تأثیر هزینه‌های نگهداری و بهسازی روسازی بر هزینه کاربران راه (مطالعه موردی: محور بوئین زهرا- ساوه)

منصور فخری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیر طوسی، تهران
محمد آلاله*، کارشناس ارشد فارغ‌التحصیل دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیر طوسی، تهران

E-mail: mohammad.alaleh870508@gmail.com

دریافت: ۹٤/۰٦/۲٤ - پذیرش: ۹٤/۱۱/۲٦

چکیده

تحلیل هزینه‌های کاربران راه، به منظور انتخاب طرح و سیاست‌های نگهداری مناسب با کمترین هزینه، اهمیت بسیاری دارد. از این تحلیل به عنوان یک ابزار ضروری برای تصمیم‌گیری در خصوص سرمایه‌گذاری برای راه‌های جدید و راه‌های موجود در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو، درک تأثیر هزینه‌های بهسازی راه بر هزینه کاربران راه از اهمیت ویژه‌ای برخودار است و مزایای مربوط به تعمیرات منظم و دوره‌ای در گرو این رابطه قرار دارد. لذا، در تحقیق حاضر سعی شده است تا تأثیر هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی بر هزینه‌های کاربران راه برای شبکه‌ای از راه‌های کشور ایران بررسی شود. بر این مبنا، و به کمک نرم-افزار مهندسی Matlab، آنالیز حساسیت نسبت به عوامل تأثیرگذار تابع هزینه کاربران راه برای شبکه راه منتخب انجام شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که به ازای افزایش یک میلیون ریال هزینه‌های بهسازی اداره راه، هزینه عملکردی روزانه یک وسیله نقلیه در یک کیلومتر، ۰/۷۲ ریال کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تأثیر هزینه‌های بهسازی بر هزینه کاربران راه با یک نرخ کاهشی در حال کاستن است. به عبارت دیگر، سرمایه‌گذاری‌های هنگفت جهت کاهش هزینه‌های کاربران نمی‌تواند توجیه‌پذیر باشد.

واژه‌های کلیدی: شبکه راه‌ها، هزینه عملکردی، آنالیز حساسیت.

۱. مقدمه

تعمیر و نگهداری راه‌ها، یکی از فعالیت‌های پُر هزینه در زمینه حمل و نقل به شمار می‌آید (ونگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ عباس و همکاران، ۲۰۰۷؛ بیرن و همکاران، ۲۰۰۹ ؛ یانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ پینگ و سالاری، ۲۰۱۰؛ دشپانده و همکاران، ۲۰۱۰؛ بیانچی و بندینی، ۲۰۱۰؛ لاجنف و همکاران، ۲۰۱۱؛ ونگ و لی، ۲۰۱۱). در این صورت، انتخاب گزینه‌های تعمیر و نگهداری مناسب جهت ارائه سطح سرویس مناسب از مهمترین چالش‌های مهندسین راه می‌باشد (ژانگ و همکاران،

۲۰۱۵). این فعالیت‌ها با هدف حصول اطمینان از ارائه خدماتی مناسب انجام می‌شود که به کاربران راه کمک کند تا با برخوردار بودن از شرایط قابل قبول (زمان و راحتی سفر) به مقاصد مورد نظر دسترسی یابند (پیارک، ۲۰۰۶). هزینه کاربران راه، یکی از پارامترهای مهم در تحلیل هزینه‌های چرخه عمر روسازی است. عواملی مانند نوع وسیله نقلیه و وضعیت سطحی روسازی بر هزینه کاربران و هزینه‌های چرخه عمر روسازی تأثیرگذار است (فخری و شورمیج، ۲۰۱۵). جهت نگهداری راه در یک سطح سرویس قابل قبول، به منابع و بودجه بیشتری نیاز است و در صورت عدم نگهداری مناسب، افزایش هزینه کابران راه[1] را به دنبال دارد. از این رو، این هزینه‌ها نیز مانند هزینه اداره راه[2] اهمیت فراوانی دارند و نیازمند بررسی و ارزیابی هستند (گائو و ژانگ، ۲۰۱۳). زیرا اینگونه هزینه‌ها معمولاً بیشتر از هزینه‌هایی است که سالانه توسط اداره‌های راه به جامعه تحمیل می‌شود (به عنوان مثال، در استرالیا این رقم ده تا پانزده برابر بیشتر است) (پیارک، ۲۰۰٦). در شبکه‌ای از راه‌های کشور پرتغال، هزینه‌های عملکردی وسایل نقلیه از سال ۲۰۱٤ تا ۲۰۲۳ معادل ۱۵۰۸۷۷۹ یورو برآورد شده است. در حالی که هزینه‌های بهسازی اداره راه در همین دوره برنامه‌ریزی حدود ٦۳۰۰۰ یورو تقریب زده شده؛ بدین معنی که هزینه مرمت و نگهداری برای این شبکه راه، تنها در حدود ۴٪ کل هزینه‌های کاربران راه در همین دوره زمانی می‌باشد (منسس و فریرا، ۲۰۱۳). بنابراین، تحلیل هزینه‌های کاربرن راه، به منظور انتخاب طرح مناسب و سیاست نگهداری مناسب با کمترین هزینه، اهمیت بسیاری دارد. بنابراین، می‌توان از این تحلیل به عنوان یک ابزار ضروری در تصمیم‌گیری در خصوص سرمایه‌گذاری برای راه‌های جدید و راه‌های موجود بهره گرفت (پیارک، ۲۰۰۰).

۲. اهمیت موضوع

به صورت مشخص می‌توان اذعان کرد که توسعه اجتماعی و اقتصادی هر کشور متکی بر عملکرد رضایت‌بخش شبکه حمل و نقل آن کشور می‌باشد (هو و همکاران، ۲۰۱۵). در این بین، استفاده بهینه از هزینه‌های اداره راه در حوزه مدیریت راه‌ها، نقش قابل توجهی در کاهش هزینه‌های کاربران راه را دارد و سبب توسعه اقتصادی و اجتماعی یک کشور می‌شود. امروزه، مفهوم مدیریت راه، تنها مربوط به نگهداری و حفاظت از راه‌های موجود به عنوان عناصر ساخت) نبوده، بلکه سازماندهی و مدیریت شبکه جاده‌ای را با هدف کارکرد مؤثر و پاسخگویی به نیازهای کاربران راه پوشش می‌دهد. مورد یاد شده از جمله وظایفی است که در مقایسه با کار مهندسی که به شکل سنتی در این حوزه مورد استفاده قرار داشته است، فراگیرتر و دشوارتر است (پیارک، ۲۰۰۶). بر اساس پژوهش انجام شده به‌وسیله فریرا و همکاران (۲۰۱۴)، پاسخگویی به نیاز کاربران راه، بیشترین تأثیر را در انتخاب گزینه‌های بهینه نگهداری راه دارد. از این‌رو، درک تأثیر هزینه‌های بهسازی راه بر هزینه کاربران راه از اهمیت ویژه‌ای برخودار است و مزایای مربوط به تعمیرات منظم و دوره‌ای در گرو این رابطه قرار دارد. همچنین، اهمیت صرفه‌جویی در هزینه کاربران راه بر نحوه استفاده از منابع مالی موجود و در دسترس تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین، آگاهی از میزان تأثیر هزینه‌های مختلف تعمیر و نگهداری بر سود و هزینه‌های کاربران راه، برای اداره‌های راه ضروری می‌باشد (پیارک، ۲۰۰۶). از این رو، در راستای موثرتر کردن فعالیت‌های تعمیر و نگهداری، می‌باید هزینه‌های اداره راه بر پایه یک تحلیل مؤثر صورت گیرد تا میزان تأثیر آنها بر هزینه‌های کاربران راه تعیین شود. مؤسسات راه با استفاده از این اطلاعات می‌توانند برای به حداقل رساندن هزینه‌های کاربران از منابع محدود بهترین استفاده را ببرند و بهترین تصمیمات را اتخاذ کنند. همچنین، تحلیل اقتصادی می‌تواند به مهندسین در توسعه هر چه بیشتر طرح‌های مقرون به

1- Road user costs
2- Road Agency costs

صرفه‌تر یک پروژه کمک کند (پیارک، ۲۰۰۶). لذا، در تحقیق حاضر سعی شده تحلیل اقتصادی تأثیر هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی بر هزینه‌های کاربران راه برای یکی از شبکه راه‌های کشور ایران بررسی شود. بر این اساس، در این پژوهش، این هدف عمده دنبال می‌شود: ارائه یک تحلیل اقتصادی برای کشورهای در حال توسعه که از عدم وجود پایگاه داده‌ای غنی رنج می‌برند، به نحوی که این تحلیل قادر باشد تأثیر هزینه‌های بهسازی را بر هزینه‌های کاربران راه تعیین کند. بر این مبنا و به کمک نرم افزار مهندسی Matlab، آنالیز حساسیت نسبت به عوامل تأثیرگذار بر تابع هزینه کاربران راه برای شبکه راه منتخب انجام می‌شود. در ادامه، ابتدا مروری بر ادبیات موضوعی ارائه شده و سپس مطالعه موردی انجام شده، به همراه روش تحقیق توضیح داده شده است. در پایان، نتایج به‌دست آمده از مطالعه موردی به همراه جمع‌بندی این تحقیق به اختصار ارائه شده است.

۳. مروری بر پژوهش‌های انجام شده

مروری بر ادبیات فنی موجود در نگهداری راه نشان می دهد که پژوهش‌های معدودی در زمینه تأثیر هزینه‌های اداره راه بر هزینه‌های کاربران راه به انجام رسیده است. بر پایه اطلاعات ارائه شده توسط ۵۸ کشور جهان، گزارشی تحت عنوان " اضمحلال راه‌ها در کشورهای در حال توسعه" ارائه شد که نتایج آن نشان داده که فعالیت بهسازی راه‌ها چنانچه در زمان لازم انجام نشود و گزینه مناسب برای نگهداری راه صورت نگیرد هزینه‌های کاربران راه تا دو سه برابر و حتی بیشتر افزایش می‌یابد (هرال و فیض، ۱۹۸۸). در سال ۱۹۹۸، هگی و ویکرز (۱۹۹۸) تحلیل‌هایی بر مبنای تأثیر کاهش هزینه‌های بهسازی اداره راه بر هزینه‌های کاربران راه ارائه نموده‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان داده که به ازای کاهش یک دلار از هزینه‌های بهسازی، ۳ دلار به هزینه‌های کاربران راه افزوده می‌شود. این پژوهش با فرض نرخ بهره ۱۲ درصد، میانگین سالانه ترافیک روزانه ۵۰۰ و دوره برنامه‌ریزی ۲۵ ساله انجام شده است. همچنین، آنها در همین سال، تأثیر فعالیت‌های بهسازی راه‌ها بر هزینه‌های کاربران را در استراتژی‌های مختلف نگهداری مانند لکه-گیری[1]، روکش آسفالتی[2] همراه با لکه‌گیری، روکش آسفالتی بدون لکه‌گیری و بازسازی روسازی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که بر اساس استراتژی‌های مختلف، به ازای یک دلار افزایش هزینه‌های اداره راه، از ۳/٤ تا ۲۲/۱ دلار از هزینه‌های کاربران راه کم می‌شود. در استراژی‌هایی که فعالیت‌های بهسازی با تأخیر کمتری انجام می‌شد، تأثیر هزینه‌های اداره راه بر کاهش هزینه‌های کاربران بیشتر بوده است. اسلام و بوتلر (۲۰۱۲) به کمک یک نرم‌افزار طراحی روسازی مکانیستیک- تجربی به نام MEPDG نشان داده‌اند که در یک دوره زمانی ۳۵ ساله، افزایش ۱۰۸ هزار دلاری هزینه‌های ترمیم و نگهداری اداره راه، منجر به کاهش ۵ میلیون دلار از هزینه‌های کاربران شده است. جهت بارگذاری این نرم ابزار به داده‌های زیادی مانند مدول دینامیک رویه آسفالتی، ویسکوزیته قیر، مدول برجهندگی خاک بستر، نرمی خزشی، ضریب توزیع ساعتی کامیون، نرخ رشد سالانه وسایل نقلیه و وضعیت روسازی موجود مانند عمق شیارشدگی و میزان ترک خستگی روسازی نیاز است. ارائه تحلیل‌های موفق نیاز به پایگاه داده‌ای چندین ساله و دقیق دارد که بجز در کشورهای توسعه یافته، در اکثر کشورهای در حال توسعه چنین پایگاه داده‌ای وجود ندارد. در این راستا، روش‌های مورد بررسی تاکنون با استفاده از جمع‌آوری داده ترافیکی، ارزیابی عملکرد روسازی در گذشته و وضعیت کنونی آن، ویژگی‌های مصالح و در صورت نیاز مطالعات میدانی امکان‌پذیر بوده است. در چنین شرایطی، ارائه تحلیل‌های مناسب برای کشورهای در حال توسعه و بدون پایگاه داده، الزامی است. استفاده از روش‌های

1- Patching
2- Asphalt overlay

تحلیل برای حل مسئله‌ای که به صورت صحیح تعریف نشده، مسلماً منجر به پاسخ‌های صحیح و دقیق نخواهد گردید. بنابراین، استفاده از روش تحلیل برای حل مسئله به عنوان جزیی از روش سیستم‌ها، زمانی حداکثر فایده را دارد که مسئله به نحو صحیح فرموله شود. در غیر این صورت، حل چنین مسئله‌ای مشابه حل یک مسئله کلاسی به عنوان تمرین خواهد بود (هس و هادسون، ۱۹۹٦).

٤. مطالعه موردی

محور بوئین زهرا – ساوه، بخشی از راه اصلی شمالی جنوبی قزوین – سه راهی اشتهارد – ساوه – سلفچگان است. از ۸۹ کیلومتر طول این جاده، 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 مشخصات سازه‌ای روسازی و ESAL این محور در سال۱۳۹۲ در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، موقعیت این محور در شبکه راه‌های کشور در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات سازه‌ای روسازی و ESAL محور بوئین زهرا- ساوه در سال ۱۳۹۲

تعداد محورهای ساده ۸/۲ هم‌ارز وسایل نقلیه سنگین (میلیون) (ESAL)	تعداد محورهای ساده ۸/۲ هم‌ارز وسایل نقلیه سبک (میلیون) (ESAL)	عدد سازه‌ای (SN)	نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)	کیلومتر (مسیر یکطرفه)
۵/۵۱۷	۱/۰۵۸۲	۳/۳٦	۲۵	۳۳/۵–۳۵
۵/۵۱۷	۱/۰۵۸۲	۳/۲۳	۲۵	٤۵/۵–٤۸/۵
۵/۵۱۷	۱/۰۵۸۲	۵/۲۱	۲۵	۷٦–۸۹

شکل ۱. موقعیت محور بوئین زهرا – ساوه در شبکه راه‌های کشور

۵. روش تحقیق

برای این پژوهش، پس از مطالعه ادبیات فنی گذشته، و تحلیل‌هایی که قبلاً برای تخمین تأثیر هزینه‌های بهسازی بر هزینه کاربران راه ارائه شده‌اند، مدل بهینه‌یابی مرمت و نگهداری فخری و همکاران (۲۰۱۵) برای رسیدن به اهداف تحقیق انتخاب شد. پارامترهای اصلی ورودی مدل عبارتند از: میانگین سالانه ترافیک روزانه، درصد وسایل نقلیه و نرخ رشد آنها، هزینه‌های عملکردی

وسایل مختلف در واحد کیلومتر، هزینه‌های بهسازی فعالیت‌های مختلف، وضعیت موجود روسازی، ماتریس احتمالی انتقال، پارامترهای اقتصادی مانند بودجه سالانه، نرخ تورم و نرخ تنزیل. لازم است بیان شود که برای ورودی‌های مدل نیز از داده‌های سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای استفاده شده است. در مدل مذکور، عملکرد روسازی در آینده با استفاده از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف پیش‌بینی می‌شود. طبقه‌بندی حالات کیفی روسازی با استفاده از شاخص کیفیت سواری صورت گرفته است و راه را به پنج حالت کیفی عالی، خوب، متوسط، ضعیف و خراب طبقه‌بندی می‌کند. در این مدل، از چهار گزینه نگهداری پیشگیرانه، روکش آسفالتی، بازسازی روسازی و عدم عملیات استفاده می‌شود. افق تصمیم‌گیری برای یک دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله (۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲) در نظر گرفته شده است. بودجه سالانه، حد آستانه سطح سرویس و میزان استفاده از فعالیت‌های نگهداری نیز از جمله محدودیت‌های مدل می‌باشند.

در این پژوهش، به کمک نرم افزار مهندسی Matlab، آنالیز حساسیت نسبت به عوامل تأثیرگذار تابع هزینه کاربران راه (بردار وزنی توابع هدف) برای شبکه راه منتخب انجام شده است تا تأثیر هزینه‌های اداره راه بر هزینه‌های کاربران در سیاست‌های مختلف تعیین شود. همچنین، سیاست‌های مذکور در ارتباط با آنالیز دو هدفه (حداقل کردن هم‌زمان هزینه‌های کاربران راه و هزینه‌های بهسازی اداره راه) می‌باشند. برای محاسبه هزینه‌های بهسازی اداره راه و هزینه‌های کاربران متناظر با آن در سیاست‌های مختلف، از روشی استفاده شده که بر اساس آن، با استفاده از ضرایب وزنی که به هر تابع اختصاص داده می‌شود، دو تابع هدف هزینه‌های بهسازی و هزینه‌های کاربران راه، به یک تابع هدف تبدیل می‌شوند. با استفاده از این روش، تابع جدید فرموله شده و به صورت معادله (۱) ارائه گردیده است:

$$
\begin{aligned}
&min\ \bar{Z} = W_{AC}.\frac{AC_1 - AC_{min}}{AC_{mAX} - AC_{min}} + W_{UC}.\frac{UC_1 - UC_{min}}{UC_{mAX} - UC_{min}} = \\
&W_{AC}.\frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{(1+d)^t}N_m\,.R_{mi(t-1)}.x_{mitk}\,.C_{mkt}\,.L_m - AC_{min}}{AC_{mAX} - AC_{min}} + \\
&W_{UC}.\frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M}\sum_{v=1}^{V}\frac{1}{(1+d)^t}.voc_{vjt}.R_{mjt}.L_m\,.AADT_{1392}.\frac{X_v}{100}.(1+r_v)^t\,.\alpha_m.365 - UC_{min}}{UC_{mAX} - UC_{min}} = \\
&\frac{W_{AC}}{AC_{mAX} - AC_{min}}\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{(1+d)^t}N_m\ .R_{mi(t-1)}.x_{mitk}\,.C_{mkt}\,.L_m\right) + \\
&\frac{W_{UC}}{UC_{mAX} - UC_{min}}\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{(1+d)^t}N_m\ .R_{mi(t-1)}.x_{mitk}\,.C_{mkt}\,.L_m\right) - \\
&\frac{AC_{min}W_{AC}}{AC_{mAX} - AC_{min}} - \frac{UC_{min}W_{UC}}{UC_{mAX} - UC_{min}}
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

که در آن $\overline{Z}$ تابع جدید فرموله شده، W_{AC} وزن تابع هزینه بهسازی اداره راه، W_{UC} وزن تابع هزینه کاربران راه، AC_i هزینه بهسازی اداره راه در سیاست i، UC_i هزینه کاربران راه در سیاست i، AC_{max} حداکثر هزینه بهسازی اداره راه، UC_{max} حداکثر هزینه کاربران راه، AC_{min} حداقل هزینه بهسازی اداره راه و UC_{min} حداقل هزینه کاربران راه می‌باشند. همچنین، محدوده مقادیر دو تابع هدف مذکور (AC_{min} و UC_{min}) و (AC_{max} و UC_{max}) با در نظر گرفتن آنالیز تک‌هدفه به‌دست می‌آیند. با حل بهینه معادله (۱) به ازای همه بردارهای وزنی (۱، ۰)، (۰/۰،۰۱/۹۹)، ... و (۰،۱) مقادیر هزینه‌های بهسازی و کاربران راه در سیاست‌های مختلف به‌دست می‌آیند. در واقع، هر یک از بردارهای وزنی به یک سیاست خاص اختصاص دارد. به گونه‌ای که هر چه وزن یک تابع هدف بیشتر باشد، آن تابع در سیاست مورد نظر از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این پژوهش، با استفاده از

الگوریتم کمینه‌سازی مدل‌های غیرخطی به روش برنامه‌ریزی غیرخطی متوالی، جواب‌های مدل به‌دست می‌آید.

۵-۱. روش حل الگوریتم

برنامه‌ریزی غیر خطی متوالی یک روش تکرارپذیر بسیار مناسب و مفید برای حل عددی مسائل بهینه سازی غیر خطی است. این روش، دنباله‌ای از یک مجموعه مسائل بهینه سازی را حل می‌کند که هر کدام از آن مسائل یک مدل چندمتغیره را به یک مدل خطی تبدیل می‌کند. اگر مسئله هیچگونه محدودیت و شرطی نداشته باشد، این روش به روش نیوتن کاهش پیدا می‌کند. محدودیت‌ها به دو نوع شرط مساوی و نامساوی تقسیم می‌شوند. اگر مسئله فقط شروط مساوی داشته باشد، این روش معادل استفاده از روش نیوتن برای شرایط بهینگی مرتبه اول مسئله است. روش مذکور، یک روش تکرارپذیر است که مسئله را برای یک تکرار مشخص و با یک سری زیرمسئله برنامه‌ریزی چندبعدی مدل می‌کند، زیرمسئله‌ها را حل می‌کند و از حل آنها برای ساخت یک تکرار جدید استفاده می‌کند. این ساختار پایان می‌پذیرد به گونه‌ای که دنباله حداقل همگرا می‌شود. روش حل و بیان تئوری آن به علت پیچیده بودن و نیاز به دانش ریاضی پیشرفته در این نوشته نمی‌گنجد.

۵-۲. 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.

$$Min:$$
$$VOC: Z_1 = \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M}\sum_{v=1}^{V}\frac{1}{(1+d)^t}.voc_{vjt}.R_{mjt}.L_m.AADT_{1392}.\frac{X_v}{100}.(1+r_v)^t.\alpha_m.365 \quad (۲)$$
$$Min:$$
$$Z_2 = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{(1+d)^t}N_m.R_{mi(t-1)}.x_{mitk}.C_{mkt}.L_m \quad (۳)$$

که در آن:

$$R_{mjt} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}R_{mi(t-1)}.x_{mitk}.T_{ijkm} \quad \forall m \in M, j \in J, t \in T \quad (۴)$$
$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}N_m.R_{mi(t-1)}.x_{mitk}.C_{mkt}.L_m \le \alpha\frac{1}{(1+\acute{d})^t}B_t \quad \forall t \in T \quad (۵)$$
$$\sum_{j=1}^{J}R_{mjt} = 1 \qquad \forall m \in M, t \in T \quad (۶)$$
$$\sum_{k=1}^{K}x_{mitk} = 1 \qquad \forall m \in M, t \in T, i \in I \quad (۷)$$
$$\sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{j}}\sum_{m=1}^{M}\frac{R_{mjt}.w_m.N_m.(6-j)}{\sum_{m=1}^{M}\frac{N_m}{M}} \ge L \quad \forall t \in T \quad (۸)$$
$$\sum_{m=1}^{\mathrm{M}}\frac{\mathrm{R_{m5t}}.\mathrm{w_m}.\mathrm{N_m}}{\sum_{\mathrm{m}=1}^{\mathrm{M}}\frac{\mathrm{N_m}}{\mathrm{M}}} \le R_5 \quad \forall t \in T \quad (۹)$$
$$\sum_{\mathrm{m}=1}^{\mathrm{M}}\sum_{i=1}^{I}\frac{N_m.\mathrm{w_m}.R_{mi(t-1)}.x_{mit2}}{\sum_{m=1}^{M}\frac{N_m}{M}} \le Q \quad \forall t \in T \quad (۱۰)$$
$$\sum_{\mathrm{m}=1}^{\mathrm{M}}\frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{I}}N_m.\mathrm{w_m}.R_{mi(t-1)}.\sum_{\mathrm{k}=2}^{\mathrm{K}}x_{mitK}}{\sum_{m=1}^{M}\frac{N_m}{M}} \le \mathrm{P} \quad \forall t \in T \quad (۱۱)$$
$$0 \le x_{mitK} \le 1 \quad \forall m \in M, j \in J, t \in T, k \in K \quad (۱۲)$$

که در این مدل، m نماینده خط عبوری، v نوع وسیله نقلیه، i و j نشان‌های حالت‌های کیفی روسازی، t نمایه سال در افق برنامه‌ریزی و k نوع فعالیت بهسازی می‌باشد.($M =$ ۶, $K =$ ۴ ۲, $I = J =$ ۵, $T =$ ۱۰ و). L_m طول خط عبوری m (۱۷/۵)، 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 ($N_1 = N_2 =$ ۱)، X_v درصد وسیله نقلیه v، r_v رشد سالانه وسیله نقلیه v و $AADT_{1392}$ میانگین ترافیک روزانه سالانه (در یک جهت) در سال ۱۳۹۲ (۹۹۱۹) می‌باشد. مقادیر X_v و r_v در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که نرخ رشد سالانه وسایل نقلیه مختلف بر اساس داده‌های ترافیکی سازمان حمل و نقل و جاده‌ای گرفته شده و در پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. این داده ها مربوط به دهه‌های ۷۰ و ۸۰ شمسی می‌باشند. d نرخ تنزیل، $\acute{d}$ نرخ افزایش بودجه، $\bar{d}$ نرخ تورم (۰/۱۵

$\bar{d} = d = d' =$ و $B_t = B_0(1+\acute{d})^t$) 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 ۴ 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 ۳ 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 ۳ آورده شده است.

جدول ۲. X_v درصد وسیله نقلیه v و r_v نرخ رشد سالانه وسیله نقلیه v

پارامتر	سواری	مینی بوس	اتوبوس	کامیون دو محوره	کامیون سه محوره	کامیون چهار محوره و تریلی
	$v=1$	$v=2$	$v=3$	$v=4$	$v=5$	$v=6$
X_v	۱۸	۴	۲	۴۹	۹	۱۸
r_v	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸

جدول ۳. وضعیت اولیه روسازی و هزینه‌های بهسازی در سال ۱۳۹۲ (میلیون ریال بر خط عبوری برکیلومتر)

درصد حالت‌های کیفی مختلف					هزینه فعالیت‌های مرمت و نگهداری		
s_5	s_4	s_3	s_2	s_1	بازسازی	روکش	نگهداری پیشگیرانه	عدم عملیات
۱۴/۲۹	۸/۵۷	۳۱/۴۳	۴۵/۷۱	۰	۶۷۰۷	۹۱۷	۱۰۸	۰
۱۴/۲۹	۸/۵۷	۱۷/۱۴	۴۰	۲۰	۶۷۰۷	۹۱۷	۱۰۸	۰

جدول ۴. هزینه عملکردی وسایل نقلیه در حالت‌های کیفی مختلف در سال ۱۳۹۲ (ریال بر کیلومتر بر وسیله نقلیه)(فخری و همکاران، ۲۰۱۵)

حالت‌های عملکردی مختلف	سواری	مینی بوس	اتوبوس	کامیون دو محوره	کامیون سه محوره	کامیون چهار محوره و تریلی
s_1 (عالی)	۳۱۸۰	۵۷۳۷	۱۰۷۰۲	۱۳۳۷۱	۱۷۵۹۷	۲۴۱۷۶
s_2 (خوب)	۳۲۱۸	۵۸۱۵	۱۱۸۵۶	۱۳۹۲۲	۱۸۳۹۰	۲۵۶۹۱
s_3 (متوسط)	۳۳۲۵	۶۱۰۲	۱۳۸۷۵	۱۵۰۵۲	۲۰۰۵۶	۲۸۳۲۱
s_4 (ضعیف)	۳۵۵۱	۶۷۴۳	۱۶۹۹۰	۱۷۰۲۸	۲۲۹۹۷	۳۲۳۷۱
s_5 (خراب)	۳۹۴۸	۷۸۶۵	۲۱۳۱۰	۲۰۰۵۱	۲۷۴۷۴	۳۸۰۱۶

۵-۳. فرضیات مدل

از آنجایی که برای عوامل تشکیل دهنده هزینه‌های سفر، از جمله سفر های کاری مسافران، درصد استفاده شخصی از وسایل نقلیه و ارزش ریالی ساعات کاری و غیر کاری مسافران و هزینه تصادفات هیچگونه آماری در کشور ایران وجود ندارد، مقادیر این پارامترها صفر در نظر گرفته شده و در تحلیل فقط از عوامل هزینه‌های عملکردی وسیله نقلیه[1] استفاده شده است. سایر فرضیات در نظر گرفته شده در پژوهش، در بخش‌های بعدی آورده شده است (جدول ۵).

پارامتر نرخ کاهش ارزش پول ملی (نرخ تنزیل) و نرخ افزایش هزینه‌ها (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 سال‌های آتی از حوصله بحث این مقاله خارج است. به همین دلیل، با توجه به شرایط کنونی کشور، مقدار ثابت ۱۵٪ برای هر دو پارامتر مذکور در کل دوره برنامه‌ریزی فرض شده است.

پارامتر نرخ افزایش بودجه و ضریب تخصیص آن: تعیین پارامتر نرخ افزایش بودجه نیز مانند پارامتر نرخ‌های تنزیل و تورم، 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 تقریباً 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 در این تحقیق عدد ۰/۳۳ را فرض شده تا پارامتر ضریب تخصیص در جهت اطمینان انتخاب شده باشد.

پارامتر توزیع ترافیک باندها و وزن آنها: پارامتر توزیع ترافیک بر اساس آئین‌نامه 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 اداره 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 (ابطحی، ۱۳۸۹). با محاسبه ارزش راه با استفاده از فهرست‌بهای واحد پایه رشته راه سال ۱۳۹۲- رسته راه و ترابری و انتخاب عدد ۵٪ برای نگهداری راه، بودجه تعیین شده است (ارزش راه با استفاده از فهرست‌بها ۲۳/٤۵ میلیارد تومان برآورد شده است. بنابراین، مقدار بودجه سالانه برابر است با: میلیارد تومان ۱/۲=۰/۰۵×۲۳/۴۵).

پارامتر هزینه فعالیت‌های بهسازی: بر اساس فهرست-بهای واحد پایه رشته راهداری سال ۱۳۹۲- رسته راه و ترابری تعیین شده است.

پارامترهای حد مجاز استفاده از کل فعالیت‌های بهسازی: با توجه به محدودیت منابع نیروی انسانی و مصالح، حداکثر توانایی اداره 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 اداره راه در استفاده سالانه از فعالیت‌های پیشگیرانه، ۱۵٪ کل راه فرض شده است.

جدول۵. فرضیات مورد استفاده برای تعیین پارامترهای مدل

متغیر	فرض مورد استفاده
نرخ تنزیل	۱۵ درصد
نرخ تورم	۱۵ درصد
توزیع ترافیک باند راست*	۰/۸
توزیع ترافیک باند چپ*	۰/۲
نرخ افزایش بودجه*	۱۵ درصد
وزن هر باند*	۰/۵
ضریب تخصیص*	۰/۳۳
حد بودجه سالانه	۱۲ میلیارد ریال
حد مجاز فعالیت‌های مرمت و نگهداری*	۲۵ درصد کل شبکه
حد مجاز فعالیت‌های نگهداری*	۱۵ درصد شبکه

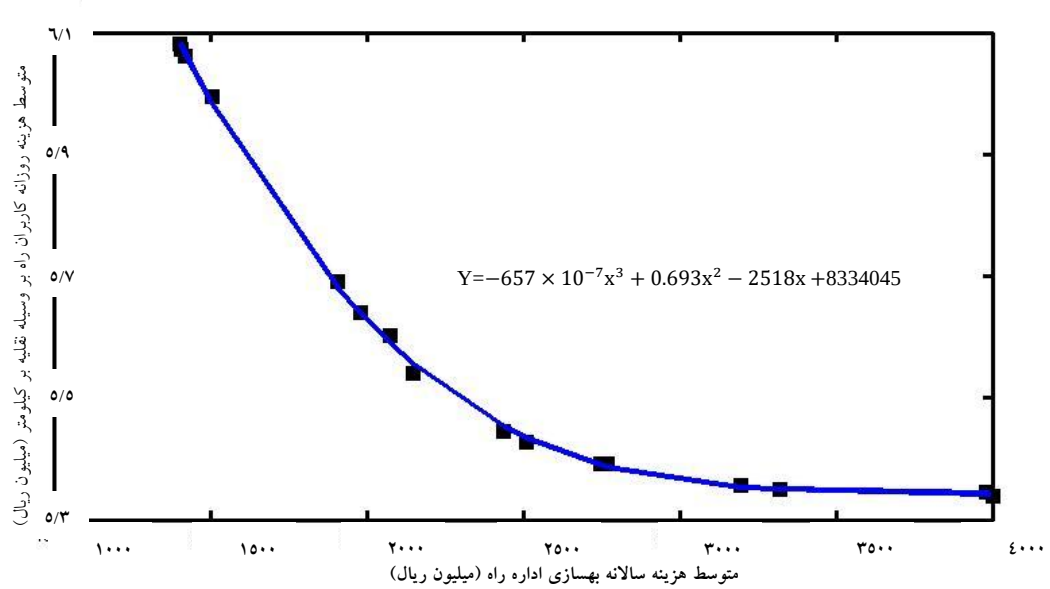
***تعریف این پارامترها الزامی نمی‌باشد.**

1- Vehicle operation costs

۶. نتایج

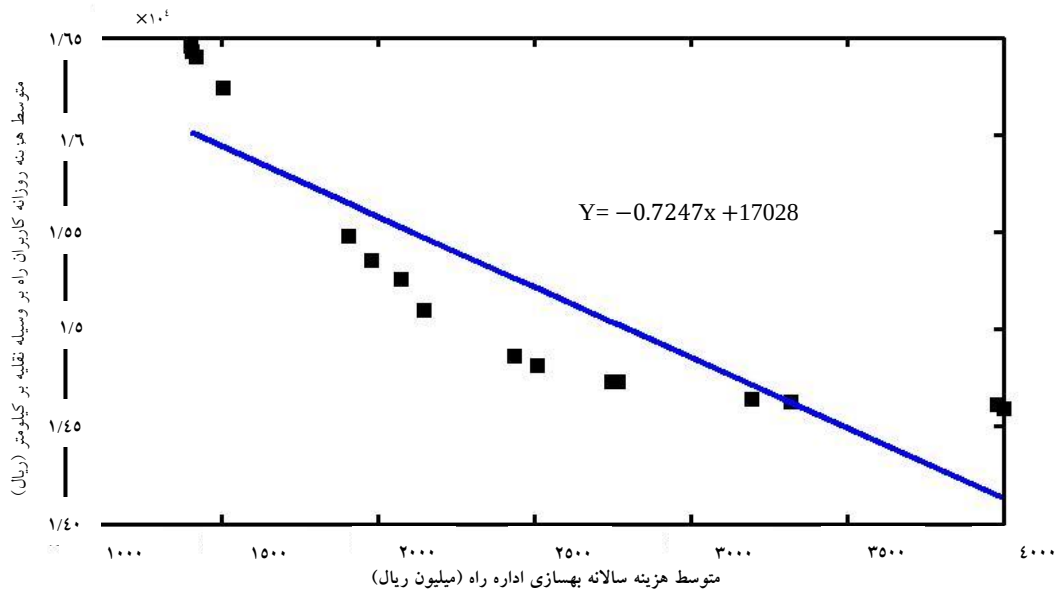
نتایج حاصل از حل این مدل با استفاده از الگوریتم کمینه‌سازی مدل‌های غیرخطی به روش برنامه‌ریزی غیرخطی ترتیبی به کمک نرم‌افزار MATLAB R2012a به‌دست آمده و در شکل ۲ ارائه گردیده است. بر مبنای نتایج به‌دست آمده، رابطه بین هزینه‌های بهسازی و هزینه‌های کاربران راه به‌دست آمده است که به صورت معادله (۱۳) بیان شده است:

$$Y=-657\times10^{-7}x^3+0.693x^2-2518x+8334045 \quad (۱۳)$$



شکل ۲. تغییرات هزینه کاربران راه به ازای مقادیر مختلف هزینه‌های بهسازی اداره راه

که در آن x متوسط هزینه سالانه بهسازی اداره راه بر حسب میلیون ریال و Y هزینه سالانه کاربران راه برای یک وسیله نقلیه و در یک کیلومتر (ریال) می‌باشند. رابطه بالا نشان می‌دهد که هزینه کاربران راه با یک نرخ کاهشی در حال کاستن است. این موضوع اهمیت بهسازی در سال‌های اولیه را مورد توجه قرار می‌دهد، زیرا بیشتر کاهش هزینه کاربران در مرحله اول اتفاق افتاده و با مقداری افزایش افت هزینه کاربران در مرحله بعدی قابل تصحیح است. میانگین شیب منحنی شکل ۲ در نقاط مختلف، تأثیر هزینه بهسازی بر هزینه کاربران راه را نشان می‌دهد. در این پژوهش، برای به‌دست آوردن میانگین شیب منحنی از دو روش استفاده شده است. در روش اول، که نسبت به روش دوم از دقت بالاتری برخوردار است، تعداد بسیار زیادی نقطه مشخص شده و میانگین شیب در نقاط انتخاب شده جواب مسئله می‌باشد. در این روش، در محدوده ۱٤۰٤ تا ٤۰۰۰، ۲۵۹۷ نقطه انتخاب و میانگین شیب نقاط مذکور محاسبه می‌شود.

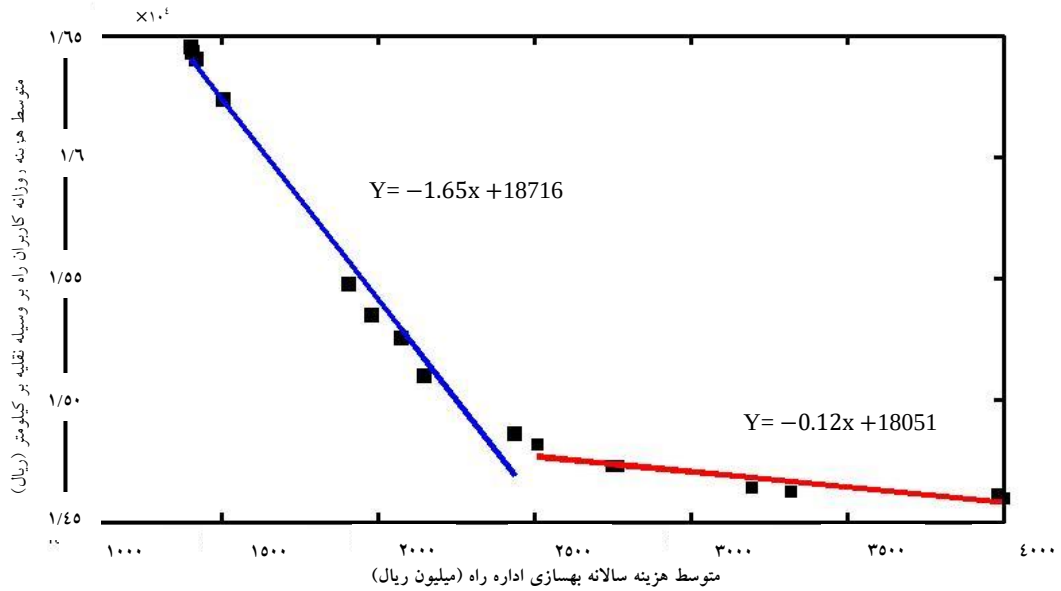


شکل ۳. تغییرات هزینه کاربران راه به ازای مقادیر مختلف هزینه‌های بهسازی اداره راه به صورت خطی

نتایج نشان می‌دهد که میانگین شیب نقاط انتخاب شده ۰/۷۱ به‌دست می‌آید. در روش دوم (تقریبی)، روند کاهش هزینه‌های کاربران راه در برابر هزینه بهسازی، به صورت یک معادله خطی برازش می‌شود. بنابراین، شیب خط به‌دست آمده، جواب مسئله می‌باشد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، تغییرات هزینه کاربران در مقابل هزینه‌های بهسازی به صورت یک معادله خطی برازش شده که شیب آن معادل ۰/۷۲ می‌باشد و جواب آن با تقریب خوبی برابر با روش اول می‌باشد. مقدار ۰/۷۲ بدان معناست که به ازای افزایش یک میلیون ریال هزینه‌های بهسازی اداره راه، هزینه عملکردی روزانه یک وسیله نقلیه در یک کیلومتر، ۰/۷۲ ریال کاهش می‌یابد. نتیجه به‌دست آمده فقط برای یک وسیله نقلیه و در یک کیلومتر است. اگر این تحلیل به اندازه تمام راه‌های اصلی کشور (۸۰۰۰۰ کیلومتر) صورت می‌گرفت و فرض شود حدود ۲۵ میلیون وسیله نقلیه وجود داشته باشد، میانگین ارزش ریالی کاهش هزینه کاربران راه در یک سال برابر با ۵۲۵٦۰۰ میلیارد ریال می‌شد که تقریباً برابر با نصف کل بودجه سالانه کشور می‌باشد (میلیارد ریال ۵۲۵٦۰۰=۲۵۰۰۰۰۰۰×۸۰۰۰۰×۳٦۵×۰/۷۲) و بدیهی است میزان کاهش هزینه‌های کابران در این دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله معادل بودجه ۵ سال کشور می‌باشد. بنابراین، با اجرای به‌موقع فعالیت‌های بهسازی می‌توان هزینه کاربران راه را به مقدار قابل توجهی کاهش داد.

همانطور که ذکر شد، نتایج حاصل از حل مدل بهینه‌یابی برای مطالعه موردی نشان می‌دهد که با افزایش هزینه‌های بهسازی راه، روند کاهشی هزینه‌های کاربران راه رو به کاهش است. به‌طوری که برای هزینه‌های بهسازی سالانه بیشتر از ۳۲۰۰ میلیون ریال، افزایش هزینه‌های اداره راه تأثیر چندانی در کاهش هزینه کاربران راه ندارد. شکل ٤ مقایسه تأثیر هزینه‌های سالانه اداره راه بر هزینه کاربران راه را در مقادیر کم و زیاد هزینه‌های بهسازی نشان می‌دهد. در این شکل، میانگین کاهش هزینه کاربران راه برای سیاست‌های مختلف بر اساس دو بازه ۱٤۰۰ تا ۲۵۰۰ و ۲۵۰۰ تا ٤۰۰۰ میلیون ریالی هزینه‌های بهسازی با هم مقایسه شده است. بر این اساس، اگرچه هزینه کاربران راه در محدوده ۲۵۰۰ تا ٤۰۰۰ میلیون ریالی، با افزایش هزینه‌های بهسازی، در حال کاهش یافتن است، اما این مقدار کاهش در مقایسه با محدوده ۱٤۰۰ تا ۲۵۰۰ میلیون ریالی بسیار اندک می‌باشد. از نتایج به‌دست آمده

از شکل ٤ می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر هزینه‌های بهسازی بر هزینه کاربران راه در مقادیر کم، تقریباً ١٤ برابر تأثیر آن در مقادیر زیاد می‌باشد. بنابراین، سرمایه گذاری‌های به‌عمل آمده در حوزه نگهداری راه‌ها جهت کاهش هزینه‌های کاربران، هنگامی که هزینه‌های بهسازی زیاد است نمی‌تواند توجیه‌پذیر باشد.



شکل ٤. تغییرات هزینه کاربران راه به ازای مقادیر کم و زیاد هزینه‌های بهسازی اداره راه

٧. نتیجه گیری

در این پژوهش، نتایج حاصل از حل این مدل با استفاده از الگوریتم کمینه سازی مدل‌های غیرخطی به روش برنامه‌ریزی غیرخطی ترتیبی به کمک نرم افزار MATLAB R2012a به‌دست آمده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که هزینه کاربران راه با یک نرخ کاهشی در حال کاستن است. به‌طوری که برای هزینه‌های بهسازی سالانه بیشتر از ٣٢٠٠ میلیون ریال، افزایش هزینه‌های اداره راه تأثیر چندانی در کاهش هزینه کاربران راه نداشته و تأثیر هزینه‌های بهسازی بر هزینه کاربران راه در مقادیر زیاد، تقریبا یک چهاردم تأثیر آن در مقادیر کم می‌باشد. این موضوع اهمیت بهسازی در سال‌های اولیه را مورد توجه قرار می‌دهد. زیرا بیشتر کاهش هزینه کاربران در مرحله اول اتفاق افتاده و با مقداری افزایش افت هزینه کاربران در مرحله بعدی قابل تصحیح است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که به ازای افزایش یک میلیون ریال هزینه‌های بهسازی اداره راه، هزینه عملکردی روزانه یک وسیله نقلیه در یک کیلومتر، ٠/٧٢ ریال کاهش می‌یابد. همچنین، اگر این تحلیل به اندازه تمام راه‌های اصلی کشور صورت گیرد میزان کاهش هزینه‌های کابران در این دوره برنامه‌ریزی ١٠ ساله معادل بودجه ٥ سال کشور می‌باشد. بنابراین، با اجرای بموقع فعالیت‌های بهسازی می‌توان هزینه کاربران راه را به مقدار قابل توجهی کاهش داد.

٨. مراجع

ابطحی، س. م. ١٣٨٩. "آسفالت‌های سرد حفاظتی". جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان.

دبیرخانه مجمع جهانی راه- پیارک. ١٣٧٩. "برآورد هزینه چرخه عمر راه‌ها (روسازی بتنی)"، مترجمین: میرکریمی، ع.، فتح‌الهی فرد، ع. و ذبیحی، ع.، وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل،

تهران.

دبیرخانه مجمع جهانی راه- پیارک. ۱۳۸۵. "نگهداری راه"، مترجمین: حجازی، ن. و عموزاده، م.، وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل، تهران.

فخری، م.، آلاله، م. و ادریسی، ع. ۱۳۹۴. " ارائه مدل بهینه‌یابی تعمیر و نگهداری روسازی با در نظر گرفتن هزینه‌های کاربران برای ایران". فصل‌نامه مهندسی حمل و نقل.

شورمیج، ا. و فخری، م. ۱۳۹۴. "بررسی فنی و اقتصادی رویکردهای مرمت و بهسازی روسازی بر مصرف سوخت وسایل نقلیه". عمران مدرس، ۱۴(۴): ۹۳-۱۰۲.

Abbas, A., Kutay, M. E., Azari, H. and Rasmussen, R. 2007. "Three-dimensional surface texture characterization of Portland cement concrete pavements". Computer-Aided Civil Infrastruct. Eng., 22(3): 197-209.

Bianchini, A. and Bandini, P. 2010. "Prediction of pavement performance through neuro-fuzzy reasoning". Computer-Aided Civil Infrastruct. Eng., 25(1): 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". Comput.-Aided Civil Infrastruct. Eng., 24(2): 120-129.

Deshpande, V. P., Damnjanovic, I. D. and Gardoni, P. 2010. "Reliability-based optimization models for scheduling pavement rehabilitation". Computer-Aided Civil Infrastruct. Eng., 25(4): 227-237.

Ferreira, A. J. L., Meneses, S. and Paiva, C. 2014. "Pavement Maintenance Programming Considering Three Objectives: Maintenance and Rehabilitation Costs, User Costs, and the Residual Value of Pavements". Proc. of the International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA.

Gao, H. and Zhang, Z. 2013. "A Markov-based road maintenance optimization model considering user costs". Computer-Aided Civil Infrastruct. Eng., 28(1): 1-14.

Haas, R. and Hudson, W. R. 1996. "Introduction to the Concepts of Pavement Management System". Robert E. Krieger Publ. Co., New York, USA.

Harral, C. and Faiz, A. 1998. "Road deterioration in developing countries: Causes and remedies". A World Bank Policy Study, Washington, DC.

Heggie, I. G. and Vickers, P. 1998. "Commercial Management and Financing of Roads". World Bank Publ., Vol. 23.

Hu, X., Daganzo, C. and Madanat, S. 2015. "A reliability-based optimization scheme for maintenance management in large-scale bridge networks". Transport. Res., Part C: Emerging Technol., 55: 166-178.

Islam, S. and Buttlar, W. 2012. "Effect of pavement roughness on user costs". Transport. Res. Rec., J. Transport. Res. Board, 2285: 47-55.

Meneses, S. and Ferreira, A. 2013. "Pavement maintenance programming considering two objectives: Maintenance costs and user costs". Int. J. Pave. Eng., 14(2): 206-221.

Lajnef, N., Rhimi, M., Chatti, K., Mhamdi, L. and Faridazar, F. 2011. "Toward an integrated smart sensing system and data interpretation techniques for pavement fatigue monitoring". Computer-Aided Civil and Infrastruct. Eng., 26(7): 513-523.

Wang, F., Zhang, Z. and Machemehl, R. B. 2003. "Decision-making problem for managing pavement maintenance and rehabilitation projects". Transport. Res. Rec., 1853: 21-28.

Wang, K. C. P. and Li, Q. 2011. "Pavement smoothness prediction based on fuzzy and gray theories"". Computer-Aided Civil Infrastruct. Eng., 26(1): 69-76.

Yang, C., Tsai, Y. and Wang, Z. 2009. "Algorithm for spatial clustering of pavement segments". Computer-Aided Civil Infrastruct. Eng., 24(2): 93-108.

Ying, L. and Salari, E. 2010. "Beamlet transform based technique for pavement image processing and classification". Computer-Aided Civil Infrastruct. Eng., 25(8): 572-580.

Zhang, L. X., Qin, J., He, Y. X., Ye, Y. and Ni, L. L. 2015. "Network-level optimization method for road network maintenance programming based on network efficiency". J. Central South Univ., 25: 4882-4889.