمینه کردن یا ماکزیمم کردن مسئله بهینه‌یابی

باشد، مقادیر Z_p^*,...,Z_2^*, Z_1^* بین ۰ تا S تغییر می‌کنند. بنابراین فاصله(D_j) بین هر جواب بهینه پارتو (Z_j) و جواب ایده آل (Z^*) با استفاده از معادله(۲۱) به‌دست می‌آید.

$$D_j = [(\frac{F_1(X_j)-F_{1-min}}{F_{1-max}-F_{1-min}} \times S - Z_1^*)^2 + \cdots + (\frac{F_p(X_j)-F_{p-min}}{F_{p-max}-F_{p-min}} \times S - Z_p^*)^2]^{1/2} \quad (۲۱)$$

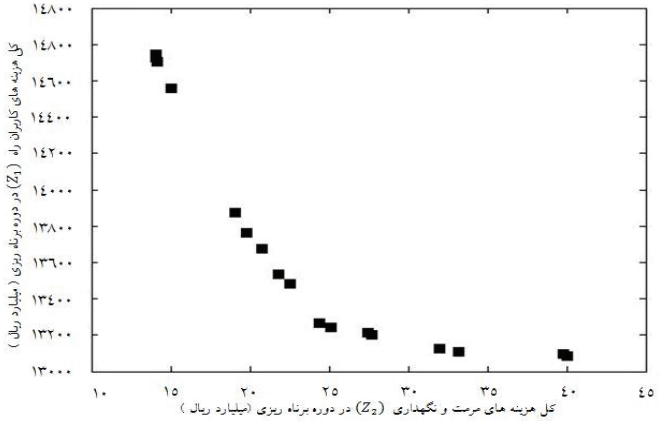
۳) نقطه بهینه پارتویی که کوتاه‌ترین فاصله D_i را دارد، به عنوان جواب قابل قبول مدل انتخاب می‌شود [Wu and Flintsch, 2009].

٦. نتایج مدل

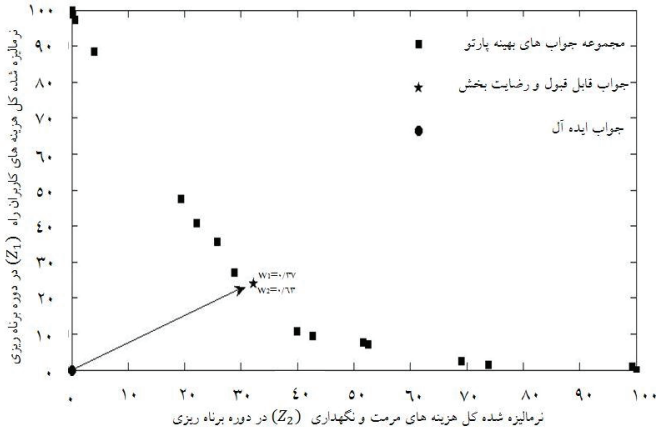
در این بخش، پس از حل مدل نتایج ارائه گردیده است. در شکل (۳) مجموعه جواب‌های بهینه پارتو، نشان داده شده است.

همچنین با استفاده از روش "کوتاه‌ترین فاصله اقلیدسی" از بین مجموعه جواب‌های بهینه پارتو، بهترین جواب انتخاب شده است که در شکل (٤) نشان داده شده است. وزن اختصاص یافته به هر تابع هدف، نشان دهنده اهمیت آن تابع هدف است، اما باید توجه داشت، وزن‌های اختصاص یافته به توابع هدف، اهمیت نسبی آن‌ها را نشان می‌دهد. در این تحقیق، برای توابع هدف Z_1 و Z_2 به ترتیب مقادیر وزنی ۰/۳۷ و ۰/٦۳ به‌دست آمد که نشان می‌دهد تابع Z_2 اهمیت بیشتری نسبت به تابع Z_1 دارد، اما لزوما به این معنی نیست که تابع هدف Z_2، به نسبت ٦۳ به ۳۷، از اهمیت بیشتری برخوردار است. به عبارت دیگر تابع Z_2 تاثیر بیشتری در جواب بهینه مدل دارد.

متغیرهای تصمیم‌گیری جواب بهینه مدل در جداول (۱۲) و (۱۳) آورده شده‌اند. برای مثال، برای باند ۱ و در سال ۱۳۹٦، تمام روسازی در وضعیت خوب، باید به‌وسیله فعالیت‌های پیشگیرانه مانند درزگیری، لکه گیری مرمت و نگهداری شود. همچنین در



شکل ۳. مجموعه جواب های بهینه پارتو



شکل ٤. مجموعه جواب های بهینه پارتو نرمال شده

همین سال، به ترتیب ۳۹، ۹٤/۱ و ۹۵ درصد روسازی خط عبوری ۱ در حالات کیفی متوسط، ضعیف و خراب باید به‌وسیله روکش آسفالتی بهسازی شوند. برای این طرح مرمت و نگهداری، هزینه بهسازی مدیریت راه، ۲۱/۵ میلیارد ریال به‌دست آمده است که به موجب آن، هزینه های کاربران، ۱۳۵۳٤ میلیارد ریال می‌شود. طرح بهینه بهسازی، فقط از یک سوم بودجه کل (٤ میلیارد ریال در هر سال) استفاده می‌کند که نشان می‌دهد با اعمال گزینه‌های بهسازی در زمان‌های مناسب و با یک برنامه‌ریزی بهینه، می‌توان هزینه‌های بهسازی را تا یک سوم کاهش داد. از آنجایی که ۸۰ درصد ترافیک عبوری از باند ۱ استفاده می‌کنند، طرح بهینه از ۲۱/۵ میلیارد هزینه مدیریت راه، ۱۸/۹ میلیارد ریال به خط عبوری ۱ و فقط ۲/٦ میلیارد ریال به خط عبوری ۲ تخصیص داده است. بنابراین خط عبوری ۱، تاثیر بسیار زیادتری نسبت به خط عبوری ۲ در کاهش هزینه کاربران راه دارد و بهسازی تمام باندهای یک راه به شیوه‌های یکسان اقتصادی نخواهد بود. همچنین بر اساس طرح بهینه، فقط حالت‌های کیفی خوب و خراب روسازی باند ۲ باید تعمیر شوند و برای حالات کیفی متوسط و ضعیف نباید فعالیتی صورت گیرد. بدین صورت که با اجرای فعالیت‌های پیشگیرانه، ۸۵ درصد روسازی باند ۲ در وضعیت خوب به وضعیت عالی تبدیل می‌شود و با اجرای روکش آسفالتی، وضعیت خراب باند ۲ از بین می رود. (به ترتیب، ۹، ۸۱ و ۱۰ درصد وضعیت خراب به حالت‌های کیفی ضعیف، متوسط و خوب انتقال پیدا می‌کند). به عبارت دیگر، حالت‌های کیفی عالی و خراب روسازی به ترتیب، بیشترین نقش در کاهش و افزایش هزینه کاربران را دارند. بنابراین برای کمینه کردن هم‌زمان هزینه‌های بهسازی مدیریت راه و هزینه کاربران راه، فقط حالت‌های کیفی خوب و خراب روسازی باند ۲ باید تعمیر شوند.

متغیرهای تصمیم‌گیری در جداول (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهند از فعالیت‌های پیشگیرانه فقط هنگامی که روسازی در وضعیت خوب قرار دارد، باید استفاده شود و بکارگیری آن‌ها در دیگر حالت‌های کیفی، در بهبود سطح سرویس راه تاثیری ندارند و بهسازی راه در این حالات کیفی می‌تواند به‌وسیله روکش و ... صورت گیرد. متاسفانه در برخی فعالیت‌های بهسازی در کشور، از فعالیت‌های پیشگیرانه مانند درزگیری و لکه گیری برای بهبود وضعیت راه در

جدول۱۲. متغیرهای تصمیم‌گیری خط عبوری ۱ در دوره برنامه‌ریزی

حالت	فعالیت	۱۳۹۳	۱۳۹٤	۱۳۹۵	۱۳۹٦	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱٤۰۰	۱٤۰۱	۱٤۰۲
i=1	k=1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	k=2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
i=2	k=1	۰/۷۲	۰/۳٤۱	۰	۰	۰/۰۷۲	۰/۳۸۵	۰/٤۰۹	۰/٤۸۹	۰/۷۹٦	۱
	k=2	۰/۲۸	۰/٦۵۹	۱	۱	۰/۹۲۸	۰/٦۱۵	۰/۵۹۱	۰/۵۱۱	۰/۲۰٤	۰
	k=3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
i=3	k=1	۰/۸۵	۰/۷۵۵	۰/٦٦٦	۰/٦۱	۰/۵۷۳	۰/۹۰٤	۱	۱	۱	۱
	k=2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=3	۰/۱۵	۰/۲٤۵	۰/۳۳٤	۰/۳۹	۰/٤۲۷	۰/۰۹٦	۰	۰	۰	۰
	k=4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
i=4	k=1	۰/۵۹۵	۰/۰٦۹	۰/۱۸	۰/۰۵۹	۰/۰۰۲	۰/٤۷۵	۰/۵۰۸	۰/۷۱٤	۱	۱
	k=2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=3	۰/٤۰۵	۰/۹۳۱	۰/۸۲	۰/۹٤۱	۰/۹۸۸	۰/۵۲۵	۰/٤۹۲	۰/۲۸٦	۰	۰
	k=4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
i=5	k=1	۰/۵۹۳	۰/۸۷٦	۰/۳۲۹	۰/۰۵	۰/۵۱	۰/۰۲	۰/٤۸۹	۰/۵۵	۰/۱۸٤	۰/۳۸۵
	k=2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=3	۰/٤۰۷	۰/۱۲٤	۰/٦۷۱	۰/۹۵	۰/٤۹	۰/۹۸	۰/۵۱۱	۰/٤۵	۰/۸۱٦	۰/٦۱۵
	k=4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

حالت‌های کیفی متوسط، ضعیف و حتی خراب استفاده می‌شود. البته باید توجه داشت، فعالیت‌های پیشگیرانه مانند درزگیری و لکه گیری خود یکی از خرابی‌های روسازی انعطاف پذیر به شمار می‌آیند و استفاده بیش حد از آن‌ها مناسب نیست. همچنین این جداول نشان می‌دهند، با اعمال گزینه‌های بهسازی در زمان‌های مناسب و با یک برنامه‌ریزی بهینه می‌توان بدون استفاده از عملیات بازسازی روسازی، راه را در سطح سرویس مناسب نگه داشت.

در شکل(۵) مقدار عملیات تعمیر و بهسازی سالانه مدیریت راه را می‌دهد. طرح بهینه بهسازی، در تمام دوره برنامه‌ریزی از فعالیت‌های پیشگیرانه استفاده کرده است به‌طوری که در پنج سال اول، هر سال(به جز سال دوم دوره برنامه‌ریزی) ۵/۲۵ باند–کیلومتر از روسازی موجود، باید به‌وسیله فعالیت‌های پیشگیرانه نگهداری شوند. این مقدار بکارگیری از فعالیت‌های پیشگیرانه برابر با حد مجاز استفاده از آن‌ها در هرسال است (۵/۲۵=۳۵×۰/۱۵)، اما برخلاف فعالیت‌های پیشگیرانه، از روکش آسفالتی در نسبت به روکش آسفالتی، در کاهش هزینه‌های کاربران (بر واحد هزینه) بیشتر موثر است، تمام دوره برنامه‌ریزی استفاده نشده است. چون فعالیت‌های پیشگیرانه بر اساس طرح بهینه بهسازی (شکل۵)، در مجموع پنج سال اول، ٤١/٢٤ باند – کیلومتر از روسازی موجود، باید به‌وسیله فعالیت‌های بهسازی تعمیر شوند و سبب هزینه ١٥/٦ میلیارد ریالی مدیریت راه می‌شوند. این مقدار بکارگیری از فعالیت‌های بهسازی، تقریبا برابر با حد مجاز استفاده از آن‌ها در پنج سال اول است (حد مجاز: ٤٣/٧٥=٣٥×٠/٢٥×٥). هزینه‌های سنگین مدیریت راه در پنج سال اول برنامه‌ریزی، سبب می‌شود هزینه‌های بهسازی در پنج سال دوم برنامه‌ریزی (فقط ۵/۹ میلیارد ریال) و در مجموع کل هزینه‌های بهسازی مدیریت راه کاهش یابد.

اگرچه کاهش هزینه‌های بهسازی در پنج سال دوم، سبب کاهش سطح سرویس راه در سال‌های آخر دوره برنامه‌ریزی شده است، اما سطح سرویس راه در تمام سال‌های دوره برنامه‌ریزی بیشتر از سطح سرویس اولیه نگه داشته می‌شود. بنابراین مقدار هزینه‌های بهسازی در سال‌های اولیه دوره برنامه‌ریزی، تاثیر بسیار زیادی در کل هزینه‌های بهسازی دارند و مدیریت راه باید در سال‌های اولیه دوره برنامه‌ریزی، بودجه مناسب و کافی برای طرح‌های بهسازی اختصاص دهد. در شکل(٦) نیز روند تغییرات هزینه‌های بهسازی و سطح سرویس در

جدول ۱۳. متغیرهای تصمیم‌گیری خط عبوری ۲ در دوره برنامه‌ریزی

حالت	فعالیت	۱۳۹۳	۱۳۹٤	۱۳۹۵	۱۳۹٦	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱٤۰۰	۱٤۰۱	۱٤۰۲
i=1	k=1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	k=2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
i=2	k=1	۰/٥٨٨	۱	۰/۹۹٥	۰/۸٥۸	۰/۹	۱	۰/۹۹۹	۰/۹۸٦	۰/۹۸۷	۰/۹۲۱
	k=2	۰/٤۱۲	۰	۰/۰۰٥	۰/۱٤۲	۰/۱	۰	۰/۰۰۱	۰/۰۱٤	۰/۰۱۳	۰/۰۷۹
	k=3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
i=3	k=1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	k=2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
i=4	k=1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	k=2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
i=5	k=1	۰/٥۳	۰/۹۱٤	۰/۹٥٤	۱	۱	۱	۰/۷۷۷	۰/۹۹	۰/۹٤۳	۰/۹٦۲
	k=2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	k=3	۰/٤۷	۰/۰۸٦	۰/۰٤٦	۰	۰	۰	۰/۲۲۳	۰/۰۱	۰/۰٥۷	۰/۰۳۸
	k=4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

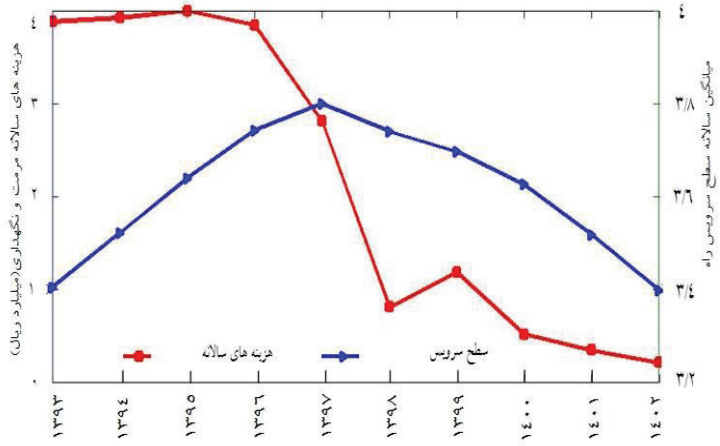
شکل۵. مقدار عملیات تعمیر و بهسازی سالانه مدیریت راه

سال‌های مختلف دوره برنامه‌ریزی نشان داده شده است.

۷. جمع‌بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی بهسازی راه توسعه داده شد که توانایی تعیین گزینه‌های بهسازی، بر مبنای نرخ خرابی و ترافیک عبوری هر باند و هزینه کاربران را دارد. دو تابع هدف در نظر گرفته شده برای مدل عبارتند از: ۱)کمینه کردن کل هزینه‌های کاربران راه ۲)کمینه کردن کل هزینه‌های بهسازی. پیش‌بینی عملکرد روسازی در آینده، بر مبنای فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف صورت گرفته و با استفاده از شاخص کیفیت سواری، عملکرد راه به پنج حالت کیفی عالی، خوب، متوسط، ضعیف و خراب تقسیم‌بندی شده است. در این تحقیق، برای توابع هدف Z_1 و Z_2 به ترتیب مقادیر وزنی ۰/۳۷ و ۰/۶۳ به‌دست آمد که نشان می‌دهد تابع Z_2 اهمیت بیشتری نسبت به تابع Z_1 دارد. به عبارت دیگر تابع Z_2 تاثیر بیشتری در جواب بهینه مدل دارد.

بر مبنای طرح بهینه بهسازی، هزینه مدیریت راه، ۲۱/۵ میلیارد ریال به‌دست آمده است که به موجب آن، هزینه های کاربران راه، ۱۳۵۳٤ میلیارد ریال می‌شود. در این طرح بهینه، فقط از یک سوم بودجه کل (٤ میلیارد ریال در هر سال) استفاده می‌کند که نشان می‌دهد با اعمال گزینه‌های بهسازی در زمان‌های مناسب و با یک برنامه‌ریزی بهینه، می‌توان هزینه‌های بهسازی را تا یک سوم کاهش داد. از آنجایی که ۸۰ درصد ترافیک عبوری از باند ۱ استفاده می‌کنند، طرح بهینه از ۲۱/۵ میلیارد هزینه مدیریت راه، ۱۸/۹ میلیارد ریال به خط عبوری ۱ و فقط ۲/٦ میلیارد ریال به خط عبوری ۲ تخصیص داده است. بنابراین خط عبوری ۱، تاثیر بسیار زیادتری نسبت به خط عبوری ۲ در کاهش هزینه کاربران راه دارد و بهسازی تمام باندهای یک راه به شیوه‌های یکسان



شکل٦. هزینه‌های مرمت و نگهداری و سطح سرویس روسازی در هر سال

اقتصادی نخواهد بود. نتایج مدل نشان می‌دهند، فعالیت‌های پیشگیرانه نسبت به روکش آسفالتی، تاثیر بیشتری در کاهش هزینه‌های کاربران (بر واحد هزینه) دارند. همچنین مقدار هزینه‌های بهسازی در سال‌های اولیه دوره برنامه‌ریزی، تاثیر بسیار زیادی در کل هزینه‌های بهسازی دارند. بنابراین مدیریت راه باید در سال‌های اولیه دوره برنامه‌ریزی، بودجه مناسب و کافی برای طرح‌های بهسازی تخصیص دهد.

۸.پی نوشتها

1. Section
2. Vehicle Operation Costs
3. Pavement Performance Prediction
4. User Costs
5-International Roughness Index (IRI)
6. Ride Quality Index (RQI)
7. Highway Development Management

۸. هزینه‌های ذکر شده در این مقاله، معادل ارزش پول در سال ۱۳۹۲ است

9. Generation of Pareto Optimal Solutions

۱۰. مطالب این بخش، ترجمه‌ای از محمد مدرس و اردوان آصف‌وزیری، می‌باشد.

11. Constrained Nonlinear Minimization Algorithms -Sequential Quadratic Programming.

۹. مراجع

-ابطحی، سید مهدی (۱۳۸۹) "آسفالت های سرد حفاظتی"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان معاونت آموزشی، ایران، اصفهان، تابستان ۱۳۸۹.

-زیادی، مجتبی (۱۳۹۰) "ارائه مدل‌های پیش بینی عملکرد روسازی با فرض دسترسی و عدم دسترسی به بانک داده ای مناسب"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ایران، تهران، مهر ۱۳۹۰، ص. ٦٥-۳۳.

-شورمیج، ابرهیم (۱۳۹۱) "ارزیابی شرایط روسازی بر هزینه‌های عملیاتی وسایل نقلیه با استفاده از HDM-4 در شبکه راه‌های استان خوزستان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، ایران، تهران، شهریور ۱۳۹۱، ص. ٦-۱.

-فخری، منصور (۱۳۸٦) "حدود شاخص بین المللی ناهمواری برای راه‌های ایران"، پژوهشکده حمل و نقل، ایران، تهران، تابستان ۱۳۸٦.

-Abbas, A., Kutay, M. E., Azari, H. and Rasmussen, R. (2007) "Three-dimensional surface texture characterization of Portland cement concrete pavements", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.22, No.3, pp.197–209.

-Allouche, E. N. and Gilchrist, A. (2004) "Quantifying construction related social costs", North American Society for Trenchless Technology (NASTT) No-Dig Conference, American, New Orleans, LA.

-Bianchini, A. and Bandini, P. (2010) "Prediction of pavement performance through neuro-fuzzy reasoning", Computer- Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.25, No.1, pp.39–54.

- Byrne, M., Albrecht, D., Sanjayan, J. G. and Kodikara, J. (2009) "Recognizing patterns in seasonal variation of pavement roughness using minimum message length inference", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.24, No.2, pp.120-129.

- Chan, W. and Hoque, K. (2000) "Multiobjective optimization for pavement maintenance programming", Journal of Transportation Engineering, Vol.126, No.5, pp.367–374.

- Chou, J. S., Le, T. S. (2011) "Reliability-based performance simulation for optimized pavement maintenance", Reliability Engineering and System Safety, Vol.96, pp.1402-1410.

- Deshpande, V. P., Damnjanovic, I. D. and Gardoni, P. (2010) "Reliability–based optimization models for scheduling pavement rehabilitation", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.25,

Infrastructure Engineering, Vol.26, No.7, pp.512–513.

- Madanat, S. and Wan Ibrahim, W. H. (1995) "Poisson regression models of infrastructure transition probabilities", Journal of Transportation Engineering, Vol.21, No.3, pp.267–272.

- Meneses, S. and Ferreira, A. (2013) "Pavement maintenance programming considering two objectives: maintenance costs and user costs", International Journal of Pavement Engineering, Vol.14, No.2, pp.206–221.

- Ng, W., Zhang, Z. and Travis Waller, S. (2011) "The price of uncertainty in pavement infrastructure management planning: An integer programming approach", Transportation Research Part C, Vol.19, pp.1326-1338.

-Ortiz, J. J., Costello, S. B. and Snaith, M. S. (2006) "Derivation of transition probability matrices for pavement deterioration modeling", Journal of Transportation Engineering, Vol.132, No.2, pp.141-161.

-Robinson, R. (1988) "A view of road maintenance economics, policy and management in developing countries", Research Report 145, Transport and Road Research Laboratory, England, Crowthorne.

- Sathaye, N. and Madanat, S. (2011) "A bottom-up solution for the multi-facility optimal pavement resurfacing problem", Transportation Research Part B, Vol.45, No.7, pp.1004–1017.

- Smilowitz, K. and Madanat, S. (2000) "Optimal inspection and maintenance policies for infrastructure networks", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.15, No.1, pp.5–13.

-Wang, F., Zhang, Z. and Machemehl, R. B. (2003) "Decisionmaking problem for managing pavement maintenance and rehabilitation projects", Transportation Research Record, Vol.1853, pp.21–8.

- Wang, K. C. P. and Li, Q. (2011) "Pavement smoothness prediction based on fuzzy and gray theories", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.26, No.1, pp.69–76.

No.4, pp.227–237.

- Ferreira, A., Santos, L. P. and Antunes, A. (2002) "A segment-linked optimization model for meterministic pavement management systems", The Internationa Journal of Pavement Engineering, Vol.3, No.2, pp.95-105.

- Gao, H. and Zhang, Z. (2013) "A Markov-based road maintenance optimization model considering user costs", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.28, No.1, pp.1-14.

- Gao, L., Xie, C. and Zhang, Z. (2012) "Network-level road pavement maintenance and rehabilitation scheduling for optimal performance improvement and budget utilization", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.27, pp.276-287.

- Goh, K. C. and Yang, J. (2010) "Responding to sustainability challenge and cost implications in highway construction Projects", in Proceedings of CIB 2010 World Congress, Lowry, Salford Quays.

- Golabi, K., Kulkarni, R. and Way, G. (1982) "A statewide pavement management system", Vol.12, No.6, pp.5-21.

- Harvey, M. (2012) "Optimising road maintenance", Bureau of Infrastructure, Transport and Regional Economics (BITRE) Department of Infrastructure and Transport, Australia, Canbera.

- Hass, R. and Hudson, W. R. (2000) "Introduction to the concepts of pavement management system", Krieger Publishing Company.

Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. (2001) "Introduction to operations research", McGraw Hill, Boston, MA, 7th edition.

-Janisch, D. (2006) "An overview of Mn/DOT's pavement condition rating procedures and indices", Office of Materials and Road Research, Minnesota Department of Transportation, American, Maplewood, MN.

-Lajnef (2011) "Toward an integrated smart sensing system and data interpretation techniques for pavement fatigue monitoring", Computer-Aided Civil and

- Wilde, W., Waalkes, S. and Harrison, R. (2001) "Life cycle cost analysis of portland cement concrete pavements", Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, American, Austin, TX.

- Wu, Z. and Flintsch, G. (2009) "Pavement preservation optimization considering multiple objectives and budget variability", Journal of Transportation Engineering, Vol.135, No.5, pp.305–315.

- Yang, C., Tsai, Y. and Wang, Z. (2009) "Algorithm for spatial clustering of pavement segments", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.24, No.2, pp.93–108.

- Ying, L. and Salari, E. (2010) "Beamlet transform based technique for pavement image processing and classification", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.25, No.8, pp.572–580.

- Zhang, X., Gao, H. (2012) "Road maintenance optimization through a discrete-time semi-Markov decision process", Reliability Engineering and System Safety, Vol.103, pp.110-119.