# مدل تخصیص بودجه سه‌هدفه نگهداری روسازی راه با استفاده از روش ترکیبی بهینه‌سازی پارامتریک و توابع حددار

**مقاله پژوهشی**

محسن بابایی، استادیار،گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.babaei@basu.ac.ir

دریافت: ٩٨/٠٤/٢٧- پذیرش: ٩٨/٠٩/٢٠

صفحه١٤٦-١٢٩

**چکیده**

*یکی از مسائل مهم در مدیریت روسازی راه، مسأله تخصیص بودجه در قسمت‌های مختلف شبکه به منظور نگهداری و اصلاح وضعیت روسازی است. در این مقاله، مدلی سه‌هدفه برای این منظور ارایه شده است، که تابع هدف‌های آن عبارتند از: ۱) کمینه کردن درصد قسمت‌هایی از شبکه که در حالت بحرانی و بدتر از بحرانی (غیر از بدترین حالت) قرار دارند، و می‌بایست برای آن‌ها اقدامات بهسازی انجام داد تا به وضعیت مطلوب برسند؛ ۲) کمینه کردن درصد قسمت‌هایی از شبکه که در بدترین حالت قرار دارند، و برای رساندن آن به وضعیت مطلوب باید اقدامات نوسازی انجام داد؛ و ۳) کمینه کردن مجموع هزینه انجام شده به خاطر اصلاحات صورت‌گرفته در کل دوره برنامه‌ریزی. برای حل مدل سه‌هدفه پیشنهادشده روشی ترکیبی با استفاده از روشه‌های چندهدفه بهینه‌سازی پارامتریک و توابع حددار ارایه شده است. نتایج بکارگیری مدل نشان می‌دهد که علیرغم تصور ذهنی در نگاه اول، اهداف اول و دوم تحت شرایطی دارای تضاد هستند و افزایش یکی ممکن است باعث کاهش دیگری شود، و بنابراین این دو هدف را نمی‌توان در غالب یک هدف واحد در نظر گرفت. یکی از خصوصیات مهم روش ارایه‌شده این است که پیش‌بینی وضعیت روسازی از روش زنجیره مارکوف در مدل بهینه‌سازی گنجانده شده است و این موضوع باعث می‌شود که از پیش‌بینی و تخصیص سرمایه به صورت جداگانه و در نتیجه رسیدن به حل‌های بهینه محلی پرهیز شود.*

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی چندهدفه، تخصیص بودجه، تعمیر و نگهداری روسازی راه، زنجیره مارکوف

## ۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم در مدیریت و نگهداری روسازی راه، تعیین نحوه تخصیص بودجه در سطح شبکه است. این امر باید به گونه‌ای صورت پذیرد که عملکرد روسازی در سطح شبکه با کمترین هزینه ممکن در یک افق زمانی مشخص در بهترین وضعیت ممکن قرار بگیرد. برای تحقق بخشیدن به این امر، دو نوع ابزار مورد نیاز است: ۱- ابزاری برای پیش بینی وضعیت روسازی در طی دوره تحلیل، و ۲- ابزاری برای تخصیص بهینه منابع (بودجه). این تحقیق به دنبال آن است که هر دو مورد مذکور را در غالب یک مدل برنامه ریزی غیرخطی به طور همزمان تحلیل کرده تا نتایج آن به یک مقدار بهینه کلی نزدیک شود. در قسمت پیش‌بینی، از رویکرد زنجیره مارکوف و در قسمت تخصیص بهینه بودجه از مدلسازی سه‌هدفه استفاده شده است. برای حل مسأله سه هدفه تخصیص بودجه، روش ترکیبی توابع حددار و روش پارامتریک چندهدفه تلفیق و به‌کارگیری شده‌اند. از نوآوری های این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مدلسازی همزمان پیش‌بینی وضعیت روسازی و بهینه‌سازی تخصیص بودجه، تأمین اهداف کمینه کردن بودجه و بیشینه کردن درصد قابل توجه شبکه در سطح مطلوب به لحاظ کیفیت روسازی، تلفیق دو روش برنامه‌ریزی چندهدفه. لازم به ذکر است که اغلب مدل‌هایی که تاکنون در ارتباط با استفاده از تئوری مارکوف در مدیریت نگهداری روسازی راه ارایه شده‌اند سعی بر آن داشته‌اند که در مراحلی به پیش‌بینی خرابی‌های روسازی دست یابند و سپس در مراحلی جداگانه و به صورت پی‌درپی و بازگشتی به بهینه‌سازی تخصیص سرمایه در راستای بهبود وضعیت روسازی بپردازند؛ تا به این صورت هم تعمیر و نگهداری بهینه شود و هم خرابی‌ها پیش‌بینی گردد، اما باید توجه داشت که پیش‌بینی‌ها و تخصیص سرمایه‌ها در بخش‌های مختلف تعمیر و نگهداری در هر مرحله می‌تواند در بهینه بودن یا نبودن وضعیت

روسازی در مراحل (سال‌های) آتی تاثیرگذار باشد. از این رو تمرکز اصلی در این پژوهش ارئه مدلی است که علاوه بر پیش‌بینی وضعیت روسازی راه، میزان سرمایه‌گذاری بهینه در مراحل (سال‌های) دوره بلندمدت بهره‌برداری در بخش‌های نگهداری و نوسازی را نیز به طور همزمان تعیین نماید.

## ۲-پیشینه تحقیق

در این بخش، مرور ادبیات در سه زیربخش مجزا، پیش‌بینی وضعیت روسازی، بهینه‌سازی همراه با پیش‌بینی مارکوفی و بهینه‌سازی (و بهینه‌سازی چندهدفه) برای نگهداری و بهبود وضعیت روسازی راه ارایه می‌شود. اساساً، دو نوع مدل پیش بینی در سیستم‌های مدیریت روسازی استفاده می‌شود: مدل‌های قطعی و مدل‌های احتمالی( Li, Haas, and Xie, 1997). مدل‌های قطعی را می‌توان به مدل‌های صرفاً مکانیستیک، مدل‌های مکانیستیک-تجربی و مدل‌های رگرسیون طبقه بندی کرد. برای توضیحات بیشتر در باره این دسته از رویکردهای پیش‌بینی وضعیت روسازی راه، خواننده علاقه‌مند می‌تواند به ( Haas, Hudson and Zaniewski, 1994) و (Shahin, 1994) مراجعه کند. در ادامه، به مدل‌های احتمالی که اغلب بر مبنای زنجیره مارکوف هستند و به موضوع پژوهش حاضر نزدیک‌تر هستند، پرداخته می‌شود. زنجیره مارکوف، یک فرآیند تصادفی معروف است که براساس خواص پیش‌بینی کننده آن، در برآورد عملکرد بلندمدت زیرساخت‌ها و مخصوصاً در برآورد عملکرد روسازی راه در مورد استفاده قرار گرفته است (Haas, Hudson and Zaniewski, 1994). همچنین، این مدل توانایی شرایط احتمالی آب و هوایی و تغییرپذیری حجم تردد را به عنوان مزیتی بر سایر مدل‌ها دارد (Saha, Ksaibati, and Atadero, 2017). به طور کلی، از دو شیوه مختلف زنجیره مارکوف در مدیریت روسازی استفاده شده است: زنجیره مارکوف همگن یا مستقل از زمان (مانند Karan, 1977 و Tack, and Chou, 2001 و Nasseri et al., 2009 و Wang, Zaniewski, and Way, 1994 و Saha, Ksaibati, and Atadero, 2017) زنجیره مارکوف غیرهمگن یا وابسته به زمان (مانند Li, Xie, and Haas, 1996 و Li, Haas, and Xie, 1997). اولین بار، کاران ( Karan, 1977) فرآیند مارکوف را برای تعمیر و نگهداری روسازی شبکه راه‌های منطقه اونتاریو را مورد بررسی قرار داد. وی در مطالعه خود، زوال عملکرد روسازی را در مقایسه با سن، به عنوان یک فرآیند مارکوف همگن با ماتریس احتمال انتقال (TPM) ثابت در طول دوره برنامه‌ریزی مد نظر قرار داد. (Wang, Zaniewski, and Way, 1994) زنجیره مارکوف همگن را برای اداره حمل‌ونقل آریزونا با استفاده از حجم زیادی از داده‌های تاریخچه عملکرد مشاهده‌شده برای راه‌های طبقه‌بندی‌شده با چند حالت مختلف وضعیت اولیه توسعه دادند. (Li, Haas, and Xie, 1997) مدل تحلیل هزینه روسازی اونتاریو (OPAC)[1] -که یک مدل قطعی برای طراحی روسازی انعطاف پذیر در اوایل دهه ۱۹۷۰ به حساب می‌آمد- را اصلاح کردند. آنها از ماتریس انتقال غیرهمگن برای پیش‌بینی وضعیت عملکرد روسازی در مراحل یک ساله و همچنین تکنیک بیزی برای بهبود نتایج پیش بینی استفاده کردند. (Costello et al., 2005) مدلی تصادفی برای ارزیابی استراتژیک نگهداری راه‌ها ایجاد کردند. هدف آنها این بود که یک برنامه‌ریزی استراتژیک درازمدت برای ارزیابی بودجه مورد نیاز برای نگهداری راه‌ها و پیش‌بینی وضعیت خرابی روسازی در شرایط مختلف سرمایه‌گذاری به دست آید. در مطالعه آنها، به منظور هماهنگی بیشتر با شرایط مختلف شبکه، بخش‌هایی از شبکه که ویژگی‌های مشابهی از قبیل آب و هوا، نوع آسفالت و شرایط ترافیکی دارند، به عنوان «زیرشبکه‌های همگن» تعریف شدند. (Nasseri et al., 2009) زنجیره مارکوف را برای اندازه‌گیری تاثیر بارگذاری ترافیک بیش از حد و تأخیر در تعمیر و نگهداری برای انواع مختلف آسفالت به کار گرفتند. (Tabatabaee and Ziyadi, 2013) از تئوری بیز[2] برای قدرت دادن به نحوه پیش‌بینی‌های زنجیره مارکوف از وضعیت روسازی ارایه کردند. ( Khan et al., 2017) مدل‌های مختلفی از جمله زنجیره مارکوف ناهمگن را برای پیش‌بینی خرابی راه تحت اثر شرایط خاص سیل به کار گرفتند. آنها در مطالعات خود مسأله سرمایه‌گذاری با بودجه محدود و نامحدود را نیز مد نظر قرار دادند. علاوه بر زنجیره مارکوف، روشی دیگر که به تازگی توجه زیادی را برای عملکرد پیاده رو مدل‌سازی کرده است استفاده از شبکه عصبی مصنوعی است. (Yang et al., 2006) با استفاده از داده‌های اداره حمل‌ونقل فلوریدا یک مطالعه تجربی با مقایسه و مقابله توانایی‌های زنجیره‌های مارکوف و شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی عملکرد ترک در روسازی‌های انعطاف‌پذیر ارائه کردند. مطالعه آنها نشان داد که زنجیره مارکوف هم به لحاظ خطای پیش‌بینی و هم به لحاظ نکویی برازش از شبکه عصبی بهتر عمل می‌کند، و این عملکرد بهتر با افزایش مدت زمان دوره پیش‌بینی تأثیر بیشتری نیز خواهد داشت. همچنین، مطالعه آنها نشان می‌دهد که زنجیره مارکوف به زمان محاسبات نیاز داشته و از این جهت نیز بر شبکه عصبی

مصنوعی برای پیش‌بینی وضعیت روسازی برتری دارد. موضوع بهینه‌سازی چندهدفه برای تعمیر و نگهداری روسازی ادبیات وسیعی ندارد، ولی با این حال، با توجه به ضرورت موضوع به سرعت در حال توسعه است. برای اولین بار (Fwa, Chan, and Hoque, 2000) یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چندهدفه برنامه ریزی تعمیر و نگهداری روسازی ارائه کردند. پس از آن، (Wang, Zhang, and Machemehl, 2005) یک فرآیند تصمیم‌گیری چندهدفه برای انتخاب پروژه پیشنهاد کردند که در آن از مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح جهت انتخاب مجموعه‌ای از پروژه‌های نامزد در سطح شبکه جاده ای در طول افق برنامه‌ریزی استفاده می‌شود. همچنین، یک مدل چند هدفه برای تعمیر و نگهداری روسازی در سطح پروژه توسط (JianJun, YongJian and Fu, 2009) ارائه شد. مدل آنها حداکثر سود کاربر و حداقل هزینه‌های اجرا را از دیدگاه تصمیم‌گیر به عنوان تابع هدف مورد بررسی قرار می‌دهد. (Babaei and Naderan, 2011) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی دوهدفه در سطح شبکه ارائه کردند که اهداف آن کمینه کردن درصدی از شبکه که در افق برنامه‌ریزی در وضعیت نامناسب قرار می‌گیرد بیشینه کردن درصدی از شبکه که در افق برنامه‌ریزی در وضعیت مناسب قرار می‌گیرد، بود. آنها برای حل مدل چندهدفه خود از روش برنامه‌ریزی آرمانی[۳] استفاده کردند و توانستند فرآیند زنجیره مارکوف را در قالب مدل بهینه‌سازی به صورت یکپارچه وارد کنند. ( Meneses and Ferreira, 2013 and 2015) مدل‌های دوهدفه دیگری برای بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری روسازی ارایه کردند. آنها کمینه کردن هزینه تعمیر و نگهداری بیشینه کردن ارزش باقی مانده روسازی را به صورت همزمان در مطالعه خود در نظر گرفتند. (Salini, Xu, and Lenngren, 2015) از هوش مصنوعی برای بهینه کردن مدیریت روسازی استفاده کردند. (Yepes, 2016) الگوریتم جستجوی تصادفی حریصانه را برای برنامه‌ریزی نگهداری روسازی راه به کار گرفتند. (Babashamsi et al., 2016) مروری بر جوانب مختلف و مطالعات انجام‌شده تا سال ۲۰۱٦ روی روش‌های ارزیابی اقتصادی سرمایه‌گذاری در روسازی انجام دادند و برای این منظور یک نرم‌افزار کاربردی نیز توسعه داده و معرفی کردند. (Chong et al., 2017) یک مدل چندهدفه با استفاده از روش پیش‌بینی مکانستیک-تجربی ارایه کردند. ( Santos, Ferreira and Flintsch, 2017) مدل چندهدفه تعمیر و نگهداری را با رویکرد پایداری محیط زیست ارائه کردند. (Torres-Machi et al., 2017) نیز مبحث بهینه‌سازی عملیات روسازی را با رویکرد پایداری در شرایط محدودیت بودجه مورد بررسی قرار دادند. (He et al., 2017) بهینه سازی سیستم مدیریت روسازی را برای یک مطالعه کاملاً عملی در سطح عملیات بهره‌برداری اجرا کردند. ( Ndume and Mlavi, 2017) تقسیم بودجه تعمیر و نگهداری روسازی در سطح شبکه را بین واحدهای اجرایی بررسی کردند. (France-Mensah and O’Brien, 2018) سه روش بهینه‌سازی موجود در ادبیات (ارزیابی هزینه-فایده، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، و درخت تصمیم) را با یکدیگر مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که برای تصمیم‌گیری بهتر در زمینه تعمیر و نگهداری روسازی به روش‌های ترکیبی نیاز است. لزوم ادغام مدل پیش‌بینی عملکرد و روند بهینه‌سازی بهبود شبکه اولین بار توسط ( Li, Hass, and Huot, 1998) مطرح شد. پس از آن، ( Li, Y., and S. Madanat, 2001) راه‌حلی بر مبنای حالت ایستای زنجیره مارکوف برای بهینه‌سازی تعداد و شدت روسازی مجدد راه ها ایجاد کردند. (Kuhn and Madanat, 2006) استفاده از بهینه‌سازی استوار را برای مقابله با عدم قطعیت در شناخت جوانب مسأله را معرفی کرد تا از این طریق بتوان سیاست‌های مدیریتی را به دور از محافظه‌کاری بیش از حد اتخاذ کرد. (Gao, Tighe, and Zhang, 2007) مدل زنجیره مارکف و روش گشتاور را در یک چارچوب بهینه سازی برای نگهداری و بهبود وضعیت روسازی راه ارایه کردند. (Gao, and Zhang, 2008) یک روش بهینه‌سازی استوار در سطح پروژه (نه در سطح شبکه) برای برنامه‌ریزی بودجه تعمیر و نگهداری را برای رفع عدم اطمینان در ارتباط با عواملی از قبیل بارگذاری ترافیک، شرایط محیطی و ظرفیت سازه توسعه دادند. ( Abaza and Murad, 2010) یک رویکرد مبتنی بر عملکرد احتمالی را برای اولویت‌بندی پروژه‌های کاندید بهبود روسازی در سطح شبکه، با استفاده از یک مدل مارکوف زمان-گسسته پیشنهاد کردند. با توجه به توضیحات بالا، می‌توان گفت که همه مدل های قبلی که از تئوری زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی وضعیت روسازی راه استفاده کرده‌اند، آن را به عنوان یک مرحله جداگانه برشمرده‌اند و سپس تخصیص منابع را برای بهبود وضعیت روسازی به صورت پی‌درپی و بازگشتی در قالب یک مدل بهینه‌سازی بکاربرده‌اند. این امر باعث خواهد شد که پیش‌بینی وضعیت عملکرد روسازی و تخصیص بودجه برای تعمیر و نگهداری در یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت به صورت یکپارچه محقق نشود، یا به عبارتی، استفاده از اینگونه مدل‌ها تنها برای افق‌های برنامه‌ریزی کوتاه مدت قابلیت استفاده دارند و هرچه افق برنامه‌ریزی بلندمدت

تر شود احتمال تخصیص غیربهینه بودجه افزایش خواهد یافت. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، (Babaei and Naderan, 2011) توانستند فرآیند زنجیره مارکوف را در قالب مدل بهینه‌سازی به صورت یکپارچه وارد کنند و بنابراین در مقاله حاضر، رویکرد پیش‌بینی همزمان با تخصیص بودجه استفاده‌شده توسط آنها و با انجام اصلاحاتی روی آن به دست آمده است. این اصلاحات شامل اضافه کردن تابع هدف مربوط به هزینه بهسازی شبکه، حذف محدودیت‌های مربوط به بودجه، و همچنین ارایه روش جدید برای حل مدل سه‌هدفه پیشنهادی است. جزییات این رویکرد در بخش ۳-۳ آمده است.

## ۳- تئوری زنجیره مارکوف در پیش‌بینی وضـعیت روسازی

### ۳-۱-کلیات تئوری مارکوف

در این مقاله، فرض شده است که حالات کنونی شبکه به حالت شبکه تنها به یک دوره کاری (مثلاً یک سال) قبل وابسته است و بنابراین می‌توان از مدل مارکوف همگون مستقل از زمان (Ross, 2010) استفاده کرد. در یک مدل مارکوف اجزای اصلی فرآیند احتمالی عبارتند از: حالات یا شرائط[٤] و احتمالات انتقال بین حالات[٥]. احتمال انتقال نشان می‌دهد که شبکه از یک حالت به حالت دیگر با چه احتمالی انتقال می‌یابد. از آنجا که در این مقاله از زنجیره ماکوف مستقل از زمان استفاده می‌شود می‌بایست شرایط و ویژگی‌های مسئله از سه محدودیت زیر نیز پیروی نماید:

۱. فرآیند احتمالی می‌بایست در زمان گسسته صورت پذیرد،
۲. فضای حالت فرآیند احتمالی مورد نظر می‌بایست شمارش پذیر یا محدود باشد، و
۳. فرآیند احتمالی باید ویژگی مارکوفی را تامین نماید؛ یعنی، حالت آینده می‌بایست تنها به حالت فعلی وابسته باشد نه به حالات قبل‌تر.

برای استفاده از تئوری مارکوف، حالات اولیه فرآیند با بردار اولیه حالات به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$A^0 = \left[a_1^0, a_2^0, ..., a_n^0\right]$$

با توجه به خصوصیات خرابی روسازی ماتریس اولیه نشان‌دهنده شرائط کنونی شبکه خواهد بود که عبارت است از قسمتی از شبکه که در یک بازه خاصی از حالات قرار می‌گیرد. در این مدل، بردار اولیه توسط توزیع کنونی خرابی‌ها از پایگاه داده‌های شرائط راه محاسبه می‌شود. باید توجه کرد که جهت ارضای محدودیت تئوری مارکوف مجموع $a_i^0$ها می‌بایست برابر با ۱ و تمام اعداد مربوطه باید مثبت باشند.

### ۳-۲-مدل‌سازی پـیش‌بینـی خرابـی توسـط زنجیـره مارکوف

برای مدل کردن خرابی‌ها در یک دوره زمانی مشخص می‌بایست ماتریس انتقال (TPM)[٦] را تشکیل داد، که شکل عمومی آن به صورت زیر است:

(١)
$$\mathbf{TPM} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdots & p_{2n} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \cdots & p_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & p_{n3} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

این ماتریس شامل تمام اطلاعات مورد نیاز برای مدل کردن انتقال بین حالات مختلف است، و هر درایه $p_{ij}$ آن احتمال انتقال قسمتی از شبکه که در حالات $i$ بوده است را به حالت $j$ در یک دوره کاری[٧] بیان می‌کند. در نمایش ماتریسی، توزیع احتمالی حالات فرآیند در یک دوره زمانی مشخص (مثلاً یک ساله $t = 1$) به صورت معادله (٢):

(٢)
$$A^1 = \left[a_1^1, a_2^1, ..., a_n^1\right] = \left[a_1^0, a_2^0, ..., a_n^0\right] \times \mathbf{TPM}$$

و یا به صورت عمومی‌تر برای سال $t$:

(٣)
$$A^t = \left[a_1^t, a_2^t, ..., a_n^t\right] = \left[a_1^0, a_2^0, ..., a_n^0\right] \times \mathbf{TPM}^t$$

برای مسائل مرتبط به نگهداری روسازی راه دو محدودیت دیگر علاوه بر محدودیت‌هایی که در بالا برای استفاده از فرآیند مارکوف ذکر شد، اضافه می‌شود، که عبارتند از: برای هر $i < j$ داریم: $p_{ij} = 0$ و $p_{nn} = 1$، و ماتریس انتقال TPM به صورت زیر نوشته می‌شود:

(٤)
$$\mathbf{TPM} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1n} \\ 0 & p_{22} & p_{23} & \cdots & p_{2n} \\ 0 & 0 & p_{33} & \cdots & p_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & p_{nn} = 1 \end{bmatrix}$$

علاوه بر تمام ٥ محدودیت ذکر شده تاکنون، برای سهولت در تعیین TPM تقریبی و مناسب می‌توان فرض کرد که پس از هر سال، احتمال انتقال یک قطعه از روسازی

از یک حالت خرابی تنها به همان حالت یا حالت بالاتر وجود دارد و در باقی حالات این احتمال صفر است. با در نظر گرفتن این حالت به دست می‌آید:

(۵)

$$\mathbf{TPM}=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p_{22} & p_{23} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{nn}=1 \end{bmatrix}$$

در عمل، نگهداری راه به صورت سالانه و با توجه به حدود استاندارد مشخص شده برای حد خرابی‌ها صورت می‌گیرد و بنابراین در تعیین سطوح خرابی می‌بایست این حدود استاندارد در حدود بالا و پائین در حالات مختلف دیده شوند. مثلاً وضعیت روسازی را در مقیاس PCI[۸] می‌توان به ۵، ۱۰ یا ۲۰ طبقه با حدود بالا و پایین دلخواه تقسیم‌بندی کرد، به گونه‌ای که این طبقات بتوانند از PCI=0 تا PCI=100 را پوشش دهند و در عین حال هر کدام از این طبقات با سایر طبقات همپوشانی نداشته باشند. برای محاسبه درایه‌های ماتریس احتمال انتقال ساده‌ترین راه استفاده از تجربه و پایگاه داده مهندسان فعال در زمینه مدیریت روسازی است که روند تغییرات PCI قطعات راه را در طول چند سال مشاهده و جمع آوری می‌کنند. البته در مواردی که پایگاه داده مربوط به روند تغییرات PCI داده کافی نداشته باشد می‌توان از روش‌های اقتصادسنجی استفاده کرد؛ برای مثال مطالعه (Ariaratnam, El-Assaly and Yang, 2001) را ببینید.

## ۳-۳- رویکرد پیش‌بینی خرابی توسط زنجیره مارکوف به صورت همزمان با تخصیص بودجه

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، یکی از چالش‌های اصلی در برنامه‌ریزی نگهداری روسازی یکپارچه و همزمان بودن فرآیند پیش‌بینی وضعیت روسازی و تخصیص بودجه است. (Babaei and Naderan, 2011) توانستند فرآیند زنجیره مارکوف را در قالب مدل بهینه‌سازی به صورت یکپارچه وارد کنند. از آنجا که در این مقاله از همان رویکرد استفاده خواهد شد، در ادامه روش پیشنهادی آنها توضیح داده می‌شود.

فرض کنید در بین کل $n$ حالت ممکن برای وضعیت روسازی حالت بحرانی تعیین‌شده توسط استاندارد را $i_{Cr.}$ بنامیم. این حالت توسط سطح مجاز تعیین‌شده برای شاخص PCI روسازی مشخص می‌شود. بنابراین، می‌توان اندیس حالات ($i$ها) را به صورت $i=1,2,...,i_{Cr.},...,n$ نمایش داد، همه حالات $i=i_{Cr.},...,n$ حالاتی نامطلوب به حساب می‌آیند. از طرفی طبق اصول اولیه فرآیند زنجیره مارکف، برای هر دوره زمانی (سال) $t>1$ می‌توان نوشت:

$$a_k^t=\sum_{i\le k}a_i^{t-1}p_{ik} \tag{٦}$$

که در آن $a_k^t$ نشان می‌دهد که در سال $t$ام برنامه‌ریزی چه درصدی از کل شبکه در حالت $k$ قرار دارد. فرض کنید $x_k^t$ متغیر اصلی تصمیم مسأله باشد، به طوری که مقدار آن برابر با ۱ باشد اگر بخش‌هایی از شبکه که در حالت $k$ هستند در سال $t$ برای تعمیر یا بازسازی انتخاب شده باشند و در غیر این صورت مقدار آن صفر باشد. به این ترتیب، آن قسمت هایی از شبکه که به حالت‌هایی بدتر از حالت بحرانی تنزل می‌یابند (یعنی $i\ge i_{Cr.}$) و برای اقدامات بهسازی (تعمیر) انتخاب شده‌اند وضعیتشان به حالت ۱ ارتقا خواهند یافت (یعنی $x_i^t=1$) و نسبت واقعی (تغییریافته) شبکه‌ای که در حالت ۱ است به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$a_1^t(\text{mod.})=\sum_{i\ge i_{Cr.}}x_i^t a_i^t+a_1^t \tag{٧}$$

به این ترتیب، آن قسمت هایی از شبکه که برای اقدامات بهسازی انتخاب نشده‌اند (یعنی $x_k^t=0$) در حالت فعلی خود باقی خواهند ماند:

(۸)

$$a_k^t(\text{mod.})=(1-x_k^t)a_k^t$$

بر اساس تغییرات فوق، وضعیت شبکه در سال بعد (یعنی $t+1$)، می‌تواند با استفاده از درایه مربوطه در ماتریس احتمال انتقال به صورت زیر تعیین شود:

$$a_k^{t+1}=\sum_{i\le k}a_i^t(\text{mod.})p_{ik} \tag{٩}$$

به این ترتیب، با استفاده از این رویکرد، متغیر حالت $a_k^{t+1}$ به متغیر تصمیم $x_k^t$ وابسته شده است و به همین دلیل $a_k^{t+1}$ نیز می‌تواند به عنوان یک متغیر تصمیم در مسأله بهینه سازی وارد شود. این رابطه بین $a_k^{t+1}$ و $x_k^t$ به ما اجازه می‌دهد که بتوان به طور همزمان از طریق یک مدل برنامه

ریزی ریاضی پیش‌بینی عملکرد و بهینه‌سازی تخصیص بودجه برای تعمیر و نگهداری را انجام داد. به عبارت دیگر، اثر اقدامات اصلاحی بر عملکرد شبکه، از طریق رابطه بالا قابل اعمال در مدل برنامه‌ریزی ریاضی است. لازم به ذکر است که در رویکرد بالا فرض بر این است که پس از اقدامات بهسازی در هر حالت روسازی، حالت آن به حالت ١ ارتقا خواهد یافت. البته این موضوع متأثر از نوع اقدامات اصلاحی است و می‌تواند در صورت کلی حالات دیگری نیز پیش بیاید، که بررسی آن خارج از محدوده این مطالعه است و به عنوان موضوعی برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

## ٤- مدل پیشنهادشده

این مقاله به دنبال ارائه یک مدل سه هدفه است که علاوه بر پیش بینی وضعیت روسازی راه، به طور همزمان منابع عملیات نگهداری راه در درازمدت را به نحوی بهینه به قسمت‌های مختلف شبکه تخصیص دهد. با این توضیح، مدل ارایه‌شده در این مقاله، برای راحتی خواننده در سه زیربخش ارایه شده است. در زیربخش ٤-١ مقدمات مورد نیاز برای فرمول‌بندی ریاضی مدل پیشنهادشده ارایه می‌شود، تا پس از آن بتوان پیش‌بینی‌های مارکوفی را در قالب برنامه ریزی ریاضی غیرخطی -که در زیربخش ٤-٣ به آن پرداخته می‌شود- وارد کرد. سپس، در بخش ٣-٤ با استفاده از یک روش ترکیبی بهینه‌سازی پارامتریک و توابع حددار روش حل مدل سه‌هدفه به صورت همزمان توضیح داده می‌شود.

### ٤-١- تعریف متغیرها

#### ٤-١-١- مجموعه‌ها و اندیس‌ها

$N$ = مجموعه حالات ممکن برای وضعیت روسازی شامل حالات ١ تا $n$ (حالت ١ مربوط به بهترین و حالت $n$ مربوط به بدترین حالت روسازی است) که اندیس آن با $i$، $j$ یا $k$ اندیس‌دهی می‌شود.

$i_{Cr.}$ = اندیس مربوط به حالتی از وضعیت روسازی است که طبق استاندارد قابل قبول باشد و باید اصلاحات روی قسمتی از شبکه که در آن حالت و حالت‌های بالاتر (که در وضعیتهای روسازی بدتری) قرار دارند انجام شود.

$T$ = مجموعه دوره زمانی برنامه‌ریزی شامل دوره ١ تا $m$ (سال یا مرحله برنامه‌ریزی)، که اندیس آن با $t$ یا $\tau$ اندیس‌دهی می‌شود.

#### ٤-١-٢- پارامترها (متغیرهای ورودی)

$A^0$ = بردار حالات شبکه در سال (مرحله) اول:

$$A^0 = \left[ a_1^0, a_2^0, ..., a_n^0 \right]$$

$A^t$ = بردار حالات شبکه در مرحله $t$ام:

$$A^t = \left[ a_1^t, a_2^t, ..., a_k^t, ..., a_n^t \right]$$

که $a_k^t$ نشاندهنده این است که چند درصد شبکه در سال $t$ در حالت $k$ است.

$p_{ik}$ = درایه ماتریس TPM است که شرح آن در بخش قبل داده شد، و در حقیقت احتمال انتقال قسمتی از شبکه که در حالات $i$ بوده است را به حالت $j$ در یک دوره کاری نشان می‌دهد.

$C_i$: هزینه ارتقاء واحد سطح شبکه از حالت $i$ به حالت ١ در سال پایه،

$r$: متوسط جمع جبری نرخ بازگشت سرمایه و نرخ تورم سالانه، (در صورتی که نرخ تورم متوسطی برای افزایش هزینه‌ها در سال‌های آتی در نظر گرفته شود، می‌توان رابطه هزینه‌ها را بر مبنای سال پایه از $C_i\,(1+r)^t$ حساب کرد.)

#### ٤-١-٣- متغیرهای تصمیم (خروجی مدل)

$X^t$ = بردار تعیین حالات سرمایه‌گذاری در مرحله (زمان) $t$ام:

$$X^t = \left[ x_1^t, ..., x_k^t, ..., x_n^t \right]$$

که $x_k^t$ متغیر تصمیم مسأله است و پس از حل مدل به دست می‌آید و می‌تواند یکی از دو عدد ٠ یا ١ را بگیرد. عدد ١ به این معنی است که قسمتی از شبکه که در حالت $k$ بوده به حالت ١ (بهترین حالت) ارتقا یافته است، و در غیر این صورت $x_k^t$ خواهد شد.

$A^t(\text{mod.})$ = ماتریس اصلاح شده حالات شبکه (با در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری‌های انجام شده برای رفع خرابی‌ها) در مرحله $t$:

$$A^t(\text{mod.}) = \left[ a_1^t(\text{mod.}), ..., a_k^t(\text{mod.}), ..., a_n^t(\text{mod.}) \right]$$

که در آن $a_k^t(\text{mod.})$ نشان می‌دهد که پس از پیش‌بینی

توسط زنجیره مارکوف و تخصیص بودجه در سال $t$ چند درصد شبکه به حالت $k$ خواهد رسید. بنابراین با فرض اینکه حالت شبکه در سال پایه پس از تخصیص بودجه در نظر گرفته می‌شود می‌توان نوشت $A^0(\text{mod.}) = A^0$.

$Z_1$ و $Z_2$ و $Z_3$: توابع هدف.

### ٤-٢- فرمول‌بندی مدل

توابع هدف مدل پیشنهادشده عبارتند از:

$$\min Z_1=\sum_{i=i_{Cr.}}^{n-1}\sum_{t=1}^{m} a_i^t(\text{mod.}) \quad (١٢)$$

$$\min\ Z_2=\sum_{t=1}^{m} a_n^t(\text{mod.}) \quad (١٣)$$

(١٤)

$$\min\ Z_3=\sum_{t=1}^{m}\sum_{i=i_{Cr.}}^{n} C_i\,(1+r)^t\left(a_i^t-a_i^t(\text{mod.})\right)$$

و محدودیت‌های آن:

(١٥)

$$a_k^t=\sum_{i\le k} a_i^{t-1}(\text{mod.})p_{ik},\ \forall k\in N,\ \forall t>1\in T$$

(١٦)

$$a_1^t(\text{mod .}) = \sum_{i\ge i_{Cr.}} x_i^t a_i^t + a_1^t \qquad \forall t>1\in T$$

(١٧)

$$a_k^t(\text{mod.})=(1-x_k^t)a_k^t,\ \forall k>1\in N,\ \forall t>1\in \text{T}$$

$$x_i^0=0 \qquad \forall i\in N \quad (١٨)$$

$$x_i^t=0 \qquad \forall i<i_{cr.}\in N,\ \forall t\in T, \quad (١٩)$$

$$x_i^t\in\{0,1\} \qquad \forall i\in N,\ \forall t\in T \quad (٢٠)$$

تابع هدف اول (رابطه ١٢) به دنبال کمینه کردن درصد قسمت‌هایی از شبکه که در حالت بحرانی و بدتر از بحرانی (غیر از بدترین حالت) قرار دارند است. تابع هدف دوم (رابطه ١٣) درصد قسمت‌هایی از شبکه که در بدترین حالت قرار دارد را کمینه می‌کند. این دو هدف به این دلیل به طور جداگانه مدنظر قرار گرفته‌اند که اهمیت وجود بدترین حالت از سایر حالات بیشتر است و یا اهمیت متفاوتی از سایر حالات دارد. این موضوع در نتایج بکارگیری مدل به خوبی مشاهده می‌شود. تابع هدف سوم (رابطه ١٤) مجموع هزینه انجام شده به خاطر اصلاحات صورت گرفته در کل دوره برنامه‌ریزی را کمینه می‌کند. محدودیت (١٥) مدل مارکوف را به صورت یک عبارت چندجمله‌ای وارد می‌کند. محدودیت‌های (١٦) و (١٧) در کنار یکدیگر محاسبه مقدار جدید درصد شبکه در هر حالت را پس از انجام ارتقاء درحالات مختلف در مسأله می‌گنجانند. توضیح این سه محدودیت با تفصیل در بخش ٣-٣ آمده است. محدودیت‌های (١٨) و (١٩) مجاز بودن انجام اقدامات بهسازی و تخصیص بودجه تنها برای قسمت‌هایی از شبکه که در وضعیت بحرانی و بدتر هستند را اجازه می‌دهد، و در حقیقت برای تعریف صحیح متغیرها تعبیه شده است. محدودیت (٢٠) صفر یا یک شدن متغیرهای تصمیم مسأله را تضمین می‌کند.

### ٤-٣- حل مدل چندهدفه

در این پژوهش برای حل مدل چندهدفه ارایه‌شده در بخش ٤-٢، در این بخش یک رویکرد ترکیبی از دو روش بهینه‌سازی چندهدفه‌ی «توابع حددار»[٩] و «بهینه‌سازی پارامتریک»[١٠] ارایه می‌شود. فرض کنید $x$ بردار متغیر تصمیم، $G$ مجموعه اهداف، $f_g(x)$ تابع هدف $g$ام، و $S$ فضای جواب در یک مسأله چندهدفه از نوع کمینه سازی باشد. شکل کلی مدل‌سازی در روش توابع حددار به صورت زیر است: (Hillermeier, 2001)

$$\begin{aligned}&\min_{x\in S}\quad f_h(x)\quad \text{for a } h\in G\\ &\text{s.t.:}\quad f_g(x)\le\varepsilon_g\quad \forall g\in G, g\ne h\end{aligned} \quad (٢٣)$$

در این روش یکی از توابع هدف (مثلاً در مدل بالا، تابع هدف $f_h(x)$) بهینه می‌شود و در عین حال محدودیتی برای سایر اهداف ($g\ne h$) در نظر گرفته می‌شود. چالش اصلی در این روش به تعیین محدودیت $\varepsilon_g$ برمی‌گردد، که اگر مقادیر آن خیلی کم تعیین شوند منجر به جواب غیرممکن برای مسأله می‌شود، و اگر مقادیر خیلی بزرگ برای آن تعیین شود باعث می‌شود که تغییرات آن به حل‌های متنوع دیگر نیانجامد. اتفاقاً، با استفاده از همین خواص است که می‌توان با سعی و خطا مقادیر مناسبی را برای $\varepsilon_g$ یافت. در این مقاله، تابع هدف سوم ($Z_3$) به صورت حددار به عنوان یک محدودیت اضافه شده و از جمع توابع هدف کنار می‌رود. مقدار $\varepsilon_3$ متناظر با این تابع هدف را با $B$ نشان می‌دهیم، و از آنجا که $Z_3$ میزان هزینه را نشان می‌دهد، $B$ را به سقف هزینه مجاز (یا بودجه) تعبیر می

کنیم. با توجه به توضیحات بالا، مدل سه‌هدفه پیشنهادی تبدیل به یک مدل دوهدفه با توابع هدف $Z_1$ و $Z_2$ شده است. در ادامه روش حل دوهدفه به‌دست‌آمده را از روش پارامتریک (یا وزن‌دهی) توضیح می‌دهیم. این روش پارامتریک را می‌توان به ازای ارزش‌ها یا اوزان مختلفی از اهداف ($w_g$) به کار برد و راه‌حل‌های موثر را به‌وجود آورد. مدل کلی این روش به صورت زیر است: (Hillermeier, 2001)

$$\min_{x\in S} \ \sum_{g\in G} w_g f_g(x) \quad \text{s.t.:} \quad w_g \ge 0 \quad \forall g \in G, \ \sum_{g\in G} w_g = 1 \qquad (٢٤)$$

در این مدل اوزان $w_g$ تنها اهمیت نسبی اهداف را منعکس نمی‌کند، بلکه به‌طور پارامتریک تغییر کرده تا نقاط موثر مشخص گردد. به عبارت دیگر، ممکن است تصمیم‌گیر از قبل نداند که وزن هر یک از توابع هدف باید چقدر باشد، اما با تحلیل حساسیت روی مقادیر مختلف آن و ارائه گستره‌ای از نتایج مختلف به وی می‌تواند در مورد انتخاب مقادیر $w_g$ (که به جواب بهینه از نظر وی مطابق است) تصمیم‌گیری نماید. در واقع، این مدل به دنبال یافتن توابع هدف غیرمغلوب است که با تغییر پارامتریک وزن توابع هدف بتواند بیشترین مقدار وزن‌داده‌شده را بیابد. در این مدل، یک «حل موثر»[11] $x^*$ حلی است که هیچ حل دیگری (مثل $x$) وجود نداشته باشد که:

$$f_g(x^*) \le f_g(x) \qquad (٢٥)$$

این حل را می‌توان «حل غیرمغلوب»[12] نیز نامید (Enkhbat, Guddat and Chinchuluun, 2008). به طور کلی، می‌توان گفت که در روش پارامتریک با حل پی‌درپی مسأله به ازای مقادیر مختلف $w_g$ گستره‌ای از حل به دست می‌آید که باید حل‌های غیرمغلوب یا «حل پارتویی بهینه»[13] را به عنوان حل‌های موثر به تصمیم‌گیر معرفی کرد تا تصمیم‌گیر حل دلخواه خود را انتخاب کند. در صورت استفاده از این روش، تابع هدف مدل ارایه شده در این مقاله به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\min \ wZ_1 + (1-w)Z_2 \qquad (٢٦)$$

که در آن $w$ ارزش نسبی (و فرضی) هدف $Z_1$ و $(1-w)$ ارزش نسبی (و فرضی) هدف $Z_2$ است. بنابراین، با تغییر مقادیر $w$ می‌توان به گستره‌ای از جواب‌های قابل قبول دست یافت تا با ارایه آنها به تصمیم‌گیر، تصمیم‌گیر بتواند به استراتژی مناسبی برای سرمایه‌گذاری در شبکه برسد. در مسائل چندهدفه برای آن که غالب بودن یک حل (جواب) $x_1$ را نسبت به حل $x_2$ بسنجیم باید شرط‌های زیر برقرار باشند:

١) اگر در تمامی اهداف (در اینجا تنها دو هدف داریم: $Z_1$ و $Z_2$) حل $x_1$ از حل $x_2$ بدتر نباشد؛ به عبارت دیگر، به ازای هر $g$ عضو $G$ عبارت $Z_g(x_1) \not\triangleright Z_g(x_2)$ برقرار باشد. (عملگر $\triangleleft$ نشان‌دهنده غلبه یک حل بر حلی دیگر است. برای مثال، برای دو حل $a$ و $b$ وقتی نوشته می‌شود $a \triangleleft b$ بدین معنی است که در مورد هدفی مشخص جواب $a$ از $b$ بهتر است. به طریق مشابه، وقتی نوشته می‌شود $a \triangleright b$ بدین معنی است که $a$ از $b$ بدتر است. برای نشان دادن عدم غلبه نیز می‌توان از علامت $\not\triangleright$ استفاده کرد؛ وقتی می‌نویسیم $a \not\triangleright b$ بدین معنی است $a$ از $b$ بدتر نیست.)

٢) اگر حداقل به ازای یکی از اهداف حل $x_1$ از حل $x_2$ بهتر باشد؛ به عبارت دیگر، وجود داشته باشد یک $g$ عضو $G$ که به ازای آن $Z_g(x_1) \triangleleft Z_g(x_2)$ برقرار باشد.

لازم به ذکر است که در صورت برقراری شرط ١ به تنهایی می‌گوییم حل $x_1$ غیرمغلوب یا پارتویی است، و مجموعه‌ای از حل‌ها که غیرمغلوب باشند یک «جبهه بهینه پارتویی»[15] را تشکیل می‌دهند. در مورد استفاده از تابع هدف (٢٦) ذکر این نکته ضروری است که توابع هدف $Z_1$ و $Z_2$ بهتر است در یک مقیاس بیان شوند تا ضرایب $w_1$ و $w_2$ تأثیر خود را در تولید جواب‌های متنوع بیشتر نشان دهند. به همین دلیل، با توجه به مقادیر حداقل و حداکثر توابع هدف، بهتر است آنها را نرمالیزه کرد. مقدار تابع هدف نرمالیزه‌شده $Z_g^N$ برای یک تابع هدف $Z_g$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Z_g^N = \frac{Z_g - Z_g^{\min}}{Z_g^{\max} - Z_g^{\min}} \qquad (٢٧)$$

که $Z_g^{\min}$ و $Z_g^{\max}$ به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر ممکن برای تابع هدف $Z_g$ است. واضح است که کمترین مقدار ممکن برای دو تابع هدف $Z_1$ و $Z_2$ در این مقاله صفر است، زیرا با صرف حداکثر هزینه می‌توان از رسیدن شبکه به آستانه بحرانی (یعنی $i_{cr.}$) جلوگیری کرد. اما، برای بیشترین مقادیر تابع هدف می‌توان هر یک از توابع هدف را

به تنهایی و با تمام محدودیت‌ها حل کرد و جواب به‌دست آمده را به عنوان حداکثر ممکن برای آن تابع هدف به حساب آورد. بنابراین، مقدار $Z_1^{\max}$ از حل مدلی با تابع هدف (١٢) و محدودیت‌های (١٥) تا (٢٠) ، و مقدار $Z_2^{\max}$ از حل مدلی با تابع هدف (١٣) و محدودیت‌های (١٥) تا (٢٠) به دست می‌آید.

بنا بر توضیحات بالا، مدل سه‌هدفه پیشنهادی به مدل یک هدفه زیر (با تابع هدف $Z$ ) تبدیل می‌شود:

تابع هدف:

$$\min Z = wZ_1 / Z_1^{\max} + (1-w)Z_2 / Z_2^{\max} \qquad (٢٨)$$

با محدودیت‌های (١٥) تا (٢٠) و محدودیت زیر:

$$Z_3 \le B \qquad (٢٩)$$

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، اگر مقادیر خیلی بزرگی برای $B$ تعیین شود باعث می‌شود که تغییرات آن به حل‌های متنوع نیانجامد. مسأله زیر برای تعیین مقدار حداکثر ممکن برای $B$ -که آن را $B^{\max}$ می‌نامیم- پیشنهاد می‌شود:

تابع هدف:

$$\min\ Z_3 \qquad (٣٠)$$

با محدودیت‌های (١٥) تا (٢٠) و محدودیت زیر:

$$Z_1 + Z_2 = 0 \qquad (٣١)$$

با حل این مسأله، مقدار به‌دست‌آمده برای $Z_3$ را به عنوان $B^{\max}$ در نظر می‌گیریم.

## بکارگیری مدل

در این بخش، مدل ارایه‌شده در بخش قبل بر روی شبکه فرضی و داده‌های استفاده‌شده در مرجع (Costello et al., 2005) به کار گرفته می‌شود. در این مطالعه، حالات روسازی بر مبنای شاخص MSI[١٤] و میزان حجم وسیله نقلیه عبوری از قطعه راه، به ٥ حالت زیر تقسیم‌بندی شده‌اند:

VP: خیلی بد (خیلی ضعیف)،

P: بد (ضعیف)،

F: متوسط،

G: خوب،

VG: خیلی خوب،

مقادیر ورودی هزینه‌ها برای ارتقاء از حالت‌های ٣ تا ٥ به حالت ١ تا سال ٢٠ ام برنامه‌ریزی در جدول ١ ارایه شده است. هزینه‌ها بر اساس مقادیر ارائه شده توسط (Costello et al., 2005) بر حسب یورو بر متر مربع با ترافیک سنگین برای سال پایه و به حساب آوردن جمع جبری نرخ تورم و نرخ بازگشت سرمایه ١٠ درصد در هر سال محاسبه شده‌اند. لازم به ذکر است که به دلیل اینکه مدل ارایه‌شده به درصدهای قرار گرفته در حالات مختلف حساس است و از طرفی واحدهای هزینه بر واحد سطح بیان می‌شوند، نیازی به وجود اطلاعات درباره طول یا مساحت شبکه نیست و تنها کافیست اطلاعات در مورد درصدی از سطح شبکه که در هر یک از حالات وضعیت روسازی قرار دارد معلوم باشد.

بردار وضعیت اولیه، که نشان‌دهنده سهم هر یک از حالات وضعیت روسازی از کل سطح شبکه به صورت درصد است، به صورت زیر است:

$$A^0 = [0.43 \quad 0.40 \quad 0.07 \quad 0.05 \quad 0.05]$$

**جدول ١. مقادیر هزینه بر واحد سطح برای ارتقا حالات ٣ تا ٥ به حالت ١ در ٢٠ سال**

| سال | حالت ٣ (F) | حالت ٤ (P) | حالت ٥ (VP) |
|---|---|---|---|
| سال پایه | 10.77 | 16.31 | 29.81 |
| 1 | 11.85 | 17.94 | 32.79 |
| 2 | 13.03 | 19.74 | 36.07 |
| 3 | 14.33 | 21.71 | 39.68 |
| 4 | 15.77 | 23.88 | 43.64 |
| 5 | 17.35 | 26.27 | 48.01 |
| 6 | 19.08 | 28.89 | 52.81 |
| 7 | 20.99 | 31.78 | 58.09 |
| 8 | 23.09 | 34.96 | 63.90 |
| 9 | 25.40 | 38.46 | 70.29 |
| 10 | 27.93 | 42.30 | 77.32 |
| 11 | 30.73 | 46.53 | 85.05 |
| 12 | 33.80 | 51.19 | 93.56 |
| 13 | 37.18 | 56.31 | 102.91 |
| 14 | 40.90 | 61.94 | 113.20 |
| 15 | 44.99 | 68.13 | 124.52 |
| 16 | 49.49 | 74.94 | 136.98 |
| 17 | 54.44 | 82.44 | 150.67 |
| 18 | 59.88 | 90.68 | 165.74 |
| 19 | 65.87 | 99.75 | 182.32 |
| 20 | 72.46 | 109.73 | 200.55 |

و ماتریس انتقال حالات در حالتی که هیچ سرمایه‌گذاری‌ای صورت نگیرد عبارت است از:

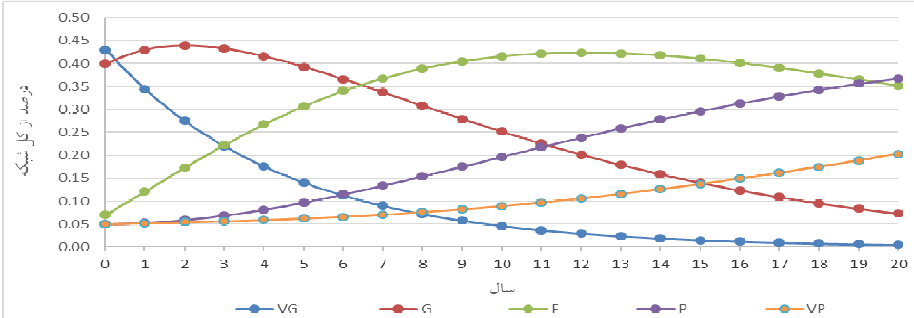
$$\mathbf{TPM}=\begin{bmatrix}0.80 & 0.20 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0.86 & 0.14 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0.93 & 0.07 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0.96 & 0.04\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

در صورتی که هیچ یک از توابع هدف مدل بهینه‌سازی ارائه شده در این مقاله در شبکه مذکور به کار گرفته نشود، وضعیت روسازی در سال‌های پی‌درپی تا ٢٠ سال به صورت نمایش داده شده در شکل ١ در خواهد آمد. این شکل نشان می‌دهد که نوع افول وضعیت روسازی در هریک از حالات خرابی در یک مدل مارکوفی به چه شکل می‌باشد؛ در حقیقت، مرز بین رنگ‌ها در شکل ١ همان خطوطی است که توسط سایر انواع مدلهای مکانیستیک، تجربی یا هوش مصنوعی، که ذکر آنها در مرور ادبیات رفت، برازش داده می‌شود. نکته جالب در پیش‌بینی مارکوفی این است جمع درصدهای شبکه از وضعیت‌های مختلف در هر سال برابر با ١٠٠ درصد است، و بر خلاف سایر مدل‌های موجود، نیازی به اعمال محدودیت اضافی برای اجبار مدل و بروز خطاهای مربوط به آن نیست. چنان که در این شکل دیده می‌شود، وضعیت‌های «خیلی خوب» و «خیلی بد» روندی کاملاً متفاوت دارند؛ یعنی، در سال‌های ابتدایی درصد بسیار اندکی (٥ درصد) از شبکه در وضعیت «خیلی بد» است و به تدریج و به صورت نمایی این مقدار افزایش یافته تا در انتهای دوره به ٢٠ درصد می‌رسد. روند در مورد وضعیت «خیلی خوب» معکوس است، ولی شیب آن (در جهت عکس) بیشتر است؛ دلیل این افزایش شیب وجود سه وضعیت بینابینی («خوب» و «متوسط» و «بد») است که درصد قابل توجهی از سطح شبکه را به خود اختصاص داده و برای گذر از آن‌ها به وضعیت «خیلی بد» مدت زمان بیشتری نیاز است. به عبارت دیگر، وضعیت‌های میانی باعث ایجاد وقفه زمانی در رسیدن از وضعیت «خیلی خوب» به وضعیت «خیلی بد» می‌شود. برای مشخص کردن این وقفه زمانی نیاز به بررسی افق برنامه ریزی طولانی‌تری است.

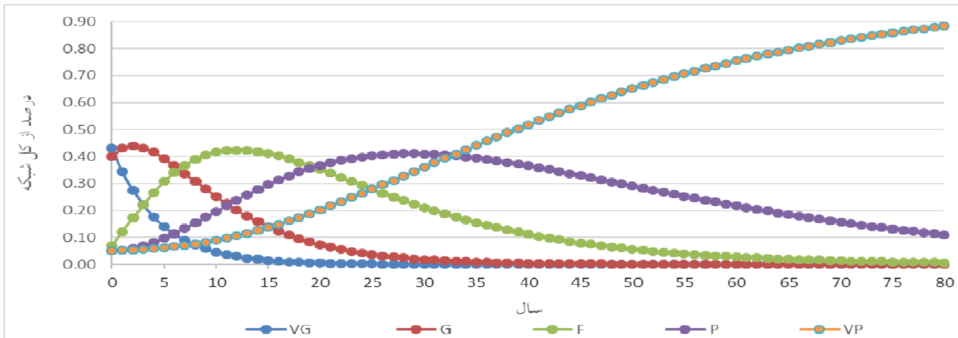
برای مثال، شکل ٢ درصد وضعیت‌های مختلف شبکه بدون انجام هیچگونه سرمایه‌گذاری در افق درازمدت ٨٠ ساله را نشان می‌دهد. می‌توان از این شکل به وضوح دریافت که از سال ٤٠ام به بعد روند تغییرات کند به دلیل انتقال از وضعیت‌های «متوسط» و «بد» به ترتیب به «بد» و «خیلی بد» با ضرایب انتقال اندک (به ترتیب ٠/٠٧ و ٠/٠٤) کند شده است. شکل ٤ نتایج به کارگیری مدل ارائه شده برای هدف $Z_1$ (یعنی $w$ برابر با ١) را به تنهایی نشان می‌دهد؛ روند سرمایه‌گذاری و مقادیر $a_i^t(\text{mod.})$ در مقایسه با مقادیر متناظر در شکل ٣ نشان می‌دهد که در صورتی که هدف نوسازی (ارتقا در حالت ٥) در کنار هدف تعمیر (ارتقا در حالات ٣ و ٤) قرار نگیرد نتایج بسیار غیر معقولانه‌ای را در پی خواهد داشت، زیرا مدل ارائه‌شده تنها به تخصیص سرمایه در جهت ارتقا حالات ٣ و ٤ می‌پردازد و بخشی از شبکه که در سال اول در حالت ٥ بوده است، در سال‌های بعد نیز در همان حالت باقی خواهد ماند. اما از سوی دیگر، در نظر داشتن تنها تابع هدف $Z_2$ باعث می‌شود که تمام سعی مدل به گونه‌ای متمرکز شود که حالات موجود در وضعیت ٥ کمینه گردد و در نتیجه ممکن است سرمایه‌گذاری‌ها در سالهای ابتدائی به سمتی برود که علاوه بر حالت ٥، حالتهای ٣ و ٤ نیز ارتقا یابند. زیرا قسمتهایی از شبکه که در سال‌های ابتدایی در حالات ٣ و ٤ هستند، در سال‌های بعدی به حالت ٥ خواهند رفت و از این رو با توجه به اینکه هزینه ارتقا در حالات ٣ و ٤ (که در این مقاله هزینه‌های تعمیر اتلاق شده‌اند) کمتر از هزینه نوسازی می‌باشند، مدل به صرف هزینه در وضعیت‌های دچار خرابی‌های کمتر از حالت ٥ نیز خواهد پرداخت. این موضوع به خوبی در شکل ٥ قابل پی‌گیری است. برای پیگیری بهتر مباحث بالا، متغیرهای اصلاح $x_i^t$ مربوط به نتایج شکل‌های ٤ و ٥ به ترتیب در جداول٤ و ٥ ارایه شده‌اند.

در شکل ٥، پله‌ای بودن انتقال‌ها در دوره‌های مختلف (تقریباً ٨ ساله) به این دلیل برای وضعیت بد (P) اتفاق می‌افتد که میزان رسیدن به وضعیت خیلی بد (VP) و در نتیجه صرف هزینه بیشتر برای نوسازی‌های مربوط به وضعیت خیلی بد از این طریق کاهش می‌یابد. این موضوع خود بیان نوعی وابستگی بین هدف اول و هدف دوم مدل است، اما تقابل شکل‌های ٤ و ٥ نشان‌دهنده میزان تقابل اندک بین دو تابع هدف است.

به هر حال، می‌توان از این بحث نتیجه گرفت که باید دو تابع هداف $Z_1$ و $Z_2$ در کنار هم قرار گیرند تا به جواب‌های جامع و بهتری دست یافته شود، تا از این طریق هم تعمیرها و هم نوسازی‌ها با درصد اهمیت‌های جداگانه اما به صورت یکپارچه مد نظر قرار گیرند.




**شکل ١. نمایش درصد شبکه در حالات مختلف در ٢٠ سال بدون انجام هیچگونه سرمایه‌گذاری**




**شکل ٢. درصد وضعیت‌های مختلف شبکه بدون انجام هیچگونه سرمایه‌گذاری در افق درازمدت ٨٠ ساله**

در ادامه به نتایج به‌کارگیری مدل تخصیص سرمایه سه هدفه پیشنهادی از روش ترکیبی ارائه‌شده در بخش قبل پرداخته می‌شود. حل‌های مدل توسط نرم‌افزار Lingo به دست آمده است. برای اعمال روش پیشنهادشده ابتدا بایست مقادیر مربوط به $Z_1^{\max}$، $Z_2^{\max}$ و $B^{\max}$ تعیین شوند. برای این کار، همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، باید مدل‌های ارائه‌شده در قالب روابط (١٢)، (١٣)، (١٥) تا (٢٠)، و (٣٠) و (٣١) بکارگیری شوند؛ مقدار این سه پارامتر به ترتیب ١١/١٢٨٦٩، ٢/١٢٩٠١ و ١٩/٨٦٧٥٨ به دست می‌آید. اکنون می‌توان روش ترکیبی را با تابع هدف (٢٨) و محدودیت‌های (١٥) تا (٢٠) و (٢٩) حل کرد. لازم به ذکر است که در روش ترکیبی پیشنهادی، مقدار $B$ در محدودیت (٢٩) از کمترین مقدار آن (یعنی صفر) تا بیشترین مقدار آن (یعنی ١٩/٨٦٧٥٨) می‌تواند تغییر کند. برای راحتی در ارایه مطالب، مقادیر آن را از صفر تا ٢٠ با بازه‌هایی به طول ٥ در نظر می‌گیریم. نتایج اجرای مدل برای مقادیر مختلف $w$ و $B$ در جدول ٢ آمده است. به ذکر چند نکته در مورد نتایج به‌دست‌آمده از اجرای مدل می‌پردازیم:

الف) به طور کلی، با افزایش مقدار $B$ (بودجه) مقدار توابع هدف کاهش می‌یابد، که امری طبیعی است و به معنای آن است که نتایج مدل به درستی منجر به وجود درصد کمتری از وضعیت‌های بحرانی یا بدتر از بحرانی می‌شود.

ب) برای هر سطح بودجه ممکن است با تغییر مقدار $w$ (وزن اهداف) توابع هدف $Z_1$ و $Z_2$ تغییری بوجود نیاید. این امر به این دلیل به وجود می‌آید که تنوع جواب (حل) در بازه‌ای از تغییرات اندک است و همان‌طور که در بخش ٤ توضیح داده شد، باید با سعی و خطا مقادیر مناسب $B$ به گونه‌ای تعیین شوند که تنوع جواب‌ها بیشتر شود (Hillermeier, 2001). جدول ٢ این واقعیت را به خوبی تصدیق می‌کند؛ به طوری که به ازای مقادیر سطوح بودجه بالا ($B$ برابر با ١٥ و ٢٠) یا پایین ($B$ برابر با ٥) تنوع جواب‌ها نسبت به مقدار متوسط سطح بودجه ($B$ برابر با ١٠) به وضوح کمتر است.

ج) در هر سطح بودجه، روند عمومی به این صورت است که با افزایش $w$ مقدار تابع هدف $Z_1$ کاهش می‌یابد و این امری منطقی است چون میزان اهمیت (یا وزن فرضی) آن افزایش یافته است. اما، همان‌طور که در بخش ٤ درباره غالب بودن بعضی از حل‌ها بحث شد، ممکن است بعضی از حل‌ها نسبت به حل دیگر غالب باشند. این موضوع درباره حل‌های به‌دست‌آمده با سطح بودجه ١٠ و $w$ برابر با ٠/٦ و ٠/٧ –

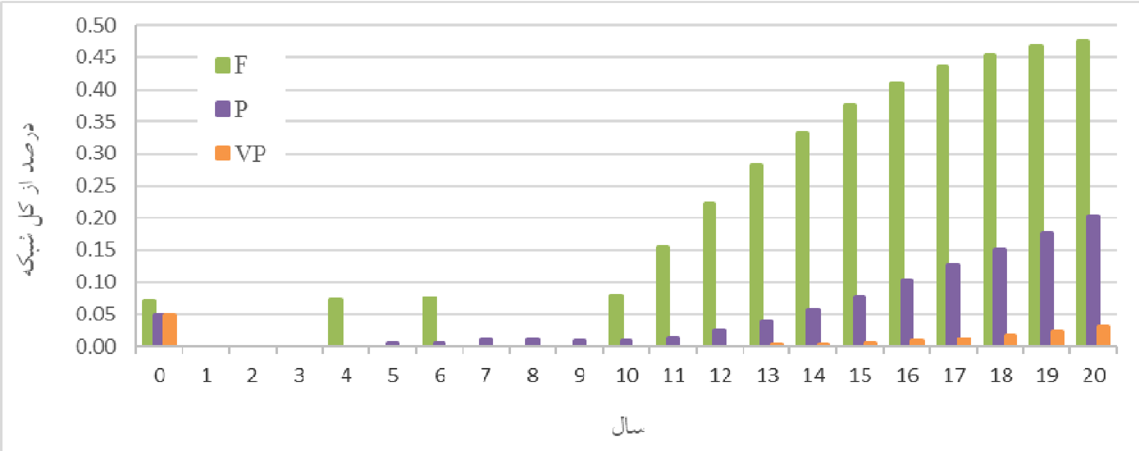
که ردیف‌های مربوط به آنها در جدول ۲ با زمینه تیره از سایر ردیف‌ها متمایز شده است- پیش آمده است؛ یعنی، حل مربوط به $w$ برابر با ۰/۷ نسبت به حل مربوط به $w$ برابر با ۰/٦ غالب است، زیرا مقادیر هر دو تابع هدف $Z_1$ و $Z_2$ به ازای $w$ برابر با ۰/۷ کمتر از مقادیر متناظر آنها به ازای $w$ برابر با ۰/٦ هستند. بنابراین بدیهی است که حل مربوط به $w$ برابر با ۰/٦ باید از لیست اهداف غیرمغلوب حذف شود. در این صورت تمامی حل‌های به‌دست‌آمده در جدول ۲ حل های غیرمغلوبی هستند که هر یک از آنها قابلیت انتخاب توسط تصمیم‌گیر برای اجرا را دارند. در ادامه به برخی از نتایج جزیی‌تر به‌کارگیری مدل ارائه‌شده به ازای $B$ برابر با ۱۰ -که بیشترین تنوع جواب را به همراه دارد- پرداخته می‌شود. نتایج مربوط به $w$ برابر با ۰/۵ -که هم جواب مربوط به آن غیرمغلوب است و هم اهمیت برابری برای هر دو هدف در نظر می‌گیرد- در شکل ۳ آمده است. متغیرهای اصلاح $x_i^t$ برای این حالت به ترتیب در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که این نتایج نشان می‌دهند بکارگیری مدل می‌تواند باعث کنترل وضعیت‌های بحرانی و بدتر از آن به صورت همزمان باشد، و بر خلاف انتظار عمومی (بر این مبنا که باید وضعیت روسازی بد یا بسیار بد برسد تا اقدام به تعمیر یا نوسازی آن کرد)، در سال‌های ۲ تا ۹ (غیر از سال‌های ٤ و ٦) برنامه‌ریزی به سرمایه‌گذاری برای ارتقاء وضعیت F (متوسط) صرف شده است. البته دلیل منطقی‌ای برای آن هم وجود دارد، و آن این است که با سرمایه‌گذاری در وضعیت متوسط در یک سال مشخص می‌توان تا چند سال بعد از آن از وضعیت بد دوری گزید، در حالی که هزینه اقدامات برای وضعیت نسبت به وضعیت بد به طور قابل توجهی کمتر است و هرچه این سرمایه‌گذاری را بتوان زودتر انجام داد بهتر است (جدول ۱ را ببینید).

**جدول۲. نتایج اجرای مدل برای مقادیر مختلف $w$ و $B$**

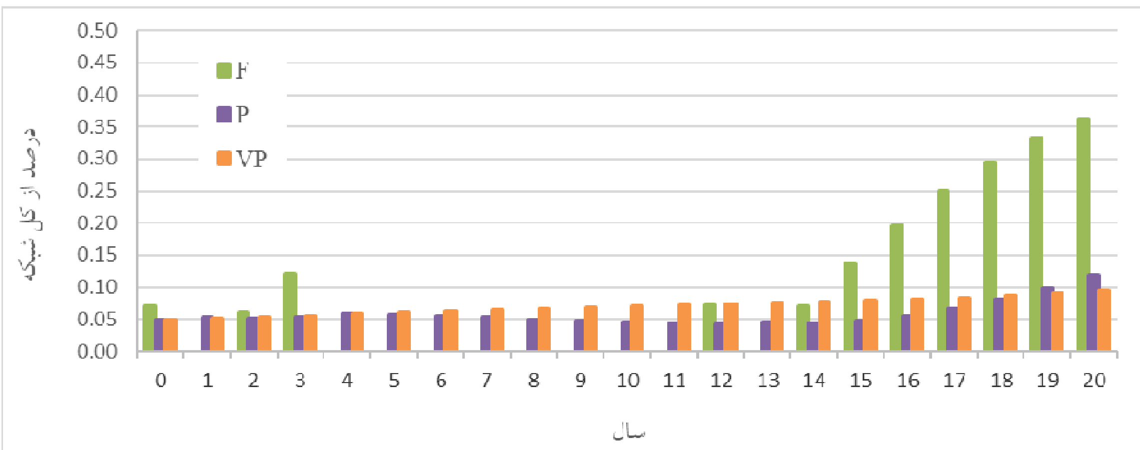
| $Z$ | $Z_2$ | $Z_1$ | $w$ | سطح بودجه |
|---|---|---|---|---|
| 0.0402 | 0.0857 | 11.7830 | 0 | |
| 0.1421 | 0.0857 | 11.7830 | 0.1 | |
| 0.2439 | 0.0857 | 11.7830 | 0.2 | |
| 0.3416 | 0.1258 | 11.1399 | 0.3 | $B$=5 |
| 0.4258 | 0.2214 | 10.1114 | 0.4 | |
| 0.5033 | 0.3129 | 9.5693 | 0.5 | |
| 0.5740 | 0.4644 | 9.0297 | 0.6 | |
| 0.6315 | 0.6648 | 8.5524 | 0.7 | |
| 0.6380 | 1.5636 | 6.8339 | 0.8 | |
| 0.6260 | 1.5636 | 6.8339 | 0.9 | |
| 0.6099 | 1.6592 | 6.7884 | 1 | |
| $Z$ | $Z_2$ | $Z_1$ | $w$ | سطح بودجه |
| 0 | 0 | 9.2349 | 0 | |
| 0.0526 | 0 | 5.8557 | 0.1 | |
| 0.1036 | 0.0214 | 5.3174 | 0.2 | |
| 0.1504 | 0.0214 | 5.3174 | 0.3 | |
| 0.1971 | 0.0214 | 5.3174 | 0.4 | |
| 0.2412 | 0.0985 | 4.8552 | 0.5 | $B$=10 |
| 0.2810 | 0.1131 | 4.8179 | 0.6 | |
| 0.3181 | 0.1105 | 4.8100 | 0.7 | |
| 0.3328 | 1.0791 | 3.2209 | 0.8 | |
| 0.3119 | 1.1193 | 3.2071 | 0.9 | |
| 0.2754 | 1.4369 | 3.0647 | 1 | |
| $Z$ | $Z_2$ | $Z_1$ | $w$ | سطح بودجه |
| 0 | 0 | 3.5067 | 0 | |
| 0.1142 | 0 | 1.5892 | >0,<=0.8 | $B$=15 |
| 0.0926 | 1.0804 | 0.5178 | 0.9 | |
| 0.0465 | 1.0804 | 0.5178 | 1 | |
| $Z$ | $Z_2$ | $Z_1$ | $w$ | سطح بودجه |
| 0 | 0 | 0.2562 | 0 | |
| 0 | 0 | 0 | >0,<=0.9 | $B$=20 |
| 0 | 1.0400 | 0 | 1 | |

**جدول ۳. مقادیر متغیرهای $x_i^t$ با $B=10$ و $w=0.5$**

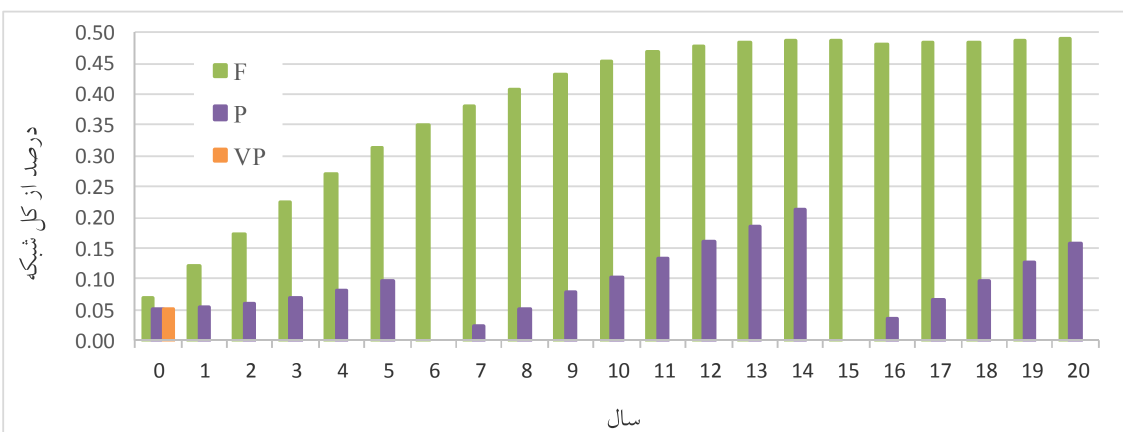
| وضعیت روسازی | | | | | ماتریس X: |
|---|---|---|---|---|---|
| VP | P | F | G | VG | سال |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | سال پایه |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 7 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 8 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 9 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |




شکل ۳. نمایش درصد شبکه در حالات مختلف در ۲۰ سال با $B=10$ و $w=0.5$




شکل ٤. نمایش درصد شبکه در حالات مختلف در ۲۰ سال با به‌کارگیری تابع هدف $Z_1$ و $B=10$




شکل ٥. نمایش درصد شبکه در حالات مختلف در ۲۰ سال با به‌کارگیری تابع هدف $Z_2$ و $B=10$

**جدول ٤. مقادیر متغیرهای $x_i^t$ با $B=10$ و $w=1$**

| VP | P | F | G | VG | ماتریس X: |
|---|---|---|---|---|---|
| وضعیت روسازی | | | | | |
| VP | P | F | G | VG | سال |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | سال پایه |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 6 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 7 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 8 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 9 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 10 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 11 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 13 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |

**جدول ٥. مقادیر متغیرهای $x_i^t$ با $B=10$ و $w=0$**

| VP | P | F | G | VG | ماتریس X: |
|---|---|---|---|---|---|
| وضعیت روسازی | | | | | |
| VP | P | F | G | VG | سال |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | سال پایه |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |

## ٥- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی ارایه شد که می‌توان به وسیله آن برای سرمایه‌گذاری در شبکه‌های بزرگ که قسمت‌های مختلف آن دارای وضعیت‌های روسازی متفاوتی هستند برنامه‌ریزی ارایه کرد. در این روش، پیش‌بینی وضعیت روسازی، که با حالات گسسته بیان می‌شود، به طور همزمان با تخصیص سرمایه بهینه صورت می‌گیرد و این موضوع باعث می‌شود که خطای محاسبات نسبت به مدل‌هایی که ابتدا وضعیت خرابی‌ها را تخمین می‌زنند و سپس به تخصیص سرمایه‌ها برای رفع خرابیهای شبکه می‌پردازند، پایین‌تر آمده و به نتایج مناسب‌تر دست یافته شود. یکی دیگر از نقاط قوت این روش این است که نوع سرمایه‌گذاری‌ها در بخش تعمیرات معمولی و تعمیرات اساسی (نوسازی) قابل تفکیک و اهمیت گذاری از طرف تصمیم‌گیر است. همچنین، در این روش، میزان هزینه مورد نیاز به عنوان یک تابع هدف مجزا در نظر گرفته می شود. از جمله نتایج و خصوصیات اصلی مورد توجه به‌دست آمده از بکارگیری روش حل ترکیبی پیشنهادشده (ترکیب دو روش بهینه‌سازی پارامتریک و توابع حددار) برای حل مسأله سه‌هدفه پیشنهادی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مجموع سهم وضعیت‌های مختلف از کل سطح شبکه در هر سال همواره برابر ۱۰۰ درصد است -این جزء خصوصیات روش پیش‌بینی مارکوفی است- و بنابراین نیازی به تعبیه چنین محدودیتی در مدل ریاضی مسأله نیست. این خصوصیت را می‌توان یکی از مزیت‌های زنجیره مارکوف نسبت به سایر روش‌های پیش‌بینی موجود در ادبیات موضوع دانست. روند انتقال از یک وضعیت به وضعیت‌های بدتر از آن در ابتدا سریع و پس از آن کند می‌شود (شکل ۲ را ببینید). تابع هدف اول (کمینه کردن درصد قسمت‌هایی از شبکه که در حالت بحرانی و بدتر از بحرانی (غیر از بدترین حالت) قرار دارند) و تابع هدف دوم (کمینه کردن درصد قسمت‌هایی از شبکه که در بدترین حالت قرار دارند) در اکثر موارد اجرای مدل (ارائه‌شده در جدول ۲) با یکدیگر همجهت هستند؛ یعنی، با افزایش یکی دیگری نیز افزایش می‌یابد. ولی این موضوع به معنی در تعارض نبودن دو تابع هدف نیست، زیرا در مواردی (مانند یک مورد در جدول ۲) خلاف این موضوع پیش می‌آید. بنابراین، بررسی نامغلوب بودن حل‌ها و در نظرگرفتن دو تابع هدف به صورت مجزا ضروری است. به ازای مقادیر سطوح بودجه خیلی بالا یا خیلی پایین، تنوع جواب‌ها پایین است و جواب‌های بهینه خیلی تغییری نخواهند کرد. تعیین مقدار بهینه سطح بودجه ($B$) با اجراهای مختلف مدل و از طریق تعیین حداکثر

بودجه ممکن به دست می‌آید. بهترین سطح بودجه در این مطالعه حدود نصف حداکثر بودجه ممکن (یعنی ١٠ تقسیم بر ١٩/٨٦٧٥٨) نسبت به مقدار متوسط سطح بودجه ( $B$ برابر با ١٠) به وضوح کمتر است. در صورتی که تابع هدف دوم به تنهایی در نظر گرفته شود، ممکن است سرمایه‌گذاری‌ها در سال‌های ابتدائی به سمتی برود که علاوه بر حالت ٥، حالتهای ٣ و ٤ نیز ارتقا یابند. زیرا قسمتهایی از شبکه که در سالهای ابتدایی در حالات ٣ و ٤ هستند، در سال‌های بعدی به حالت ٥ خواهند رفت و از این رو با توجه به اینکه هزینه ارتقا در حالات ٣ و ٤ کمتر از هزینه نوسازی است، مدل به صرف هزینه در وضعیت‌های دچار خرابی‌های کمتر از حالت ٥ نیز خواهد پرداخت. هرچند این موضوع می‌تواند بیان‌گر نوعی وابستگی بین هدف اول و هدف دوم مدل باشد، اما بکارگیری توابع هدف به صورت جداگانه نوعی عدم وابستگی (وتضاد) بین آن‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین، توصیه می‌شود در کاربردهای واقعی حتماً دو تابع هدف به صورت مستقل در مدل‌سازی وارد شوند. ازجمله مواردی که می‌تواند به عنوان موضوع برای مطالعات آتی معرفی شود، بررسی همبستگی انواع عوامل خرابی‌هایی است که در بخش‌های مختلف شبکه (که در حالات مختلف خرابی قرار دارند) و شاید نوع سرمایه‌گذاری‌ها در آن‌ها با یکدیگر همبستگی داشته باشد و در نظر داشتن این همبستگی‌ها تاثیر بسزایی در تخصیص بهینه منابع داشته باشد. قابل ذکر است که روش اصلاحی ارایه شده، در زنجیره مارکوف مستقل از زمان به کار گرفته شده است، در صورتی که این روش قابل به کارگیری در زنجیره‌های مارکوف ناهمگون نیز می‌باشد؛ این موضوع نیز به عنوان موضوعی جذاب برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌گردد.

## ٦- پی‌نوشت‌ها

1. Ontario Pavement Analysis of Cost (OPAC)
2. Bayesian Technique
3. Goal Programming
4. State
5. Transition Probabilities
6. Transition Probability Matrix
7. Duty Cycle
8. Pavement Condition Index
9. Constraint (ε.constraint) Method
10. Parametric (Weighting or Scalar) Optimization Method
11. Efficient Solution
12. Non.dominated (Non.inferior) Solution
13. Pareto Optimal Solution
14. Modified Swiss Index

## ٧- مراجع


-Abaza, K. A. and Murad, M. M., (2010), “Pavement rehabilitation project ranking approach using probabilistic long-term performance indicators”, Transportation Research Record, Vol. 2153, pp. 3-12.

-Ariaratnam, S. T., El-Assaly, A. and Yang, Y., (2001), “Assessment of Infrastructure Inspection Needs Using Logistic Models”, Journal of Infrastructure Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 160–165.

-Babashamsi, P., Yusoff, N. I. M., Ceylan, H., Nor, N. G. M., and Jenatabadi, H. S., (2016), “Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis”, International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 241-254.

-Chong, D., Wang, Y., Dai, Z., Chen, X., Wang, D., and Oeser, M., (2017), “Multi-objective optimization of asphalt pavement design and maintenance decisions based on sustainability principles and mechanistic-empirical pavement analysis”, International Journal of Sustainable Transportation.

-Costello, S.B., Snaith, M. S., Kerali H. G. R., Tachtsi, L. V. and Ortiz-Garcı´, J. J., (2005), “Stochastic Model for Strategic Assessment of Road Maintenance”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport 158, Issue TR4, November 2005, pp. 203–211.

-Enkhbat, R., Guddat, J., and Chinchuluun, A., (2008), “Parametric Multiobjective Optimization”, In Pareto Optimality, Game Theory and Equilibria, pp. 529-538.

-France-Mensah, J., and O’Brien, W. J., (2018), “Budget Allocation Models for Pavement Maintenance and Rehabilitation: Comparative Case Study”, Journal of Management in Engineering, Vol. 34, No. 2.

-Fwa, T. F., Chan, W. T. and Hoque, K. Z., Williams, D. J., (2017), "Development of a post-flood road maintenance strategy: Case study Queensland, Australia", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 18, No. 8, pp. 702-713.

-Khan, M. U., Mesbah, M., Ferreira, L., and Williams, D. J., (2017), "A case study on pavement performance due to extreme moisture intrusion at untreated layers", International Journal of Pavement Engineering, pp. 1-14.

-Khan, M. U., Mesbah, M., Ferreira, L., and Williams, D. J., (2017), "Estimating pavement's flood resilience", Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, Vol. 143, No. 3.

-Kuhn, K. D. and Madanat, S. M., (2006), "Robust Maintenance Policies for Markovian Systems under Model Uncertainty", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 171–178.

-Li, N., Haas, R., and Huot, M., (1998), "Integer Programming of Maintenance and Rehabilitation Treatments for Pavement Networks", Transportation Research Record, Vol. 1629, pp. 242-248.

-Li, N., Haas, R., and Xie, W., (1997), "Development of a New Asphalt Pavement Performance Prediction Model", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 547-559.

-Li, N., Xie, W-C., and Haas, R., (1996), "Reliability-Based Processing of Markov Chains for Modeling Pavement Network Deterioration", Transportation Research Record, Vol. 1524, pp. 203–213.

-Li, Y., and Madanat, S., (2002), "A steady-state solution for the optimal pavement overlay problem", Transportation Research Part A, Vol. 36, pp. 525–535.

-Meneses, S. and Ferreira, A., (2015), "Flexible pavement maintenance programming considering the minimisation of maintenance and rehabilitation costs and the maximisation of the residual value of pavements", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 16, No. 7, (2000), "Multiobjective Optimization for Pavement Maintenance Programming", Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, No. 5, pp. 367–374.

-Gao, L. and Zhang, Z., (2008), "Robust Optimization for Managing Pavement Maintenance and Rehabilitation", Transportation Research Record, Vol. 2084, pp. 55–61.

-Gao, L., Tighe, S. L. and Zhang, Z., (2007), "Using Markov Process and Method of Moments for Optimizing Management Strategies of Pavement Infrastructure", Presented at 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

-Haas, R., Hudson, R. and Zaniewski, J., (1994), "Modern Pavement Management", Krieger Publishing Co., Malabar.

-He, Z., Qin, X., Wang, H., & Comes, C., (2017), "Implementing Practical Pavement Management Systems for Small Communities: A South Dakota Case Study", Public Works Management & Policy, Vol. 22, No. 4, pp. 378-391.

-Hillermeier, C., (2001), "Nonlinear multiobjective optimization: a generalized homotopy approach", Springer Science & Business Media.

-JianJun, W., YongJian K. and Fu, Z., (2009), "Multi-objective optimization for pavement maintenance and rehabilitation strategies", Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Engineering, Vol. 345, pp. 2919-2924.

-Karan, M., (1977), "Municipal Pavement Management System", Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada.

-Khan, M. U., Mesbah, M., Ferreira, L., and Williams, D. J., (2014), "Developing a new road deterioration model incorporating flooding", In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport (Vol. 167, No. 5, pp. 322-333), ICE Publishing.

-Khan, M. U., Mesbah, M., Ferreira, L., and

-Shahin, M. Y. (1994) "Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lot", Chapman and Hall, New York.

-Tack, J. N. and Chou, Y. J., (2001), Pavement Performance Analysis Applying Probabilistic Deterioration Methods. In Transportation Research Record, Vol. 1769, pp. 20–27.

-Torres-Machi, C., Pellicer, E., Yepes, V., and Chamorro, A., (2017), "Towards a sustainable optimization of pavement maintenance programs under budgetary restrictions", Journal of cleaner production, Vol. 148, pp. 90-102.

-Wang, F., Zhang, Z. and Machemehl, R. B., (2003), "Decision-Making Problem for Managing Pavement Maintenance and Rehabilitation Projects", Transportation Research Record, Vol. 1853, pp. 21–28.

-Wang, K. C. P., Zaniewski, J. and Way, G., (1994), "Probabilistic Behavior of Pavements", ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, No. 3, pp. 358–375.

-Yang, J., Lu, J. J., Gunaratne, M. and Dietrich, B., (2006), "Modeling Crack Deterioration of Flexible Pavements: Comparison of Recurrent Markov Chains and Artificial Neural Networks", Transportation Research Record, Vol. 1974, pp. 18–25.

-Yepes, V., Torres-Machi, C., Chamorro, A., and Pellicer, E., (2016), "Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid greedy randomized adaptive search procedure algorithm", Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 22, No. 4, pp. 540-550.

pp. 571-586.

-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.

-Nasseri, S., Gunaratne, M., Yang, J. and Nazef, A., (2009), "Application of Improved Crack Prediction Methodology in Florida's Highway Network", Transportation Research Record, Vol. 2093, pp. 67–75.

-Ndume, V. A., and Mlavi, E., (2017), "Computational Model for Allocating the Road Pavement Funds between Implementing Units: Case Study in Tanzania", International Journal of Computer Applications, Vol. 161, No. 1, pp. 11-16.

-Ross, S. M., (1994), "A first Course in Probability", Collier Macmillan, London.

-Saha, P., Ksaibati, K., & Atadero, R., (2017), "Developing Pavement Distress Deterioration Models for Pavement Management System Using Markovian Probabilistic Process", Advances in Civil Engineering, pp. 1-9.

-Salini, R., Xu, B., and Lenngren, C. A., (2015), "Application of artificial intelligence for optimization in pavement management", International Journal of Engineering and Technology Innovation, Vol. 5, No. 3, pp. 189-197.

-Santos, J., Ferreira, A., and Flintsch, G., (2017), "A multi-objective optimization-based pavement management decision-support system for enhancing pavement sustainability", Journal of Cleaner Production, Vol. 164, pp. 1380-1393.

# A Tri-objective Resource Allocation Model for Pavement Rehabilitation by Hybridization of Parametric and Constraint Methods

*M. Babaei, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.*

*E-mail: m.babaei@basu.ac.ir*

Received: September 2019-Accepted: December 2019

**ABSTRACT**

One of the important issues in road pavement management is the allocation of resource in different parts of the network in order to maintain the pavement conditions at desired levels. In this paper, a tri-objective model is proposed for this purpose, the objective functions of which are: 1) to minimize the proportion of the network that are in “critical” and worse-critical conditions (other than the “worst” condition), on which some improvement measures should be performed to reach a desired condition; (2) to minimize the proportion of the network that is in “worst” condition, and, in order to bring it to a desired condition, it should take renovation measures; and (3) to minimize the total cost incurred due to the maintenance and rehabilitation measures made during the entire planning period. To solve the tri-objective model, a hybrid method is proposed using multi-objective parametric optimization and ε-constraint methods. The results of the application of the model show that despite the mental imagination at first glance, the first and second objective functions may have conflict, so that increasing one of them may lead to decreasing the other; therefore, these two objectives cannot be considered together as a single objective function. One of the important features of the proposed method is that the Markov Chain process model, as the prediction tool for the pavement condition, is incorporated into the optimization model. This makes the pavement condition prediction and resource allocation simultaneously and prevents achieving local optimal solutions.

**Keywords:** Multi-objective Programming, Resource Allocation, Pavement Maintenance and Rehabilitation, Markov Chain Process