ارایه روشی ابتکاری در حل مسائل برنامه‌ریزی نگهداری و ترمیم راه‌ها

مقاله علمی- پژوهشی

وحید خلیفه*، استادیار، بخش مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
نوید ندیمی، استادیار، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
امیرحسین زارع‌میرحسینی، دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: vahid.khalifeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۰- پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵
صفحه ۱۴۸-۱۳۳

چکیده

راه‌ها یکی از مهم‌ترین سرمایه‌های زیرساختی هر کشوری محسوب می‌شوند. جهت حفظ این سرمایه‌ها یکی از مباحث با اهمیت برنامه‌ریزی جهت نگهداری و تعمیر روسازی راه‌ها است. گذشت زمان، عبور ترافیک (بویژه وسایل نقلیه سنگین) و نیز شرایط آب و هوایی منطقه مورد نظر، تنش‌های زیادی را به روسازی راه وارد می‌کند. این تنش‌ها باعث ایجاد خرابی، افت کیفیت سواری و در نهایت اضمحلال روسازی می‌شود. با توجه به افزایش روز افزون هزینه‌های ناشی از عملیات ترمیم و نگهداری راه‌ها، یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های گردانندگان شبکه کاهش این هزینه‌ها با حفظ استاندارد کیفی لازم جهت عبور وسایل‌نقلیه است. هدف اصلی این پژوهش استفاده از یک مدل دگرگونی (تکاملی) برای کمینه‌کردن هزینه‌های عملیات ترمیم و نگهداری راه‌های شبکه به‌گونه‌ای است که منافع دراز مدت سیستم، با حفظ شرایط خدمت‌رسانی قابل قبول، بیشینه گردد. پس از ساخت مدل، کارکرد آن روی شبکه‌های آزمایشی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده رضایت بخش بوده است.

واژه‌های کلیدی: روسازی، تعمیر و نگهداری، مدل دگرگونی، مارکوف

۱-مقدمه

در اثر عبور وسایل‌نقلیه سنگین و همچنین اضافه بارهای آنها، تواتری از بارهای مختلف به راه وارد می‌شود. این بارها باعث ایجاد تنش‌های گسترده‌ای (چون خستگی) در روسازی شده، که باعث خرابی آن می‌شوند. وجود زمستان‌های سرد و یا تابستان‌های بسیار گرم، تغییرات دمایی، بارندگی زیاد و تداوم دوره‌های یخ زدن و آب شدن باعث ایجاد تنش‌های بزرگی در روسازی شده، که عامل دیگری برای خراب شدن راه (برای نمونه ایجاد ترک‌های برودتی) هستند (Haas, Hudson and Zaniewski, 1994). با توجه به خرابی‌های ایجاد شده در اثر دو عامل بالا، همواره راه‌ها نیاز به یک سری اقدامات نگهداری و یا ترمیم (M&R) دارند. با توجه به محدود بودن منابع مالی و افزایش روز افزون هزینه‌های مربوط به نگهداری و ترمیم راه، انتخاب یک فعالیت مناسب و همچنین زمان‌بندی موثر، به صورتی که هزینه‌های مربوط به نگهداری و ترمیم راه کمینه شود، یکی از نگرانی‌های مهم مدیران ارشد و متصدیان مربوطه است. هدف از این اقدامات تخصیص راهبردهای مناسب تعمیر و نگهداری با در نظر گرفتن گزینه‌های مختلف تعمیر و نگهداری، هزینه‌های چرخهٔ عمر، برنامه‌های مختلف تعمیر و نگهداری و محدودیت‌های مالی و بودجه‌ای است. انجام تعمیر و نگهداری راه به شکل صحیح باعث افزایش عمر سرویس‌دهی راه و مهم‌تر از همه ارتقای ایمنی کاربران و ذخیره منابع ملی است. گام حیاتی در جهت تحقق موارد مذکور و رسیدن به اهداف مد نظر مدیریت هزینه‌هاست. به نحوی که با بهینه‌سازی هزینه‌های تعمیر و نگهداری راه، هزینه‌های مذکور با بودجه‌های موجود و مطلوب تطابق داده شود. با توجه به محدودیت‌های مالی موجود در کشور و همچنین پهناور بودن کشور و به تبع آن زیاد بودن طول راه‌ها و با در نظر گرفتن نیاز مبرم به تعمیر و نگهداری راه‌های موجود

به عنوان سرمایه ملی و هزینه‌های بالای تعمیر نگهداری، بحث مدیریت و بهینه‌سازی هزینه‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها اهمیت و جلوه بسیار زیادی پیدا می‌کند. هدف از انجام این پژوهش توسعه یک مدل دگرگونی (تکاملی) برای کمینه کردن و بهینه‌سازی هزینه‌های عملیات ترمیم و نگهداری راه‌های شبکه به گونه‌ای است که منافع دراز مدت سیستم، با حفظ شرایط خدمت‌رسانی قابل قبول، بیشینه گردد. با توجه به اهمیت بهینه‌سازی هزینه‌ها و محدویت‌های بودجه‌ای موجود، توسعه مدل مذکور می‌تواند نقشی مهمی در کاهش هزینه‌ها با حفظ کیفیت فعالیت‌های تعمیر و نگهداری داشته باشد. پس از توسعه مدل مذکور، مدل بر روی شبکه‌های فرضی اعمال می‌گردد تا کارایی مدل مورد ارزیابی قرار گیرد. این مقاله ۵ بخش دارد. بعد از بخش مقدمه در بخش دوم مروری بر ادبیات تحقیق مرتبط با مدل‌سازی‌های انجام گرفته در راستای برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی مربوط به تعمیر و نگهداری راه ارایه می‌گردد. در بخش سوم روش تحقیق شامل فرایند توسعه مدل دگرگونی و چگونگی استفاده از مدل مذکور ارائه می‌شود. در بخش چهار با ساخت شبکه های فرضی اقدام به ارزیابی مدل توسعه یافته می‌گردد. در نهایت در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مقاله شرح داده می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

در سال ۱۹۸۸ شاهین و همکارانش برای یافتن استراتژی مناسب برای نگهداری و ترمیم که هزینه‌ها را کاهش دهد، کاربرد روش‌های مختلف ریاضی از جمله برنامه‌ریزی پویا را در نرم افزار Micropaver بررسی نمودند (Feighan, Shahin, Sinha and White, 1988). آنها برای پیش‌بینی عملکرد آینده روسازی از ماتریس احتمال انتقال (گذر) مارکوف استفاده نمودند و برای محاسبه آن فرض کردند، که وضعیت روسازی بعد از گذشت یک سال بیش از یک حالت افت نمی‌کند. همچنین، احتمالات این ماتریس را از طریق برنامه‌ریزی غیر خطی محاسبه نمودند. آنها بیان نمودند، که برای تعیین جواب بهینه راهبرد نگهداری و ترمیم، استفاده از برنامه‌ریزی پویا نسبت به بقیه روش‌های کلاسیک یک برتری مهم دارد. برنامه‌ریزی پویا جواب بیشینه (کمینه) مطلق یا کلی را مشخص می‌نماید نه جواب بیشینه (کمینه) محلی. همچنین نقص عمده برنامه‌ریزی پویا، عدم فرمول‌بندی مناسب مسأله است. در مجموع برنامه‌ریزی پویا روش قدرتمندی برای حل مسأله بهینه‌سازی راهبرد نگهداری و ترمیم است. مولفه‌های اساسی در برنامه‌ریزی پویا شامل حالت سیستم، مرحله (که معمولاً یک سال در افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شود)، متغیرهای تصمیم‌گیری، بازگشت سرمایه و تابع انتقال سیستم هستند. تابع هدف برای این مسأله، به صورت کمینه‌سازی هزینه‌های قابل انتظار در طول عمر سیستم (که ۲۵ سال در نظر گرفته شد)، به شرط نگهداری همهٔ قطعات روسازی در بالای آستانه عملکردی (که از پیش تعیین شده) بیان می‌شود. شاهین و همکارانش بیان نمودند، که استفاده از برنامه‌ریزی پویا به عنوان ابزار بهینه‌سازی در سیستم مدیریت روسازی، خروجی‌هایی با سرعت بالاتر بدون کاهش دقت خواهد بود.

در دهه‌های اخیر از جمله روش‌هایی که برای حل مسأله نگهداری و ترمیم راه پیشنهاد شد، استفاده از الگوریتم‌های دگرگونی (تکاملی) است. الگوریتم‌های دگرگونی (تکاملی) روش‌های جستجوی تصادفی هستند، که بر اساس فرآیند تکامل تدریجی بنیان شده‌اند. جیکاب در سال ۱۹۹۲ عنوان کرد که حل این مسأله با روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی قدیمی کار راحتی نیست، زیرا مدت زمان حل مسأله با توجه به عوامل یاد شده به صورت نمایی افزایش می‌یابد. درجه سختی این مسأله برای سطح شبکه به صورت گسترده‌ای بستگی به ابعاد مسأله و خصوصیات تابع هدف دارد. با توجه به این شرایط نیاز به یک روش موثرتر است (Nunoo, 2001) و (Jacob, 1992). از مدل‌های دگرگونی معمولاً به عنوان روش‌های بهینه‌سازی کلی یاد می‌شود، زیرا این مدل‌ها این توانایی را دارند که از گیر افتادن در چاله‌ها و برآمدگی‌های موضعی در سطح تابع هدف اجتناب کنند. در سال ۲۰۰۶ چن و فلینتش با ترکیب مدل منطق فازی در فرآیند تحلیل ریسک جهت ارتقای روش‌های قدیمی احتمالی تحلیل هزینه چرخه عمر اقدام نمودند.

در واقع، مدل فازی تعیین‌کننده زمان عملیات نگهداری و ترمیم در تحلیل هزینه چرخه عمر، برای انتخاب راهبرد بهینه است. آنها بیان نمودند، با توجه به اینکه اطلاعات در تحلیل هزینه چرخه عمر به صورت مبهم و غیر مطمئن است، استفاده از منطق فازی که روشی برای استنتاج از چنین اطلاعاتی است، می‌تواند مفید باشد (Chen and Flintsch, 2007). در سال ۲۰۰۷ آویجیت و مانوج با هدف توسعه یک مدل بهینه‌سازی ریاضی که وضعیت شبکه را ارزیابی نموده و با در نظر گرفتن

محدودیت در بودجه، به حل مسأله برنامه‌ریزی نگهداری و ترمیم راه برای یک دوره چندین ساله در سطح شبکه پرداختند (Avijit and Manoj, 2007). آنها برای حل این مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. آنها تابع تخمین خرابی را یک تابع قطع در نظر گرفتند. این تابع به صورت یک تابع سهمی شکل وابسته به زمان بود. آنها داده‌های زیر را برای توسعه‌ی مدلشان به عنوان داده‌های ورودی در نظر گرفتند:

میزان خرابی، هزینهٔ ترمیم، سطح آستانه خرابی، میزان بودجه در دسترس تابع ارزیابی خرابی مورد استفاده در مدل آنها دارای شرایط زیر بود:

-نرخ خرابی با گذر زمان افزایش می‌یابد.

-میزان خرابی در ابتدای ساخت راه صفر است.

-هر عنصر شبکه در انتهای عمر خود به طور کامل تخریب می‌شود.

پس از توسعه مدل، آنها با در نظر گرفتن دو محدودیت بودجه و سطح آستانه عملکردی و از طریق کمینه کردن هزینه‌های نگهداری، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مسأله را حل نمودند. پس از حل مسأله آنها پی بردند که مانند سایر مسائل حل شده با الگوریتم ژنتیک، گاهی اوقات مدل به یک جواب بهینه همگرا نمی شود اما باز هم یک جواب نزدیک به جواب بهینه به دست می‌دهد. رایا حسن و همکاران با استفاده از یک مدل احتمالی خرابی‌های سطح روسازی را در سطح شبکه مدل‌سازی نمود. مدل‌سازی احتمالی صورت گرفته با استفاده از رگرسیون لجستیک و روند تصمیم‌گیری مارکوف صورت گرفت و نشان داد نتایج مدل تطابق قابل قبولی با مقادیر واقعی دارد (Hassan, Lin and Thananjeyan, 2017). جاو سانتوس و همکاران یک الگوریتم ژنتیک هیبرید برای مدیریت روسازی توسعه داد و با استفاده از این مدل سعی نمود هزینه‌های مدیریت روسازی را بهینه نماید. آنها نشان دادند که الگوریتم ژنتیک هیبرید توسعه داده شده نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک متعارف به لحاظ بازدهی کارایی بیشتری دارد (Santos, Ferreira, and Flintsch, 2017). پدرو مارسلینو و همکاران با استفاده از یک الگوریتم یادگیری ماشین که رگرسیون قاعده‌مند با لسو نامیده می‌شود یک مدل تخصیص منابع برای روسازی توسعه دادند.

آنها نشان دادند که الگوریتم یادگیری ماشینی می‌تواند دقت شاخص‌های تعیین وضعیت روسازی را در شرایط نبود اطلاعات در دسترس کافی بهبود بخشد (Marcelino, Lurdes Antunes and Fortunato, 2018). شوهل رضا امین و همکاران با استفاده از یک الگوریتم هوش مصنوعی پس‌رونده و الگوریتم یادگیری قواعد دلتا در رابطه با عملکرد روسازی اقدام به توسعه مدل نمودند (Amin and Amador-Jiménez, 2017). کریستینا پلتی و همکاران با استفاده از ابزار هوش مصنوعی یک مدل برای شبیه‌سازی شرایط روسازی ارایه کردند و نشان دادند که ابزار هوش مصنوعی می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا راهبرد بهینه را انتخاب نمایند (Plati, Georgiou and Papavasiliou, 2016).

۳-روش تحقیق

این مطالعه بر اساس روند تصمیم‌گیری مارکوف که یک روش قدرتمند در حل مسائل برنامه‌ریزی و انتخاب تصمیم بهینه است، پایه‌ریزی شده است. در این روند، محیط به صورت مجموعه‌ای از حالت‌ها مدل شده، که اجرای گزینه‌های عملیاتی مختلف، می‌تواند حالت‌های سیستم را کنترل نماید. در واقع روند تصمیم‌گیری مارکوف از حالت‌ها، گزینه‌های عملیاتی، تابع گذر بین حالت‌های سیستم و تابع درآمدها تشکیل شده است (Gopal and Majidzadeh, 1991). منظور از حالت یک سیستم در واقع یک ویژگی واحد از سیستم است که در مسأله مورد نظر نقش کلیدی را ایفا می‌کند. برای نمونه، در بحث اخیر منظور از حالت سیستم، وضعیت کارکردی یک شبکه راه (خوب، متوسط، بد) است. در زنجیره مارکوف ماتریس احتمال گذر (تابع گذر) تعیین‌کننده احتمال تغییر حالت راه از وضع موجود به حالتی (دیگر) پس از یک دوره زمانی است. یک مبنای ساخت ماتریس احتمال گذر، شرایط روسازی در سال‌های گذشته است. در روند مارکوف فرض می‌شود که وضعیت آینده روسازی تنها به وضعیت کنونی روسازی وابسته است. به منظور محاسبه احتمال حالت آینده روسازی تنها به بردار احتمالی وضعیت روسازی و ماتریس احتمال گذر نیاز است.

$$P(t)=\begin{bmatrix} p_{11}(t) & p_{12}(t) & \cdots & p_{1n}(t) \\ 0 & p_{22}(t) & \dots & p_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

که در آن $P(t)$ ماتریس احتمال گذر در سال t و $p_{ij}(t)$ احتمال اینکه روسازی در سال t تخریب شده و از حالت i به حالت j درآید در حالیکه $i < j$ است و $p_{ii}(t)$ احتمال اینکه روسازی در همان حالت i باقی بماند. گزینه‌های عملیاتی، سیستم را با احتمال مشخصی از یک حالت به حالت دیگر برده یا در همان حالت نگه می‌دارند. گزینه‌های بهبود شرایط راه‌ها در این مطالعه گزینه‌هایی هستند که اجرای آنها موجب تحول سیستم از حالتی به حالت دیگر می‌شود. در نهایت، تابع درآمدها یکی از مهم‌ترین بخش‌های روند تصمیم‌گیری مارکوف است که مشخص‌کننده هدف مسئله است. هزینه‌هایی که معمولاً در بحث ترمیم و نگهداری راه مطرح می‌شوند، از دو بخش هزینه‌های استفاده‌کنندگان راه و هزینه‌های اجرای گزینه‌های بهبود وضعیت جاده، تشکیل شده‌اند. مقدار هر دوی این هزینه‌ها تابعی از نوع تصمیم است. هزینه‌های مربوط به نگهداری و ترمیم به صورت هزینه‌های ریالی است، اما هزینه‌های استفاده‌کنندگان هم به صورت ریالی (سوخت، روغن، تعمیرات وسیله نقلیه و ...) و هم به صورت‌هایی دیگر چون زمان سفر است. در بسیاری از موارد ضابطه اصلی انتخاب مسیر حرکت توسط استفاده‌کنندگان شبکه، زمان سفر است. از سویی دیگر این هزینه با هزینه‌های دیگر همچون سوخت، روغن، استهلاک وسیله نقلیه و ... رابطه مستقیم دارد. بنابراین، زمان سفر می‌تواند معیار مناسبی برای برآورد هزینه‌های استفاده‌کنندگان راه در انتخاب گزینه‌های نگهداری و ترمیم باشد. فرض می‌شود که:

$M^k(i,j)$ = هزینه اجرای گزینه k وقتی که سیستم در حالت i قرار داشته و با گذر از یک دوره زمانی به حالت j برده می‌شود.

$T(i,j)$ = زمان سفر استفاده کنندگان وقتی که سیستم در حالت i قرار داشته و به حالت j می‌رود.

با فرض این‌که در یک دوره زمانی استفاده‌کنندگان نیمی از زمان را در هر یک از دو حالت به سر می‌برند:

$$T(i,j) = \frac{T(i) + T(j)}{2} \quad (۱)$$

$T(i)$ و $T(j)$ به ترتیب زمان سفر در حالت i و j هستند. حال می‌توان مجموع هزینه‌های استفاده‌کنندگان و گردانندگان سیستم را به صورت زیر تعریف نمود:

$$C^k(i,j) = M^k(i,j) + \gamma\, T(i,j) * x\,, \gamma > 0 \quad (۲)$$

γ ضریبی است که زمان سفر را به ریال تبدیل می‌کند و $C^k(i,j)$ مجموع هزینه های موجود است و x تعداد کاربران را نشان می‌دهد. اکنون فرض نمایید که زمان سفر استفاده‌کنندگان، در بدترین حالت ممکن راه، T_o باشد (حالت "بد"). چون برای رسیدن به چنین حالتی نیازی به هیچ‌گونه سرمایه‌گذاری نیست (یعنی هزینه مربوط به نگهداری و ترمیم صفر است)، بنابراین:

$$C_o = \gamma * T_o * x \quad (۳)$$

با توجه به شرایط یاد شده هزینه استفاده‌کنندگان در این حالت بیشترین مقدار ممکن بوده و، سایر حالت‌های سیستم باید هزینه‌ی کمتری برای استفاده کنندگان ایجاد کنند. با توجه به آنچه که گفته شد، تابع درآمد به صورت زیر تعریف می‌شود، که اساس تصمیم‌گیری برای عملیات نگهداری و ترمیم در انتخاب گزینه مناسب است:

$$R^k(i,j) = C_o - C^k(i,j) = \gamma\big(T_o - T(i,j)\big) * x - M^k(i,j) \quad (۴)$$

$R^k(i,j)$ میزان درآمد ناشی از تغییر حالت از i به j است. هاوارد در سال ۱۹۶۶ روشی برای حل این مسأله ارائه داد که به شرح زیر است (Isaacson and Madsen, 1976) و (Pashenkova, Rish and Dechter, 1996):

گام صفر: ماتریس‌های احتمالی گذر و ماتریس درآمدها برای همه‌ی سیاست ها مشخص هستند. یک سیاست اولیه d اختیار کنید.

گام ۱: تعیین ارزش: ماتریس احتمالی گذر P نظیر سیاست d را تعیین و مقادیر $q(i)$ را بر اساس رابطه (۵) به دست آورید.

$$q^k(i) = \sum_{j=1}^{m} p^k(i,j) * r^k(i,j) \quad (۵)$$

که در آن $q^k(i)$ را می‌توان مقدار قابل انتظار درآمد بدست آمده از حالت i، در یک گذر از زنجیره مارکوف تفسیر کرد. $r^k(i,j)$ پیامد حاصل از انتقال سیستم از حالت i به حالت j در صورت اجرای گزینه k و $p^k(i,j)$ احتمال انتقال سیستم از حالت i به j با اجرای گزینه k است. با در نظر گرفتن $V(m)=0$ و استفاده از رابطه‌ی (٦) مقادیر نسبی مجهولات $(V(i), E)$ را بیابید.

$$E = q(i) + \sum_{j=1}^{m} P(i,j)\,V(j) - V(i) \qquad (٦)$$

که در آن V مقدار قابل انتظار کل درآمد و i و j حالت سیستم را نشان می دهند. E مقدار قابل انتظار درآمد در هرمرحله است.

گام۲: بهبود سیاست

برای هر حالت i، با استفاده از مقادیر نسبی $V(i)$ از سیاست پیشین، گزینه k را چنان بیابید که رابطه زیر بیشینه شود (مقادیر $V(i)$ از گام تعیین ارزش بدست آمده‌اند).

$$q^k(i) + \sum_{j=1}^{m} p^k(i,j)V(j) \qquad (٧)$$

سیاست بدست آمده را d^* بنامید.

گام۳: ضابطه پایان کار

اگر سیاست جدید (d^*) بدست آمده با سیاست پیشین (d) یکی باشد، d^* سیاست بهینه بوده و کار پایان یافته است. در غیر این صورت به گام تعیین ارزش بروید. و این کار را تکرار نمایید تا سیاست بهینه بدست آید.

۳-۱- محاسبه ماتریس احتمالی گذر

همواره راه‌ها با گذر زمان فرسوده شده و تخریب می‌شوند. در ابتدای عمر راه، خرابی‌های اندکی در سطح جاده اتفاق می‌افتد و در نتیجه روسازی در وضعیت "خوب" قرار می‌گیرد. اما با گذشت زمان، و افزایش سن جاده، این خرابی‌ها گسترش یافته و راه وارد وضعیت جدیدی (مثلاً حالت "متوسط") شده؛ عمر حالت قبلی راه پایان یافته؛ و عمر در حالت جدید آغاز شده است. عمر راه در هر حالت (خوب، متوسط و بد) یک متغیر تصادفی است، که مهمترین عوامل تأثیرگذار بر وضعیت آن، حجم ترافیک عبوری از جاده و شرایط آب و هوایی غالب بر جاده هستند. طول عمر در هر حالت، برای سیستم‌هایی همچون جاده معمولاً توزیع نمایی در نظر گرفته می‌شود. تابع چگالی احتمالی برای توزیع نمایی به صورت زیر بیان می‌شود.

$$f_{T_i}(t) = \lambda_i\, e^{-\lambda_i t} \qquad (٨)$$

که در این رابطه T_i عمر جاده در حالت i (خوب، متوسط و بد) است و $\lambda_i > 0$ پارامتر این توزیع است. اکنون، می‌توان احتمال تغییر سیستم از حالتی به حالت دیگر را به صورت زیر یافت. فرض کنید که سیستم دارای سه حالت خوب، متوسط، و بد باشد، ($E=\{1,2,3\}$) که در آن ۱ نشان دهنده حالت خوب، ۲ نشان دهنده حالت متوسط، و ۳ بیانگر حالت بد است. حال فرض می‌شود سیستم در حالت ۱ قرار دارد. برای محاسبه $p(1,1)$ که احتمال ماندن سیستم در حالت ۱ است، می‌توان به صورت زیر عمل نمود.

$$p(1,1) = Pr\{T_1 > 1\} = 1 - Pr\{T_1 \le 1\} = 1 - \int_0^1 \lambda_1\, e^{-\lambda_1 t}\, dt = e^{-\lambda_1} \qquad (٩)$$

و به طور کلی، برای $p(i,i)$:

$$p(i,i) = e^{-\lambda_i} \qquad (١٠)$$

و به همین ترتیب برای سایر اعضای ماتریس احتمالی گذر داریم.

$$p(i,i+1) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_{i+1}} \left(e^{-\lambda_i} - e^{-\lambda_{i+1}}\right) \qquad (١١)$$

$$p(1,3) = 1 - \sum_{j=1}^{3} p(1,j) \qquad (١٢)$$

۳-۲- گسترش مسأله نگهداری و ترمیم از راه به سطح شبکه

با توجه به محاسبه‌ی اعضای ماتریس احتمالی گذر بر اساس حجم ترافیک عبوری و عوامل موثر دیگر امکان یافتن تصمیم (سیاست) بهینه از طریق روش تکرار سیاست هاوارد برای یک جاده منفرد وجود دارد. اما مسأله ما یافتن سیاست بهینه در سطح شبکه است نه یک راه خاص. حجم ترافیک عبوری باعث تخریب راهها در سطح شبکه می‌شود، چنانچه وضعیت راه از یک مقدار آستانه مضمحل‌تر شود آنگاه بخشی از جریان ترافیک به سمت مسیرهای جایگزین منتقل خواهند شد. در نتیجه حجم ترافیک در راه‌های شبکه تغییر یافته و نرخ فرسایش نیز تغییر می‌یابد. به همین دلیل تمام شبکه باید با هم دیده شود و بر این اساس تصمیم ترمیم و نگهداری گرفته شود. بدین منظور ابتدا باید حجم ترافیک عبوری در کل شبکه تعیین شود و سپس بر اساس این حجم ترافیک، نرخ فرسایش و درنتیجه ماتریس احتمال گذر بدست آید.

۳-۲-۱ تعیین جریان تعادلی در شبکه

برآورد جریان ترافیک، از حل یک مسأله تخصیص تقاضای مبدأ- مقصدی به یک شبکه راه بدست می‌آید. این مسأله، یکی از مسائل چهار گانه روش برنامه‌ریزی حمل و نقل (تولید سفر، توزیع سفر، انتخاب وسیله نقلیه، و تخصیص جریان ترافیک) بوده، و برای تحلیل تراکم و سایر خصوصیات کارکردی شبکه راه‌ها مورد نیاز است. اعتقاد بر این است که جریان ترافیک تخصیص داده شده در حالت تعادل استفاده‌کننده (UE) است یعنی زمان سفر در کلیه مسیرهای استفاده شده یک زوج مبدأ – مقصد یکسان است، و زمان سفر این مسیرها از مسیرهای استفاده نشده کمتر است. روشهای مختلفی برای حل این مسأله پیشنهاد شده است (Sheffi, 1985). در این مطالعه از روش جین برای حل این مسأله بهره گرفته می‌شود (Jin, 2007).

۳-۲-۲- دستور حل تخصیص جریان ترافیک در شبکه

گام۱. یک جواب اولیهٔ امکان پذیر برای جریان در مسیرها که محدودیت‌ها را نقض نکند یافته و $\Delta\tau$ تعیین گردد.

گام۲. همه (یا زیرمجموعهٔ موثری از) مجموعه مسیرهای هر زوج مبدا – مقصد تولید و هزینه (زمان) سفر آنها محاسبه شود.

گام۳. توابع J برای هر مبدا – مقصد، (r,s)، و هر مسیر، k، از رابطه (۱۳) محاسبه گردد.

$$J_k^{rs} = f_k^{rs}\sum_j f_j^{rs}\left(c_k^{rs} - c_j^{rs}\right) \qquad (۱۳)$$

که در آن f_k^{rs} حجم جریان در مسیر k از مبدا r به مقصد s و c_k^{rs} زمان سفر در مسیر k از مبدا r به مقصد s و J_k^{rs} انگیزه تغییر مسیر از k به مسیرهای جایگزین از مبدا r به مقصد s می‌باشد. اگر برای هر مبدا – مقصد (r,s) و هر مسیر k، تابع J برابر با صفر شد، به گام (٤) رفته در غیراین‌صورت برای هر مبدأ– مقصد (r,s) و هر مسیر k جریان ترافیک به صورت زیر محاسبه شود:

$$f_k^{rs}(t+1) = f_k^{rs}(t) - \mu J_k^{rs}\left(f_k^{rs}(t)\right) \qquad (١٤)$$

و به گام ۲ برمی‌گردیم.

گام٤. پایان محاسبات.

شایان ذکر است که در تکرارهای دستور جین، جواب‌های اولیه از نظر هزینه بالا هستند، اما با افزایش τ (با نرخ $\Delta\tau$) جریان به سمت هزینه‌های کمتر میل می‌کند. در اینجا $\Delta\tau = \mu$ است و τ ، $\tau + \Delta\tau$ ،... می‌توانند نقش شمارنده را داشته باشند یعنی $\Delta\tau = \mu = 1$.

۳-۳- دستور حل برنامه‌ریزی نگهداری و ترمیم راه‌ها در سطح شبکه

گام ۱: *تعیین جریان تعادلی در شبکه در وضع موجود*. با استفاده از تابع زمان سفر در واحد زمان برای هر کمان از شبکه و دانستن مقدار تقاضا بین مبدا – مقصدهای مختلف، از طریق دستور حل جین، جریان تعادلی استفاده‌کنندگان در کمان‌های شبکه محاسبه می‌شود. در این مطالعه، تابع زمان سفر – حجم کمان i مطابق پیشنهاد اداره راههای عمومی ایالات متحده آمریکا به صورت $t_i = t_i^o(1 + 0/15(x_i/c_i)^4$ است. برای سادگی می‌توان آن را به صورت $t_i = (h_i + k_i x^4)$ نمایش داد. در این رابطه t_i^o زمان سفر در حالت جریان آزاد در کمان i است، که وابسته به طول جاده، سرعت مجاز و طراحی هندسی مسیر می‌باشد. c_i ظرفیت کمان i در واحد زمان است که وابسته به عرض راه و وضعیت خدمت رسانی جاده می‌باشد، و x_i حجم ترافیک در کمان i را نشان می‌دهد.

گام ۲: *تعیین سیاست بهینه*. با توجه به حجم ترافیک هر کمان، که از گام ۱ به دست آمد، مقادیر λ برای هر حالت از یک کمان قابل محاسبه، و ماتریس احتمال گذر هر کمان (P) با استفاده از روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) بدست می‌آیند. سپس با داشتن هزینه‌های مربوط به گزینه‌های نگهداری و ترمیم و همچنین زمان سفرها در هر کمان از شبکه، ماتریس درآمدها محاسبه و در نهایت از طریق دستور حل هاوارد سیاست بهینه نگهداری و ترمیم برای هر کمان حاصل خواهد شد.

گام ۳: محاسبه مقدار قابل انتظار زمان سفر کمان. بردار احتمال حالت‌های جاده در درازمدت (π) متناظر با ماتریس احتمال گذر مربوط به سیاست بهینه به دست آمده از گام ۲ با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردند.

$$\pi^s(j) = \sum_{i \in E} \pi^s(i) p^s(i,j) \quad (۱۵)$$

$$\sum_{i=1}^{m} \pi_i^s = 1 \quad (۱۶)$$

پس از محاسبه بردار احتمال‌های حدی هر کمان، مقادیر قابل انتظار هزینه (زمان سفر) هر کمان از رابطه زیر محاسبه می‌شوند.

$$\bar{t}_a = \bar{h}_a + \bar{k}_a x_i^4 \quad (۱۷)$$

که در آن $\bar{h}_a = \sum_{i=1}^{m} \pi_i(h_{a_i})$ و $\bar{k}_a = \sum_{i=1}^{m} \pi_i(k_{a_i})$ هستند.

گام ٤: ضابطه کنترل زمان سفرها. اگر زمان سفر جدید برای همه‌ی کمان‌ها با زمان سفر قبلی (تقریباً) یکسان بود، پایان. وگرنه بایستی فرآیند را از گام ۱ مجدداً آغاز نمایید.

٤-بیان و تحلیل نتایج

در این قسمت چند مسأله عددی با دستور حل پیشنهادی حل می‌شوند. حل این مسائل، با استفاده از یک برنامه کامپیوتری که به زبان MATLAB نوشته شده، انجام گرفته است.

مسأله ۱. ابتدا یک مسأله ساده مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بتوان دستور حل را بهتر درک کرد. شبکه‌ای را که دارای سه کمان است، در نظر بگیرید. این شبکه دارای تقاضای ترافیکی (مبدا – مقصد) ۱۰۰ است. گزینه‌های موجود جهت نگهداری و ترمیم راه، شامل ۲ گزینه اجرای ترمیم و نگهداری و عدم انجام کار است و برای این راهها سه حالت در نظر گرفته شده است (خوب، متوسط، و بد). برای حل مسأله ابتدا نیاز است که ماتریس احتمالی گذر سیستم به دست آید. جدول (۱) تابع زمان سفر – حجم کمان را برای هر یک از حالت‌های خوب، متوسط و بد جاده، و جدول (۲) هزینهٔ گزینه‌های نگهداری و ترمیم را نشان می‌دهد. حجم ترافیک برای کمان‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۳۰، ٤۰ و ۳۰ به عنوان مقادیر اولیه برای محاسبه جریان تعادلی با روش جین، فرض شده است و هزینهٔ اجرای گزینه ترمیم و نگهداری در هر حالت برای هر کمان به صورت جدول (۲) است.

جدول ۱. توابع زمان سفر- حجم ترافیک برای کمان‌های مختلف در هر حالت مسأله ۱

حالت	کمان ۱	کمان ۲	کمان ۳
۱	$t = 30 + 0/000017x^4$	$t = 35 + 0/00001x^4$	$t = 40 + 0/000065x^4$
۲	$t = 30 + 0/000031\,x^4$	$t = 35 + 0/000016x^4$	$t = 40 + 0/000075\,x^4$
۳	$t = 30 + 0/000046\,x^4$	$t = 35 + 0/00002x^4$	$t = 40 + 0/000085x^4$

جدول ۲. هزینه‌های اجرای گزینه‌های نگهداری و ترمیم در حالت‌های مختلف راه

حالت	۱	۲	۳
هزینه اجرای نگهداری	۱۰	۱۵	۳۰

پس از یافتن جریان تعادلی در شبکه با استفاده از دستورحل جین و حل مسأله نگهداری و ترمیم از طریق دستور پیشنهادی ارایه شده، در تکرارهای متوالی نتایج جدول (۳) برای حجم ترافیک و هزینه‌های (زمان) سفر و دیگر پارامترهای بکار رفته در دستورحل در کمان‌ها حاصل می‌شود. جدول (٤) ماتریس‌های گذر و درآمد کمان‌ها را در تکرارهای مختلف دستور حل پیشنهادی نگهداری و ترمیم نشان می‌دهد. شکل (۱) تغییرات حجم و شکل (۲) زمان سفر در کمان‌های مختلف را در تکرارهای متفاوت دستورحل نشان می‌دهد. همان طور که در شکل‌های (۱) و (۲) مشخص است، با افزایش حجم ترافیک در کمان‌ها هزینه‌ها (زمان سفر) افزایش می‌یابند، مثلاً برای کمان شماره ۳ ابتدا حجم ترافیک افزایش یافته، و به تبع آن هزینه‌ها نیز افزایش می‌یابد، ولی به دلیل افزایش این هزینه‌ها تمایل به حرکت در این مسیر برای استفاده کنندگان کاهش یافته، و در تکرار ۳ حجم ترافیک آن کم شده است. اما این کاهش ترافیک خود سبب کاهش هزینه‌ها می‌شود، و این روند ادامه داشته تا تعادل هزینه و ترافیک در شبکه به وجود آید. این همگرایی در شکل کاملاً مشهود است. شایان ذکر است که در پایان دستورحل مسیرهای سه گانه (۳ کمان) دارای زمان سفر برابر می‌شوند.

جدول ۳. نتایج حاصل از حل مسأله ۱ با دستورحل پیشنهادی

شماره تکرار	کمان l	x_l	t_l *jin's method*	λ_1	λ_2	d^*			π			$\bar{t}_l$
						حالت			حالت			
						۱	۲	۳	۱	۲	۳	
۱	۱	۳٦/۲٥	٦۰/۲٤	۱/۳٦۷	۰/۹۲٤	۱	۲	۲	۰/۲٥٤۸	۰/٤۳۸٥	۰/۳۰٦۷	۸٦/۹۸
	۲	٦۸/۳۹	٦۰/۲٤	۱/٤۷۲	۰/۹۸۸	۱	۲	۲	۰/۲۲۹٥	۰/٤۳٤٦	۰/۳۳٦۰	۷٥/۳
	۳	٦۲/۲۳	٦۰/۲٤	۰/۹٦۳	۰/٦۷٦	۱	۲	۲	۰/۳۸۱٦	۰/٤۲٥۸	۰/۱۹۲٥	٦۲/۷٦
۲	۱	۳٤/۲۷	۷٤/۱۹	۱/۲۹۷	۰/۸۸۰	۱	۲	۲	۰/۲۷۳٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸٦۸	۷۳/٤۲
	۲	۳۹/٥۸	۷٤/۱۹	۱/٤٦۳	۰/۹۸۲	۱	۲	۲	۰/۲۳۱٥	۰/٤۳٥۰	۰/۳۳۳٦	۷٤/۱۳
	۳	۲٦/۱٥	۷٤/۱۹	۱/۰٤۳	۰/۷۲٥	۱	۲	۲	۰/۳٥۲٦	۰/٤۳۲۷	۰/۲۱٤۷	۷٤/٤۳
۳	۱	۳٤/۳۸	۷۳/۹۹	۱/۳۰۱	۰/۸۸۳	۱	۲	۲	۰/۲۷۲٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸۷۹	۷٤/۰٤
	۲	۳۹/٥٥	۷۳/۹۹	۱/٤٦۲	۰/۹۸۲	۱	۲	۲	۰/۲۳۱۷	۰/٤۳٥۰	۰/۳۳۳۳	۷۳/۹۹۳
	۳	۲٦/۰۷	۷۳/۹۹	۱/۰٤۰	۰/۷۲۳	۱	۲	۲	۰/۳٥۳٥	۰/٤۳۲٥	۰/۲۱٤۰	۷۳/۹۹۲
٤	۱	۳٤/۳۸	۷٤	۱/۳۰۳	۰/۸۸۳	۱	۲	۲	۰/۲۷۲٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸۷۹	۷٤
	۲	۳۹/٥٥	۷٤	۱/٤٦۲	۰/۹۸۲	۱	۲	۲	۰/۲۳۱۷	۰/٤۳٥۰	۰/۳۳۳۳	۷٤
	۳	۲٦/۰۷	۷٤	۱/۰٤۰	۰/۷۲۳	۱	۲	۲	۰/۳٥۳٥	۰/٤۳۲٥	۰/۲۱٤۰	۷٤

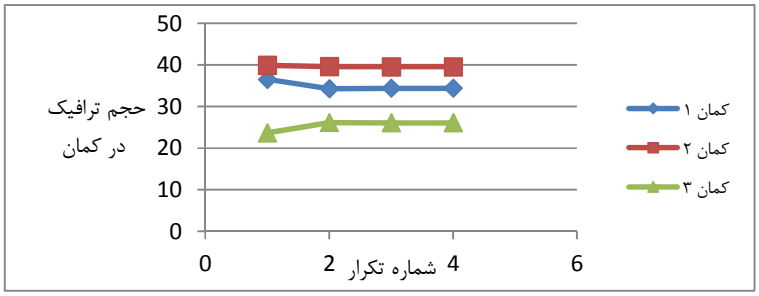
جدول ٤. مقادیر به دست آمده برای ماتریس احتمالی گذر و درآمد برای کمان‌ها

کمان				۱				۲				۳			
شماره تکرار (n)	حالت (i)	گزینه ترمیم (k)	احتمال گذر(p) و درآمد(R)	حالت(j)				حالت(j)				حالت(j)			
				۱	۲	۳		۱	۲	۳		۱	۲	۳	
۱	۱	۱	$P^1(1,j)$	۰/۲۵٤۸	۰/٤۳۸۵	۰/۳۰٦۷		۰/۲۲۹۵	۰/٤۳٤٦	۰/۳۳٦		۰/۳۸۱٦	۰/٤۲۵۸	۰/۱۹۲۵	
			$R^1(1,j)$	۱۸۸۳/۸	۱٤۲۹/۱	۹٤۱/۹		۱۰۰٦	۷۰٤/۲	۵۰۳		۱٤۷/۱	۱۱۰/۳	۷۳/٦	
		۲	$P^2(1,j)$	۰/۲۵٤۸	۰/٤۳۸۵	۰/۳۰٦۷		۰/۲۲۹۵	۰/٤۳٤٦	۰/۳۳٦		۰/۳۸۱٦	۰/٤۲۵۸	۰/۱۹۲۵	
			$R^2(1,j)$	۱۸۷۳/۸	۱٤۱۹/۱	۹۳۱/۹		۹۹۵/۹۷	٦۹٤/۱۸	٤۹۲/۹۸		۱۳۷/۱	۱۰۰/۳	٦۳/٦	
	۲	۱	$P^1(2,j)$	۰	۰/۳۹۷۱	۰/٦۰۲۹		۰	۰/۳۷۲۵	۰/٦۲۷۵		۰	۰/۵۰۸٦	۰/٤۹۱٤	
			$R^1(2,j)$	۰	۹۷٤/٤	٤۸۷/۲		۰	٤۰۲/٤	۲۰۱/۲		۰	۷۳/٦	۳٦/۸	
		۲	$P^2(2,j)$	۰/۲۵٤۸	۰/٤۳۸۵	۰/۳۰٦۷		۰/۲۲۹۵	۰/٤۳٤٦	۰/۳۳٦		۰/۳۷۱٦	۰/٤۲۵۸	۰/۱۹۲۵	
			$R^2(2,j)$	۱۸٦۸/۸	۱٤۱٤/۱	۹۲٦/۹		۹۹۰/۹۷	٦۸۹/۱۸	٤۸۷/۹۷		۱۳۲/۱	۹۵/۳	۵۸/٦	
	۳	۱	$P^3(1,j)$	۰	۰	۱		۰	۰	۱		۰	۰	۱	
			$R^3(1,j)$	۰	۰	۰		۰	۰	۰		۰	۰	۰	
		۲	$P^3(1,j)$	۰/۲۵٤۸	۰/٤۳۸۵	۰/۳۰٦۷		۰/۲۲۹۵	۰/٤۳٤٦	۰/۳۳٦		۰/۳۸۱٦	۰/٤۲۵۸	۰/۱۹۲۵	
			$R^3(1,j)$	۱۸۵۳/۸	۱۳۹۹/۱	۹۱۱/۹		۹۷۵/۹٦	٦۷٤/۱۸	٤۷۲/۹۸		۱۱۷/۱	۸۰/۳	٤۳/٦	
۲	۱	۱	$P^1(1,j)$	۰/۲۷۳٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸٦۸		۰/۲۳۱۵	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳٦		۰/۳۵۲٦	۰/٤۳۲۷	۰/۲۱٤۷	
			$R^1(1,j)$	۱۳۷۰/۸	۱۰۳۹/۹	٦۸۵/٤		۹۷۱/۳	٦۷۹/۹	٤۸۵/٦		۲٤٤/۵	۱۸۳/٤	۱۲۲/۳	
		۲	$P^2(1,j)$	۰/۲۷۳٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸٦۸		۰/۲۳۱۵	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳٦		۰/۳۵۲٦	۰/٤۳۲۷	۰/۲۱٤۷	
			$R^2(1,j)$	۱۳٦۰/۸	۱۰۲۹/۹	٦۷۵/٤		۹٦۱/۳	٦٦۹/۹	٤۷۵/٦		۲۳٤/۵	۱۷۳/٤	۱۱۲/۲	
	۲	۱	$P^1(2,j)$	۰	۰/٤۱٤٦	۰/۵۸۵٤		۰	۰/۳۷٤۵	۰/٦۲۵۵		۰	۰/٤۸٤۵	۰/۵۱۵۵	
			$R^1(2,j)$	۰	۷۰۹	۳۵٤/۵		۰	۳۸۸/۵	۱۹٤/۲		۰	۱۲۲/۳	٦۱/۱	
		۲	$P^2(2,j)$	۰/۲۷۳٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸٦۷		۰/۲۳۱۵	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳٦		۰/۳۵۲٦	۰/٤۳۲۷	۰/۲۱٤۷	
			$R^2(2,j)$	۱۳۵۵/۸	۱۰۲٤/۹	٦۷۰/٤		۹۵٦/۳	٦٦٤/۹	٤۷۰		۲۲۹/۵	۱٦۸/٤	۱۰۷/۲	
	۳	۱	$P^1(3,j)$	۰	۰	۱		۰	۰	۱		۰	۰	۱	
			$R^1(3,j)$	۰	۰	۰		۰	۰	۰		۰	۰	۰	
		۲	$P^2(3,j)$	۰/۲۷۳٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸٦۸		۰/۲۳۱۵	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳٦		۰/۳۵۲٦	۰/٤۳۲۷	۰/۲۱٤۷	
			$R^2(3,j)$	۱۳٤۰/۸	۱۰۰۹/۹	٦۵۵/٤		٦۵۵/٤	٦٤۹/۹	٤۵۵/٦		۲۱٤/۵	۱۵۳/٤	۹۲/۲	

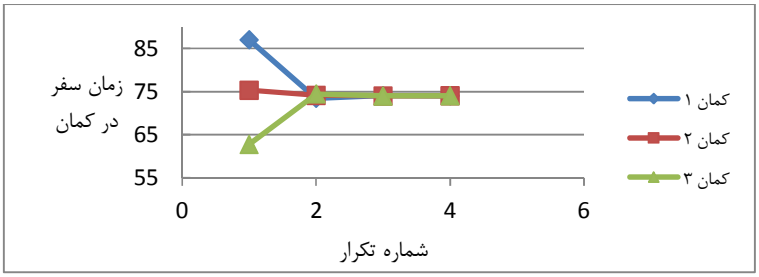
جدول ۵. مقادیر به دست آمده برای ماتریس احتمالی گذر و درآمد برای کمان‌ها

کمان				۱				۲				۳			
شماره تکرار (n)	حالت (i)	گزینه ترمیم (k)	احتمال گذر(p) و درآمد(R)	حالت(j)				حالت(j)				حالت(j)			
				۱	۲	۳		۱	۲	۳		۱	۲	۳	
۱	۱	۱	$P^1(1,j)$	۰/۲۷۲٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸۷۹		۰/۲۳۱۷	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳۳		۰/۳۵۳۵	۰/٤۳۲۵	۰/۲۱٤	
			$R^1(1,j)$	۱۳۹۳/۹	۱۰۵۷/۵	٦۹۷		۹٦۷/۲	٦۷۷/۱	٤۸۳/٦		۲٤۰/۸	۱۸۰/٦	۱۲۰/٤	
		۲	$P^2(1,j)$	۰/۲۷۲٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸۷۹		۰/۲۳۱۷	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳۳		۰/۳۵۳۵	۰/٤۳۲۵	۰/۲۱٤	
			$R^2(1,j)$	۱۳۸۳/۹	۱۰٤۷/۵	٦۸۷		۹۵۷/۲	٦٦۷/۱	٤۷۳/٦		۲۳۰/۸	۱۷۰/٦	۱۱۰/٤	
۲	۱	۱	$P^1(2,j)$	۰	۰/٤۱۳۷	۰/۵۸٦۳		۰	۰/۳٤٤۷	۰/٦۲۵۳		۰	۰/٤۸۵۲	۰/۵۱٤۸	

		$R^1(2,j)$	۰	۷۲۱	۳۶۰/۵	۰	۳۸۶/۹	۱۹۳/٤	۰	۱۲۰/٤	٦۰/۲
	۲	$P^2(2,j)$	۰/۲۷۲٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸۷۹	۰/۲۳۱۷	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳۳	۰/۳۵۳۵	۰/٤۳۲۵	۰/۲۱٤
		$R^2(2,j)$	۱۳۷۸/۹	۱۰٤۲/۵	٦۸۲	۹۵۲/۲	٦٦۲/۱	٤٦۸/٦	۲۲۵/۸	۱۵٦/٦	۱۰۵/٤
	۱	$P^3(1,j)$	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱
	۳	$R^3(1,j)$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲	$P^3(1,j)$	۰/۲۷۲٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸۷۹	۰/۲۳۱۷	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳۳	۰/۳۵۳۵	۰/٤۳۲۵	۰/۲۱٤
		$R^3(1,j)$	۱۳٦۳/۹	۱۰۲۷/۵	٦٦۷	۹۳۷/۲	٦٤۷/۱	٤۵۳/٦	۲۱۰/۸	۱۵۰/٦	۹۰/٤
۲	۱	$P^1(1,j)$	۰/۲۷۲٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸۷۸	۰/۲۳۱۷	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳۳	۰/۳۵۳٤	۰/٤۳۲۵	۰/۲۱٤۱
	۱	$R^1(1,j)$	۱۳۹۲/٦	۱۰۵٦/۵	٦۹٦/۳	۹٦۷/۷	٦۷۷/۳	٤۸۳/۸	۲٤۰/۹	۱۸۰/۷	۱۲۰/۵
	۲	$P^2(1,j)$	۰/۲۷۲٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸۷۸	۰/۲۳۱۷	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳۳	۰/۳۵۳٤	۰/٤۳۲۵	۰/۲۱٤۱
		$R^2(1,j)$	۱۳۸۲/٦	۱۰٤٦/٦	٦۸٦/۳	۹۵۷/٦	٦٦۷/۳	٤۷۳/۸	۲۳۰/۹	۱۷۰/۷	۱۱۰/۵
	۱	$P^1(2,j)$	۰	۰/٤۱۳۸	۰/۵۸٦۲	۰	۰/۳۷٤۷	۰/٦۲۵۳	۰	۰/٤۸۵۲	۰/۵۱٤۸
	۲	$R^1(2,j)$	۰	۷۲۰/۳	۳٦۰/۲	۰	۳۸۷/۱	۱۹۳/۵	۰	۱۲۰/۵	٦۰/۲
	۲	$P^2(2,j)$	۰/۲۷۲٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸۷۸	۰/۲۳۱۷	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳۳	۰/۳۵۳٤	۰/٤۳۲۵	۰/۲۱٤۱
		$R^2(2,j)$	۱۳۷۷/٦	۱۰٤۱/۵	٦۸۱/۳	۹۵۲/۷	٦٦۲/۳	٤٦۸/۸	۲۲۵/۹	۱٦۵/۷	۱۰۵/۵
	۱	$P^1(3,j)$	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱
	۳	$R^1(3,j)$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲	$P^2(3,j)$	۰/۲۷۲٤	۰/٤۳۹۸	۰/۲۸۷۸	۰/۲۳۱۷	۰/٤۳۵	۰/۳۳۳۳	۰/۳۵۳٤	۰/٤۳۲۵	۰/۲۱٤۱
		$R^2(3,j)$	۱۳٦۲/٦	۱۰۲٦/۵	٦٦٦/۳	۹۳۷/٦	٦٤۷/۳	٤۵۳/۸	۲۱۰/۹	۱۵۰/۷	۹۰/۵

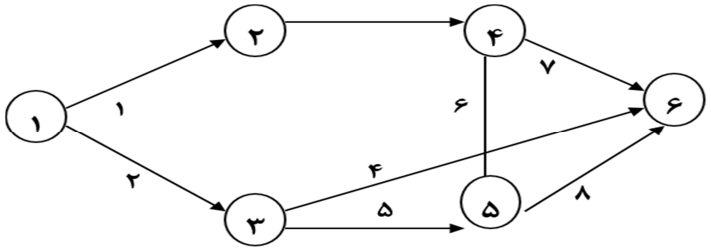


شکل ۱. حجم ترافیک در تکرارهای دستورحل پیشنهادی در مسأله ۱



شکل ۲. زمان سفر در تکرارهای دستور حل پیشنهادی در مسأله ۱

مسأله ۲: شبکه شکل (۳) را در نظر بگیرید. ویژگی‌های کمان‌های این شبکه، در جدول‌های (٦) و (۷) آمده است. تقاضای ترافیک از مبدأ ۱ به مقصد ٦ برابر ۳۵ است، و کلاً ۵ گزینه برای اجرای نگهداری وجود دارد، که هر کدام از این گزینه‌ها بسته به نوع جاده و حالت آن قابلیت اجرا دارند. کمان‌های ۱ و ٤ بزرگراه، کمان ٦ جاده فرعی و بقیه کمان‌ها جاده‌های اصلی هستند.



شکل ۳. شبکه مربوط به مسأله ۲

در این شبکه برای رفتن از مبدأ ۱ به مقصد ٦ هشت کمان وجود دارد، که این ۸ کمان ٤ مسیر را ایجاد نموده‌اند که در آن، مسیر۱ (٦-٤-۲-۱)، مسیر ۲ (٦-٥-٤-۲-۱)، مسیر ۳ (٦-٥-۳-۱) و مسیر ٤ (٦-۳-۱) هستند. پس از یکبار اجرای دستور حل تخصیص ترافیک مشاهده می‌شود که مسیر ۲ غیرمؤثر بوده و جریان در آن صفر است. از اینرو این مسیر در محاسبات بعدی اثری ندارد. نتایج حل این مسأله بر اساس دستورحل پیشنهادی در تکرارهای متوالی در جدول (۸) آمده است.

جدول ٦. گزینه‌ها و هزینه‌های مربوطه برای اجراء

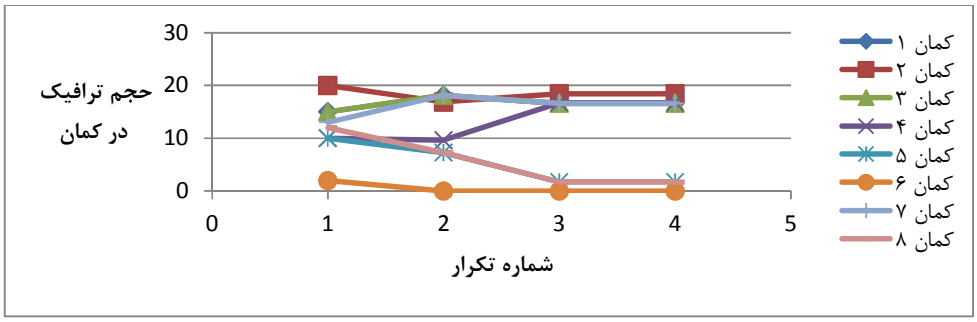
نوع جاده	گزینه ترمیم	هزینه اجراء
فرعی	عدم انجام کار	۰
	لکه گیری	٥
اصلی	ترمیم موضعی	۷
	ترمیم کلی	۱۰
	بازسازی	۱۲
بزرگراه	ترمیم کلی	۱۰
	بازسازی	۱۲

جدول ۷. توابع زمان سفر کمان های شبکه مسأله ۲

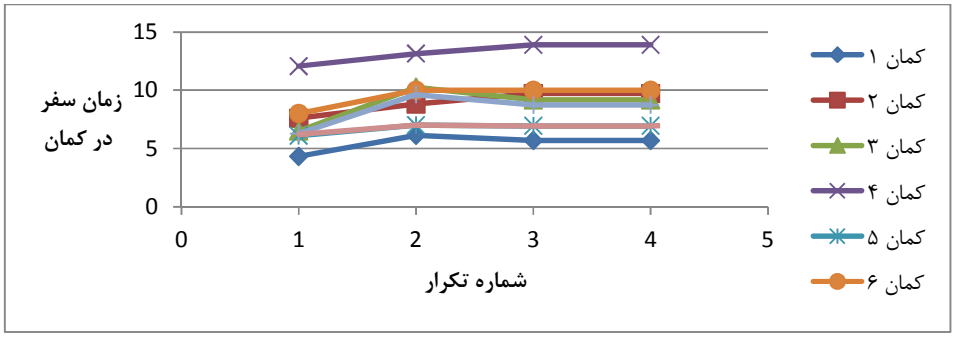
شماره کمان	تابع زمان سفر			
	حالت	۱	۲	۳
۱		$4+ 0/0000065\ x^4$	$5+ 0/00001\ x^4$	$6+ 0/000046\ x^4$
۲		$6+ 0/00001\ x^4$	$7+ 0/000036\ x^4$	$8+ 0/00006\ x^4$
۳		$6+ 0/00001x^4$	$7+0/00004\ x^4$	$8+ 0/00009\ x^4$
٤		$12+0/000065\ x^4$	$14+ 0/00001\ x^4$	$16+ 0/000046\ x^4$
٥		$6 +0/00001\ x^4$	$8+ 0/000036\ x^4$	$10+ 0/00006\ x^4$
٦		$8+ 0/000017\ x^4$	$9 + 0/000036\ x^4$	$10 + 0/00046\ x^4$
۷		$6+ 0/00001\ x^4$	$7+ 0/000036\ x^4$	$8+ 0/00006\ x^4$
۸		$6 +0/00001\ x$	$8+ 0/000036\ x^4$	$10+ 0/00006\ x^4$

جدول ۸. نتایج مربوط به حل مسأله ۲

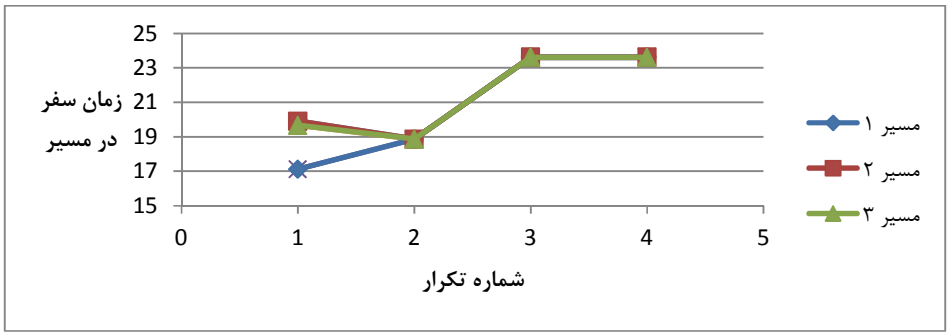
شماره تکرار	شماره کمان	حجم ترافیک	زمان سفر تعادلی مسیرها	سیاست بهینه تعمیر و نگهداری				متوسط زمان سفر
				حالت	۱	۲	۳	
۱	۱	۱۸/۱۳	۱۸/۸۶		۱	٤	٤	٦/۱۳
	۲	۱٦/۸۷			۱	۳	٤	۸/۸۲
	۳	۱۸/۱۳			۱	۳	٤	۱۰/۲۵
	٤	۹/٦۱			۱	٤	٤	۱۳/۱٤
	۵	۷/۲٦			۱	۳	٤	۷/۰۱
	٦	۰/۰			۱	۱	۱	۱۰/۰۰
	۷	۱۸/۱۳			۱	۳	٤	۹/٦۲
	۸	۷/۲٦			۱	۳	٤	۷/۰۱
۲	۱	۱٦/۵۹	۲۳/٦۲		۱	٤	٤	۵/۷۰
	۲	۱۸/٤۱			۱	۳	٤	۹/۷۲
	۳	۱٦/۵۹			۱	۳	٤	۹/۱۸
	٤	۱٦/۷۰			۱	٤	٤	۱۳/۹۰
	۵	۱/۷۰			۱	۳	٤	٦/۹۵
	٦	۰/۰			۱	۱	۱	۱۰/۰۰
	۷	۱٦/۵۹			۱	۳	٤	۸/۷٤
	۸	۱/۷۰			۱	۳	٤	٦/۹۵
۳	۱	۱٦/۵۹	۲۳/٦۲		۱	٤	٤	۵/۷۰
	۲	۱۸/٤۱			۱	۳	٤	۹/۷۲
	۳	۱٦/۵۹			۱	۳	٤	۹/۱۸
	٤	۱٦/۷۰			۱	٤	٤	۱۳/۹۰
	۵	۱/۷۰			۱	۳	٤	٦/۹۵
	٦	۰/۰			۱	۱	۱	۱۰/۰۰
	۷	۱٦/۵۹			۱	۳	٤	۸/۷٤
	۸	۱/۷			۱	۳	٤	٦/۹۵



شکل ٤. حجم ترافیک در تکرارهای دستور حل پیشنهادی در مسأله ۲



شکل ٥. زمان سفر در تکرارهای دستور حل پیشنهادی در مسأله ۲



شکل ٦. زمان سفر در مسیرهای شبکه در تکرارهای دستور حل پیشنهادی در مسأله ۲

۵-نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تصمیم‌گیری و انتخاب گزینه نگهداری و ترمیم، میزان خرابی راه می‌باشد. حجم ترافیک عبوری و عوامل تصادفی (مثل شرایط آب و هوایی) موثرترین عوامل در افزایش نرخ این خرابی‌ها هستند. با استفاده از حجم ترافیک و دیگر عوامل تصادفی، ماتریس احتمالی گذر، که اساس روند مارکوف است، به دست می‌آید، و از طریق این ماتریس است که وضعیت آینده روسازی مشخص می‌شود. پس از برآورد ماتریس احتمالی گذر، با توجه به هزینه گزینه‌های نگهداری و ترمیم راه‌ها و هزینه‌های ایجاد شده برای کاربران، که در این پژوهش به صورت زمان سفر در نظر گرفته شد، ماتریس درآمدها تعیین و با استفاده از دستور حل هاوارد بهترین تصمیم برای یک جاده منفرد گرفته می‌شود. هدف ما یافتن برنامه‌ای بهینه در سطح شبکه است نه در یک جاده منفرد. برای گسترش مسأله از جاده به سطح شبکه از یک مدل دگرگونی در تخصیص جریان ترافیک استفاده شد که با یافتن ترافیک تعادلی، زمان سفر تعادلی کمان‌های شبکه را نیز می‌یابد. در نهایت بهترین تصمیم بر اساس مقدار قابل انتظار درآمد در یک دوره درازمدت در سطح شبکه، برای گزینه‌های مختلف نگهداری و ترمیم مشخص شد. شایان یاد است که انتخاب هر سیاست، هزینه‌ای (برای کاربران و گردانندگان)

را به شبکه تحمیل می‌کند. این هزینه‌ها مبنای تصمیم‌گیری برای انتخاب مسیر در یک شبکه مبدأ – مقصدی است. یعنی تغییر سیاست سبب تغییر هزینه و تغییر هزینه سبب تغییر مسیر کاربران و این تغییر مسیر سبب دگرگون شدن وضعیت جاده‌ها در شبکه و تغییر رفتار تخریب شبکه می‌شود. از این‌رو مطالعه انجام شده نتایج زیر را در برداشت:

–روش پیشنهادی در حل مسأله نگهداری راه‌ها روشی موثر با نتایجی مفید است که با استفاده از آن و دانستن مقدار بودجه می‌توان بیشترین منافع را برای گردانندگان شبکه و کاربران به دست آورد.

–سرعت رسیدن به جواب بهینه توسط روش حل پیشنهادی برای شبکه‌های کوچک و متوسط بالا است.

–در روش پیشنهادی برای حل مسأله برنامه‌ریزی نگهداری علاوه بر در نظر گرفتن هزینه‌های کاربر و عملیات نگهداری، اثرات این تصمیم‌ها بر هزینه‌های دراز مدت سیستم نیز لحاظ شده است که سبب می‌شود تصمیم‌ها در شرایط واقعی‌ترگرفته شود.

–روش پیشنهادی روشی نسبتاً ساده است و در شرایطی که از گذشته روسازی اطلاعی در دست نیست، مفید خواهد بود.

٦–مراجع

-Amin, S. R., and Amador-Jiménez, L. E., (2017), “Back propagation Neural Network to estimate pavement performance: dealing with measurement errors”, Road Materials and Pavement Design, Vol.18, No.5, pp.1218-1238.

-Avijit, M. and Manoj K. J., (2007), “Modeling Highway Infrastructure Maintenance Schedule with Budget Constraint”, Transportation Research Board, pp. 19-26.

-Chen, C. and Flintsch, G.W., (2007), “Fuzzy Logic Pavement Maintenance and Rehabilitation Triggering Approach for Probabilistic Life-Cycle Cost Analysis”, Transportation Research Record, No. 1990, pp. 80-91.

-Feighan, K.J., Shahin, M.Y., Sinha, K.C., and White T.D., (1988), “Application of Dynamic Programming and Other Mathematical Techniques to Pavement Management Systems”, Transportation Research Record, No. 1200, pp. 90-98.

-Gopal S. and Majidzadeh, K., (1991), “Application of Markov Decision Process to Level-of-Service Based Maintenance Systems”, Transportation Research Board, pp. 12–17.

-Haas, R.C., Hudson, W.R and Zaniewski J.P., (1994), “Modern Pavement Management”, Florida, Krieger Publishing Company.

-Hassan, R., Lin, O., and Thananjeyan, A., (2017), “Probabilistic modeling of flexible pavement distresses for network management”, International Journal of Pavement Engineering, Vol.18, No.3, pp.216-227.

-Isaacson, D. L. and Madsen, R.W. (1976), “Markov Chains: Theory and Applications”, New York Wiley.

-Jacob, T. J., (1992), “Optimal Long Term Scheduling of Bridge Deck Replacement & Rehabilitation”, Journal of Transportation, No.118 (2), pp. 312-322.

-Jin W. L., (2007), “A Dynamical System Model of the Traffic Assignment Problem”, Transportation Research Part B, No.41 (1), pp.32-48.

-Marcelino, P., Lurdes Antunes, M. D., and Fortunato, E., (2018), “Comprehensive performance indicators for road pavement condition assessment”, Structure and Infrastructure Engineering, Vol.14, No.11, pp.1-13.

-Nunoo, C., (2001), “Optimization of Pavement Preservation Programming Using Shuffled Complex Evolution Algorithm”, PHD dissertation, Florida International University.

-Pashenkova, E., Rish, I., and Dechter, R., (1996), “Value Iteration and Policy Iteration Algorithms For Markov Decision Problems”, Working notes for the "AAAI-96" Workshop on Structural Issues in Planning and Temporal Reasoning, Portland, Oregon.

-Plati, C., Georgiou, P., and Papavasiliou, V., (2016), “Simulating pavement structural condition using artificial neural networks”, Structure and Infrastructure Engineering, Vol.12, No.9, pp.1127-1136.

-Presenting a heuristic method to solve the problems relating to road maintenance and rehabilitation.

-Santos, J., Ferreira, A., and Flintsch, G., (2017), “An adaptive hybrid genetic algorithm for pavement management”, International Journal of Pavement Engineering, pp.1-21.

-Sheffi, Y., (1985), “Urban Transportation Network: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods”, Englewood Cliffs, New Jersey Prentice-Hall, Inc.

Presenting a Heuristic Method to Solve the Problems Relating To Road Maintenance and Rehabilitation

Vahid Khalifeh, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University, Sirjan, Iran.
Navid Nadimi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
Amirhossein Mirhosseini Zare, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

E-mail: vahid.khalifeh@sirjantech.ac.ir

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT
Roads are one of the most important assets in each country. Road network are too extensive and the budget needed for reconstruction is too high. To maintain these properties planning for the maintenance and rehabilitation is an important issue. Aging, traffic (especially trucks) and weather condition in the region cause numerous tensions in the pavement. These tensions are the main reason of distress, reducing ride quality and finally deterioration in the pavement. Because of the increasing rates of the costs associated with maintenance and repair there is a concern about keeping roads in good condition with the lowest costs. The main purpose of this research is to apply an evolutionary model to minimize the costs of maintenance and repair operation and at the same time maximizing the benefits of the system for a long time with acceptable service quality. The models are assessed on the hypothetical networks and the results have been satisfactory.

Keywords: Pavement, Repair, Maintenance, Evolutionary model, Markov