

## تحلیل ریسک در اولویت‌بندی و بهینه‌یابی ضخامت روکش در تعمیر روسازی

## مقاله علمی - پژوهشی

مهدی قدرت آبادی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

محمد یکرنگ‌نیا\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: yekrangnia@sru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

صفحه ۱۳۴-۱۲۱

## چکیده

طراحی روسازی در روش قابلیت اعتماد بر مبنای سطح اطمینانی که در آیین‌نامه‌ها پیشنهاد گردیده انجام می‌شود. در این روش با توجه به مقاومت و وضعیت حال حاضر روسازی، طراحی صورت گرفته و حجم تعمیر مورد نیاز احتمالی در دوره بعدی در نظر گرفته نمی‌شود. در این مطالعه روشی به‌منظور تعمیر روسازی ارائه شده که علاوه بر در نظرگیری وضعیت موجود روسازی، به پیامدهای حاصل از تخریب و بازسازی آن توجه می‌شود. برای در نظرگیری این پیامدها از روش‌های تحلیل ریسک استفاده شد و با توجه به میزان تعمیر حال حاضر روسازی و نرخ تورم، هزینه‌های دوره بعدی تعمیر در آینده تخمین زده شد. برای مقایسه این دو روش، داده‌های وضعیت روسازی و ترافیک عبوری در محور قم-سلفچکان جمع‌آوری و مناسب‌ترین توزیع احتمال متغیرها به کمک آزمون اندرسون-دارلینگ تعیین گردید. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید روش پیشنهادی، روسازی را با سطح اطمینان بیشتری در مقایسه با روش مرسوم آیین‌نامه‌ای طراحی می‌کند. همچنین هزینه کلی تعمیر روسازی در روش پیشنهادی کمتر از روش قابلیت اعتماد است. در نتیجه از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر بوده و باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. در ادامه به کمک روش‌های تحلیل ریسک و در نظرگیری تغییرپذیری در متغیرها، قطعات روسازی اولویت‌بندی شدند. اولویت‌بندی بر این اساس بوده که به ازای هر تومان هزینه برای تعمیر قطعات روسازی، کدامیک تأثیری بیشتری بر احتمال شکست و ریسک کل مسیر دارد. نتایج این روش به تصمیم‌گیران ذی‌ربط این امکان را داده که هزینه‌های حال حاضر و دوره بعدی تعمیر در آینده را پیش‌بینی کرده و برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای تخصیص بودجه تعمیر و نگهداری انجام دهند.

واژه‌های کلیدی: اولویت‌بندی، بهینه‌یابی، تعمیر و نگهداری روسازی انعطاف‌پذیر، تحلیل ریسک، قابلیت اعتماد

## ۱-مقدمه

حاصل از شکست و تخریب روسازی نیز در نظر گرفته می‌شود. در واقع در روش‌های قابلیت اعتماد هدف این بوده که روسازی در سطح اطمینانی که توسط آیین‌نامه‌ها پیشنهاد گردیده طراحی شود. درحالی‌که در روش‌های طراحی ریسک به پیامدهایی که ممکن است در اثر شکست یا تخریب روسازی در آینده رخ دهد نیز توجه می‌شود. در این تحقیق به کمک روش‌های تحلیل ریسک هزینه‌های حال حاضر و دوره بعدی تعمیر روسازی در آینده تخمین زده شد و میزان هزینه تعمیر بهینه‌یابی گردید. با توجه به این‌که هزینه‌های تعمیر و ساخت مجدد راه بالا بوده و میزان بودجه اختصاص یافته

طراحی روسازی به کمک روش‌های قابلیت اعتماد به‌گونه‌ای انجام می‌شود که احتمال شکست مسیر از یک مقدار مشخصی فراتر نرود. آیین‌نامه‌ها مقدار سطح اطمینان و احتمال شکست را با توجه عوامل مختلفی مانند طبقه‌بندی نوع راه پیشنهاد می‌دهند. در این روش‌ها قطعات روسازی با توجه به وضعیت و خرابی‌های موجود تعمیر می‌شوند؛ درحالی‌که ممکن است روسازی تا فرا رسیدن دوره بعدی تعمیر در سال‌های آینده، خسارت زیادی دیده و هزینه زیادی صرف تعمیر و حتی بازسازی آن شود. در روش‌های طراحی بر مبنای ریسک علاوه بر در نظر گرفتن سطح اطمینان، پیامدهای

به ترتیب فاصله زمانی بهینه عملیات پیشگیرانه افزایش و کاهش پیدا می‌کند.

دوانگ هو و همکاران (Wu, Yuan and Liu, 2017)

یک روش بهینه‌سازی عملیات پیشگیرانه در طول عمر روسازی مبتنی بر هزینه و عملکرد را ارائه کرده‌اند روش پیشنهاد شده بر اساس تحلیل ریسک بوده و عدم قطعیت متغیرها را در تحلیل چرخه عمر روسازی<sup>۱</sup> در نظر می‌گیرد. در این پژوهش علاوه بر هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی هزینه‌های غیرمستقیم که کاربران در استفاده از راه متحمل شده‌اند نیز در نظر گرفته شده است.

دشپانده و همکاران (Deshpande, Damjanovic and Gardoni, 2010)

مدل بهینه‌سازی برای زمان‌بندی تعمیر روسازی انعطاف‌پذیر بر پایه روش قابلیت اعتماد ارائه دادند. در این مدل از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده گردیده تا هم‌زمان با افزایش سطح اطمینان، هزینه‌های تعمیر روسازی کاهش یابد.

سانچز-سیلوا و همکاران (Sanchez-silva et al., 2005)

مدل بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اعتماد برای طراحی روسازی انعطاف‌پذیر ارائه داده که سیاست نگهداری طولانی مدت آن را در نظر می‌گیرد. در این تحقیق نرخ تورم در محاسبه هزینه‌ها در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد که این عامل تأثیر قابل توجهی بر طراحی روسازی دارد؛ به طوری که با افزایش نرخ تورم مقدار ضخامت لایه‌ها در طراحی روسازی کاهش پیدا می‌کند.

راجبونگشی و داس (Rajbongshi and Das, 2008)

روشی بهینه برای طراحی روسازی انعطاف‌پذیر پیشنهاد کردند که هزینه و سطح اطمینان طراحی را در نظر می‌گیرد و با کاهش هزینه ساخت راه سعی بر طراحی روسازی با سطح اطمینان مناسب دارد.

زانویوسکی و ریگل (Reigle and Zaniewski, 1816)

مدلی برای طراحی و مدیریت روسازی با در نظرگیری ریسک در تحلیل چرخه عمر روسازی ارائه کردند. این پژوهش با در نظرگیری کیفیت روسازی، مقاومت در برابر لغزش و ظرفیت سازه‌ای در فرآیند طراحی به هر دو جنبه عملکردی و ایمنی پرداخته است. در مدل پیشنهادی هزینه‌های کاربران با پیش‌بینی تصادفات و تأخیر به وجود آمده ناشی از آن در نظر گرفته شده است. در پژوهش سالم و همکاران (Salem, AbouRizk and Ariaratnam, 2003)

روش جدیدی برای تخمین هزینه‌های چرخه عمر و ارزیابی گزینه‌های تعمیر روسازی پیشنهاد شده است. برای این کار از روش مبتنی بر ریسک برای پیش‌بینی احتمال وقوع هزینه‌های مختلف چرخه عمر در تعمیر یا ساخت راه استفاده شد.

جهت مدیریت روسازی نیز محدود است، اولویت‌بندی در تعمیر و نگهداری قطعات روسازی امری حیاتی می‌باشد. روش‌های اولویت‌بندی معمولاً تنها به وضعیت و هزینه‌های حال حاضر روسازی توجه دارند؛ در صورتی که علاوه بر این موارد هزینه‌های تعمیر روسازی و وضعیت آن در آینده نیز بر این فرآیند تأثیرگذار است. با توجه به تغییرپذیری متغیرهایی چون ترافیک، تخمین هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی جهت اولویت‌بندی همراه با عدم قطعیت است. در این تحقیق سعی شده به کمک روش‌های تحلیل ریسک که تغییرپذیری در متغیرها را در نظر گرفته، قطعات روسازی را برای تعمیر و نگهداری اولویت‌بندی کرد. همچنین اولویت‌بندی تنها با توجه به هزینه‌های حال حاضر روسازی نبوده و هزینه‌های دوره بعدی تعمیر روسازی در آینده نیز در نظر گرفته شده است.

در این مقاله در ابتدا مروری بر مطالعات پیشین مرتبط با موضوع تحقیق انجام می‌شود. در ادامه، خلاصه‌ای از اهداف و چشم‌انداز پژوهش بیان گردیده و در بخش بعدی به تشریح روش تحقیق پرداخته می‌شود. مطالعه موردی در بخش بعدی و نتایج تحقیق در بخش آخر ذکر شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

مندز و غرایبه (Menendez and Gharaibeh, 2017)

به ارزیابی ریسک در برنامه مدیریت روسازی در سطح شبکه با در نظرگیری عدم قطعیت در متغیرها پرداخته‌اند. ارزیابی ریسک به کمک روش شبیه‌سازی مونت کارلو صورت گرفته و نتایج نشان می‌دهد که عدم قطعیت در پیش‌بینی عملکرد و هزینه‌های عملیات تعمیر و نگهداری بیشترین تأثیر را بر ریسک عملکرد روسازی در سطح شبکه در طول یک دوره برنامه‌ریزی چندساله دارد.

هان و همکاران (Han et al., 2018)

فواصل زمانی بین عملیات پیشگیرانه در روسازی انعطاف‌پذیر را با در نظرگیری عدم قطعیت در متغیرها بهینه‌سازی کردند. هرچه فاصله زمانی بین عملیات پیشگیرانه بیشتر شود احتمال خرابی روسازی افزایش پیدا کرده و هزینه تعمیر روسازی در آینده بیشتر می‌شود. در مقابل اگر فاصله زمانی بین عملیات پیشگیرانه کمتر شود، نیاز به تعمیر روسازی کمتر شده ولی تعداد و هزینه عملیات پیشگیرانه افزایش پیدا می‌کند. مطابق نتایج این تحقیق فاصله زمانی بهینه عملیات پیشگیرانه روسازی هفت سال است. تحلیل حساسیت نشان داد که با افزایش هزینه عملیات پیشگیرانه و هزینه تعمیر روسازی

تعمیر و نگهداری روسازی ارائه کرده‌اند. در این پژوهش علاوه بر وضعیت روسازی به خرابی شیب کنار جاده در اولویت‌بندی توجه شده است. وضعیت شیب کنار جاده می‌تواند عامل مهمی در وضعیت راه به‌خصوص در مناطق کوهستانی باشد. تجزیه و تحلیل GIS نشان می‌دهد که هر دو عامل وضعیت روسازی و شیب کنار جاده را می‌توان ادغام کرد تا از این رویکرد جهت بهبود مدیریت و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری روسازی استفاده کرد.

در این تحقیق داده‌های واقعی برای یک محور از شبکه راه‌های ایران جمع‌آوری شد. سپس مشخصات و توزیع احتمال متغیرهای طراحی به کمک آزمون اندرسون-دارلینگ تعیین گردید. به کمک تحلیل ریسک روش جدیدی برای اولویت‌بندی قطعات روسازی ارائه شده که عدم قطعیت و تغییرپذیری متغیرها را در نظر می‌گیرند. در این روش اولویت‌بندی بر اساس تأثیر تعمیر هر کدام از قطعات روسازی بر احتمال شکست و ریسک کلی مسیر انجام شده است. ادامه رویکرد نوینی برای بهینه‌سازی حجم تعمیر روسازی پیشنهاد شد. بهینه‌سازی بر اساس دو عامل هزینه‌های حال حاضر تعمیر روسازی و هزینه‌های دوره بعدی تعمیر در آینده انجام می‌شود. به کمک تحلیل ریسک پیش‌بینی شده است.

در این مطالعه روشی جهت اولویت‌بندی در تعمیر و نگهداری قطعات روسازی و مشخص کردن حجم تعمیر بهینه هر قطعه به کمک تحلیل ریسک ارائه گردید. به‌وسیله داده‌های جمع‌آوری شده مطالعه موردی بر روی محور قم-سلفچگان انجام و نتایج آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین اهداف این تحقیق عبارتند از:

- تخمین هزینه‌های دوره بعدی تعمیر و نگهداری روسازی در آینده با توجه به میزان تعمیر انجام شده در دوره حاضر.

- بهینه‌یابی حجم تعمیر بر اساس هزینه‌های حال حاضر و آینده روسازی.

- مقایسه و تحلیل نتایج روش ارائه شده در این تحقیق با روش قابلیت اعتماد در تعمیر روسازی.

- اولویت‌بندی قطعات روسازی جهت تعمیر و نگهداری بر اساس تأثیر آن بر احتمال شکست و ریسک کل مسیر.

- پیش‌بینی میزان بودجه مورد نیاز برای تعمیر و نگهداری روسازی در دوره حاضر و دوره بعدی آن.

در ادامه روش پیشنهادی بر روی شبکه بزرگراه‌های ایالت آلبرتا در کانادا اجرا گردید.

چوتانیا و همکاران (Chootinan et al., 2006) به ارائه روشی برای برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری چندساله روسازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در متغیرها پرداختند. برای برنامه‌ریزی تعمیر روسازی از رویکرد الگوریتم مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در نظر نگرفتن عدم قطعیت موجب تخمین دست پایین بودجه تعمیر و نگهداری و برآورد بیش از حد عملکرد روسازی در سال‌های آینده می‌شود. مطالعات مختلفی برای اولویت‌بندی تعمیر و نگهداری راه‌ها انجام شده است. در تحقیق سیسواتو و همکاران (Siswanto et al., 2019) با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۲</sup> به تعیین اولویت‌بندی تعمیر و نگهداری راه‌ها پرداخته شد. از چهار معیار شرایط جاده، ترافیک، کاربری زمین و شرایط اقتصادی در تحلیل سلسله مراتبی استفاده گردید. این روش می‌تواند تفاوت را در وزن معیارهای مختلف در نظر گرفته و حتی معیارهای جدیدی را در طراحی در نظر بگیرد.

جنانی و همکاران (Janani et al., 2020) روش جدیدی برای اولویت‌بندی در تعمیر و نگهداری روسازی بر اساس مشخصات و ویژگی‌های عملکردی روسازی ارائه کرده‌اند. استفاده از مشخصات ساختاری راه‌ها در اولویت‌بندی نیازمند آزمایش‌های پرهزینه، وقت‌گیر و مختل‌کننده ترافیک است. در نتیجه روش پیشنهادی در این تحقیق به دلیل این‌که فقط از ویژگی‌های عملکردی روسازی جهت اولویت‌بندی استفاده کرده از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر است. به کمک شبکه عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> رابطه بین ویژگی‌های عملکردی و ساختاری بررسی و مشاهده گردید که رابطه قوی بین این دو عامل وجود دارد.

احمد و همکاران (Ahmed, Vedagiri and Krishna Rao, 2017) روش جدیدی برای رفع مشکلات فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در اولویت‌بندی تعمیر و نگهداری روسازی پیشنهاد دادند. روش پیشنهادی با روش سنتی اولویت‌بندی با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در ۲۸ قطعه روسازی در بمبئی هند مقایسه گردید. به کمک آزمون فرض آماری مشاهده شد که همبستگی قوی بین این دو روش وجود دارد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای اولویت‌بندی در تعمیر و نگهداری روسازی مناسب است.

راج پانتا و همکاران (Pantha, Yatabe and Bhandary, 2010) مدلی مبتنی بر GIS<sup>۴</sup> برای اولویت‌بندی

## ۳-روش تحقیق

سال‌های آینده با انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو در زبان برنامه‌نویسی R به دست آمد.

## ۳-۱-اولویت‌بندی در تعمیر و نگهداری

به دلیل بالا بودن هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی و محدود بودن بودجه، نیاز است قطعات مسیر به‌درستی اولویت‌بندی گردند. از طرفی می‌دانیم که قطعات راه به هم پیوسته بوده و اگر یک قطعه از مسیر (به‌خصوص در راه‌های برون‌شهری) تخریب گردد کل راه مسدود گشته و امکان جابه‌جایی تا زمان تعمیر یا بازسازی روسازی میسر نیست. در نتیجه وضعیت هر قطعه بر احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد کل مسیر تأثیرگذار است. در این تحقیق سعی شده قطعاتی که تأثیر بیشتری بر ریسک و احتمال شکست کل مسیر گذاشته با اولویت بیشتری تعمیر شوند.

محصولی و هاوکاس (Mahsuli and Haukaas, 2013b)

از شاخص  $\frac{\partial \beta}{\partial C}$  برای اولویت‌بندی مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر زلزله استفاده کردند که  $\beta$  شاخص قابلیت اعتماد و  $C$  هزینه مقاوم‌سازی است. در آن تحقیق ساختمان‌ها به‌وسیله شاخص  $\frac{\partial \beta}{\partial C}$  به ترتیبی برای مقاوم‌سازی اولویت‌بندی شده‌اند که بیشترین تأثیر بر شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست داشته‌اند. در رابطه (۱) ارتباط بین شاخص قابلیت اعتماد ( $\beta$ ) و احتمال شکست ( $P_f$ ) نشان داده شده است. که در آن  $\Phi$  تابع توزیع تجمعی استاندارد نرمال می‌باشد.

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (1)$$

به کمک شاخص  $\frac{\partial \beta}{\partial C}$  می‌توان قطعات راه را با توجه به هزینه‌های حال حاضر و آینده اولویت‌بندی کرد. این شاخص نشان‌دهنده این است که به ازای هر تومان هزینه جهت تعمیر و نگهداری قطعات روسازی چقدر احتمال شکست کل مسیر کاهش می‌یابد.

$$\frac{\partial \beta}{\partial C} = \frac{\partial \beta}{\partial d} \times \frac{\partial d}{\partial C} \quad (2)$$

گردیده محاسبه کرد. مقدار  $\frac{\partial \beta}{\partial d}$  به‌وسیله نرم‌افزار Rtx و تحلیل قابلیت اعتماد FORM قابل محاسبه است (Mahsuli, 2012). برای تحلیل FORM در محاسبه  $\frac{\partial \beta}{\partial d}$  نیاز است تابع حالت حدی بر اساس هزینه‌ها تعریف گردد. در رابطه (۳) این تابع حالت حدی قابل مشاهده است.

$$g = C_0 - C \quad (3)$$

در این پژوهش پارامترهای تأثیرگذار در طراحی روسازی به‌صورت تغییرپذیر در نظر گرفته شده و بعد از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز، توزیع احتمال مناسب هر متغیر به‌وسیله آزمون اندرسون-دارلینگ در نرم‌افزار Minitab تعیین گردید. به کمک تحلیل ریسک، بودجه مورد نیاز جهت تعمیر و نگهداری مسیر تخمین زده شد. این محاسبات تنها محدود به هزینه اولیه نبوده و شامل هزینه‌های تعمیر به دلیل خسارت وارده به روسازی در آینده نیز است. تخمین هزینه‌های آینده تعمیر روسازی دارای عدم قطعیت بوده به همین دلیل عوامل تأثیرگذار بر آن به‌صورت تغییرپذیر و دارای توزیع احتمال در نظر گرفته شده است. با انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو در زبان برنامه‌نویسی R این هزینه‌ها محاسبه گردید. به کمک هزینه‌های به دست آمده از تحلیل ریسک و بودجه اختصاص داده شده، قطعات روسازی برای تعمیر و نگهداری اولویت‌بندی شدند که این کار در نرم‌افزار Rtx انجام گردید (Nasrazadani (Mahsuli and Haukaas, 2013a) (Mahsuli, 2012) and Mahsuli, 2020). هر قطعه از روسازی که به ازای هر تومان هزینه جهت تعمیر و نگهداری، احتمال شکست کل مسیر را کاهش بیشتری دهد اولویت بالاتری در تعمیر و نگهداری دارد. بعد از اولویت‌بندی قطعات، نیاز است میزان تعمیر و نگهداری روسازی نیز به‌صورت بهینه‌ای تعیین گردد. این مقدار با کمینه کردن مجموع هزینه اولیه و هزینه‌های تعمیر در

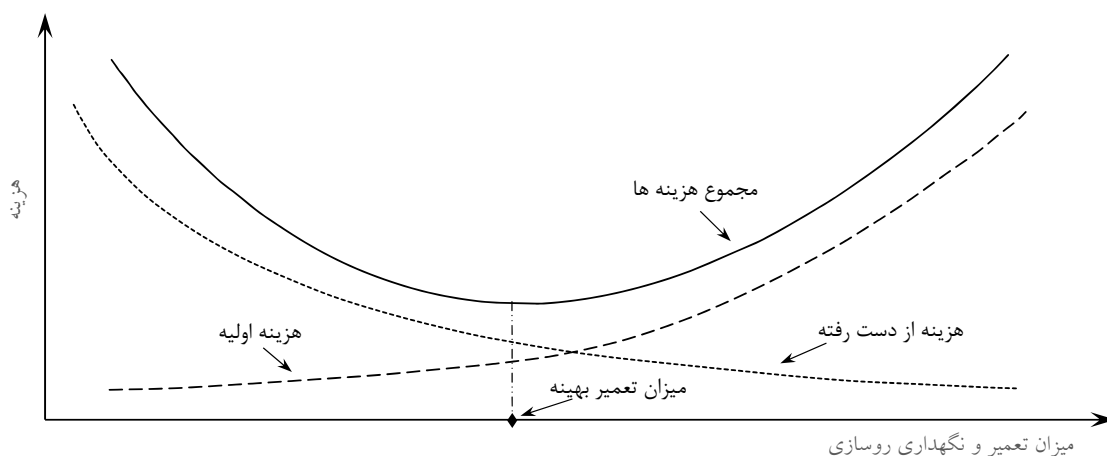
به کمک رابطه (۲) می‌توان مقدار  $\frac{\partial \beta}{\partial C}$  برای هر قطعه از مسیر محاسبه کرد که  $d$  ضخامت موردنیاز روکش برای تعمیر روسازی است. منظور از  $\frac{\partial C}{\partial d}$  این است که به ازای افزایش هر سانتی‌متر ضخامت روکش در تعمیر یک مترمربع از مساحت روسازی چه مقدار هزینه‌ها افزایش می‌یابد. این مقدار را می‌توان با توجه به قیمت واحد ضخامت روکش در فهرست‌بها و یا پروژه‌هایی که اجرا

### ۳-۲- بهینه‌یابی تعمیر روسازی

در قسمت قبل نحوه اولویت‌بندی قطعات روسازی برای تعمیر و نگهداری توضیح داده شد. بعد از آن‌که مشخص گردید کدام قطعات اولویت بیشتری برای تعمیر و صرف بودجه داشته، نیاز است میزان تعمیر و نگهداری به‌صورت بهینه تعیین گردد. معمولاً تعمیر و نگهداری با توجه وضعیت و خرابی‌های موجود در روسازی انجام می‌شود. در صورتی که میزان تعمیر روسازی در حال حاضر بر وضعیت و میزان تعمیر آن در آینده نیز تأثیرگذار است. در شکل ۱ هزینه‌های انجام شده نسبت به میزان تعمیر اولیه روسازی رسم شده است. هزینه اولیه روسازی ( $C_1$ ) با توجه به خرابی‌ها و وضعیت موجود راه به دست می‌آید. درحالی‌که هزینه از دست رفته ( $C_2$ ) بر اساس وضعیت روسازی در سال‌های آینده و دوره بعدی تعمیر آن تخمین زده می‌شود.

که  $C_0$  میزان بودجه اختصاص یافته جهت تعمیر و نگهداری و  $C$  هزینه‌های ناشی از خسارت وارده بر روسازی است. پارامتر  $C$  تنها شامل هزینه تعمیر اولیه روسازی نبوده و هزینه‌ای که ممکن است در آینده رخ دهد نیز در نظر گرفته شده است. در نتیجه این پارامتر از جمع هزینه اولیه ( $C_1$ ) و هزینه از دست رفته ( $C_2$ ) به دست می‌آید که محاسبات آن در بخش ۴-۲ تشریح می‌گردد. با انجام تحلیل قابلیت اعتماد بر روی تابع حالت حدی در رابطه (۳) احتمال فراتر رفتن میزان هزینه‌ها از بودجه اختصاص یافته قابل محاسبه است. با توجه به تغییرپذیری و عدم قطعیت در متغیرها احتمال داشته که خسارت روسازی بیشتر از پیش‌بینی اولیه بوده و بودجه اختصاص یافته نیز کافی نباشد.

هر چه مقدار  $\frac{\partial \beta}{\partial C}$  برای هر قطعه از مسیر بیشتر بوده صرف هزینه برای تعمیر آن تأثیر زیادتری در کاهش احتمال خرابی و ریسک کل راه دارد.



شکل ۱. نمودار هزینه‌ها نسبت به میزان تعمیر و نگهداری روسازی

نقطه میزان تعمیر و نگهداری بهینه است. اگر میزان تعمیر روسازی از حالت بهینه آن بیشتر شود، هزینه کل افزایش پیدا می‌کند. در واقع در این حالت  $C_1$  زیاد بوده و هزینه زیادی صرف تعمیر اولیه روسازی می‌شود و به دلیل مقاومت اولیه زیاد آسیب روسازی در سال‌های آینده و  $C_2$  کاهش پیدا می‌کند. با این حال این امر موجب افزایش هزینه کل می‌شود. هدف از این پژوهش بهینه کردن حجم تعمیر و نگهداری روسازی با توجه مقدار هزینه‌ها به کمک روش تحلیل ریسک است. برای انجام تحلیل ریسک از شبیه‌سازی

مطابق شکل ۱ زمانی که میزان تعمیر روسازی کم بوده، هزینه اولیه ( $C_1$ ) ناچیز است ولی هزینه از دست رفته ( $C_2$ ) زیادتر می‌شود. این امر به این دلیل است که روسازی مقاومت کمی در برابر بارهای وارده داشته و ممکن است تا دوره بعدی تعمیر و نگهداری آن به‌طور کامل تخریب و نیاز به بازسازی داشته باشد. هرچه حجم تعمیر افزایش پیدا کند هزینه اولیه ( $C_1$ ) افزایش پیدا کرده و راه مقاومت بیشتری دارد؛ در نتیجه آسیب کمتری در برابر بار وارده تا دوره بعدی تعمیر آن می‌بیند. همچنین مقدار هزینه کل ( $C$ ) نیز کاهش پیدا می‌کند تا به کمترین مقدار خود می‌رسد که این

به کمک رابطه (۴) می‌توان هزینه کلی تعمیر و نگهداری روسازی را محاسبه کرد.

$$C = C_1 + \frac{C_2}{i}$$

تعمیر روسازی در دوره بعدی تعمیر و نگهداری است و محاسبه آن از رابطه (۵) می‌توان استفاده کرد.

$$C_2 = P_f * C_f = \frac{W_{18}}{W_{t18}} * C_f$$

مقاومت روسازی قبل از تعمیر است.  $W_{18}$  مجموع بار وارد بر روسازی تا دوره بعدی تعمیر و نگهداری آن است که از رابطه (۶) برای محاسبه آن استفاده می‌شود [۱].

$$w_{18} = ADT * T * T_f * D * L * 365 * \left( \frac{(1+r)^Y - 1}{r} \right)$$

دسته چهارم اتوبوس و دسته پنجم تریلرها و باربرهای بالاتر از سه محور را شامل می‌شود. برای هر کدام از دسته‌ها مقدار ADT برای یک سال جمع‌آوری شد. مقدار رشد ترافیک نیز با استفاده از اطلاعات ترافیکی سال قبل محاسبه گردید.

مطابق رابطه (۵) هر چه میزان تعمیر اولیه روسازی و هزینه ناشی از آن بیشتر شود ( $C_1$ )، مقدار  $W_{t18}$  که نشان‌دهنده مقاومت روسازی در حالت موجود بوده بیشتر شده و در نتیجه مقدار کسر  $\frac{W_{18}}{W_{t18}}$  کمتر می‌شود. به تبع آن میزان هزینه موردنیاز روسازی در آینده ( $C_2$ ) نیز کاهش پیدا می‌کند.

نگهداری در سال‌های آینده است. به همین دلیل نیاز است مطابق رابطه (۴) با در نظر گرفتن نرخ تورم، هزینه‌های از دست رفته را تبدیل به هزینه‌های معادل آن در آینده کرد. به کمک رابطه (۷) می‌توان نرخ تورم ( $i$ ) را محاسبه کرد.

$$i = \exp(-r * t)$$

مانند زمان تسویه وام بستگی داشته و به‌طور متوسط در ایران ۱۸ درصد است. به دلیل عدم قطعیت در این متغیر، یک توزیع نرمال با میانگین ۱۸ درصد و ضریب تغییرات ۹ درصد برای آن فرض می‌شود.

مونت‌کارلو در زبان برنامه‌نویسی R استفاده شد تا تغییرپذیری متغیرها در نظر گرفته شود.

(۴)

$C_1$  هزینه اولیه تعمیر روسازی بوده و با توجه به میزان تعمیر و نگهداری روسازی در حال حاضر به دست می‌آید.  $i$  نرخ تورم است و نحوه محاسبه آن در بخش ۳-۴ تشریح می‌گردد.  $C_2$  هزینه

(۵)

در این رابطه  $C_f$  هزینه شکست یا بازسازی دوباره مسیر است.  $W_{t18}$  مقدار باری است که روسازی بعد از تعمیر و نگهداری اولیه آن می‌تواند تحمل کند و وابسته به دو عامل میزان تعمیر اولیه و

(۶)

در این رابطه  $r$  نرخ رشد سالیانه ترافیک،  $Y$  دوره طراحی روسازی برحسب سال  $ADT^1$  متوسط ترافیک روزانه،  $T$  درصد کامیون عبوری در مقدار  $T_f * ADT$  ضریب بار هم‌ارز محور منفرد ۸/۲ تنی (۱۸ kip)،  $L$  ضریب توزیع ترافیک در خط طراحی و  $D$  ضریب توزیع ترافیک در هر جهت است. پارامترهای  $ADT$  و  $r$  تغییرپذیر فرض گردیده و دارای توزیع احتمال است. بقیه پارامترها به‌صورت ثابت و بدون توزیع احتمال در نظر گرفته شده‌اند. برای محاسبه متوسط ترافیک روزانه، وسایل نقلیه به ۵ دسته تقسیم شدند. دسته اول سواری و وانت، دسته دوم کامیونت و مینی‌بوس، دسته سوم کامیون‌های معمولی کمتر از ۱۰ متر و سه محوره‌ها،

### ۳-۳-۳- نرخ تورم

با توجه به اینکه هزینه از دست رفته مربوط به تعمیر روسازی در دوره بعد تعمیر و نگهداری بوده باید هزینه‌های آن را با توجه به قیمت مصالح در سال‌های آینده به دست آوریم. هزینه از دست رفته ( $C_2$ ) با توجه به قیمت مصالح در حال حاضر به دست آمده است. در صورتی که این هزینه‌ها مربوط به دوره بعدی تعمیر و

(۷)

در این رابطه  $t$  فاصله زمانی (برحسب سال) تا دوره بعدی تعمیر و نگهداری در آینده است. پارامتر  $r$  نرخ بهره بانکی بوده و برای محاسبه آن فرض کرده که اگر وامی از بانک برای تعمیر روسازی در حال حاضر گرفته شده، باید با چه سودی تا دوره بعدی تعمیر این وام به بانک پس داده شود. نرخ بهره بانکی به عوامل مختلفی

## ۴- مطالعه موردی

## ۴-۱- جمع‌آوری داده‌ها

برای محاسبه ضخامت هر لایه نیز از آزمایش  $GPR^{\wedge}$  استفاده گردید. مشخصات داده‌های جمع‌آوری شده به‌طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

در این بخش مطالعه‌ای موردی بر روی داده‌های محور قم-سلفچگان از شبکه‌های راه‌های ایران انجام گردید. طول کل محور حدود ۳۵/۸ کیلومتر بوده و دارای روسازی انعطاف‌پذیر با ۳ لایه است. آزمایش  $FWD^{\vee}$  در فواصل ۰/۲ کیلومتری انجام گردیده و

جدول ۱. مشخصات محور قم-سلفچگان

محور	طول راه (کیلومتر)	تعداد نقاط برداشت‌شده	فاصله برداشت (کیلومتر)	ضخامت آسفالت (سانتی‌متر)	ضخامت اساس (سانتی‌متر)
قم-سلفچگان	۳۵/۸	۱۷۶	۰/۲	۲۵	۲۹

اندرسون-دارلینگ و مشخصات متغیرهای  $M_R$  و  $SN_{eff}$  برای هر دسته از وسایل نقلیه ارائه شده است.

## ۴-۲- بهینه‌یابی ضخامت روکش موردنیاز

با استفاده از نتایج آزمایش  $FWD$  و  $GPR$  مقدار مدول الاستیسیته و  $SN_{eff}$  محاسبه گردید به کمک این پارامتر وضعیت خرابی و مقاومت حالت موجود این محور سنجیده شد. در این تحقیق برای تعمیر و افزایش مقاومت روسازی از روکش آسفالتی استفاده گردید. با توجه به متوسط ترافیک روزانه و نرخ رشد سالیانه ترافیک که از داده‌های تردد شمار مرکز مدیریت راه ایران برای این مسیر به دست آمده، مقدار ترافیک برای ۴ سال بعد پیش‌بینی شد. ابتدا فرض شد مقدار روکش مشخصی در مسیر اجرا گردیده، سپس با توجه به فهرست‌بهای رشته راه و نظر کارشناسان، هزینه اجرای این مقدار روکش برای هر مترمربع محاسبه گردید که همان هزینه اولیه ( $C_1$ ) می‌باشد. با توجه به ترافیک پیش‌بینی شده برای ۴ سال بعد ( $W_{18}$ ) و مقدار باری که روسازی بعد از اجرا روکش می‌تواند تحمل کند ( $W_{F18}$ )، احتمال شکست روسازی ( $P_f$ ) مشخص گردیده و با استفاده از رابطه (۵) هزینه از دست رفته ( $C_2$ ) محاسبه شد. با جمع هزینه‌های اولیه و از دست رفته مقدار هزینه کل به ازای ضخامت روکش اجرا شده به دست می‌آید. در ادامه برای ضخامت‌های مختلف روکش این کار تکرار شد تا مقدار روکش بهینه تعیین شود. در شکل ۲ نتایج این روند برای قطعه سوم محور قم-سلفچگان آورده شده است.

به کمک داده‌های تردد شمار مرکز مدیریت راه‌های کشور ایران، متوسط ترافیک روزانه و نرخ رشد سالیانه ترافیک محاسبه شد. داده‌های این مرکز وسایل نقلیه را به پنج دسته تقسیم کرده که در بخش ۴-۲ تشریح گردید. برای هر کدام از دسته‌ها تعداد وسایل نقلیه عبوری روزانه در یک سال جمع‌آوری شده است. نرخ رشد سالیانه ترافیک ( $r$ ) به‌صورت روزانه به کمک اطلاعات ترافیکی سال قبل برای هر دسته از وسایل نقلیه محاسبه شد. به کمک آزمون اندرسون-دارلینگ در نرم‌افزار Minitab بهترین توزیع احتمال متغیرها با سطح اطمینان ۹۵ درصد تشخیص داده شد. در جدول نتایج آزمون اندرسون-دارلینگ و مشخصات متغیرهای  $ADT$  و  $r$  برای هر دسته از وسایل نقلیه ذکر شده است.

با انجام آزمایش  $GPR$  ضخامت لایه‌های روسازی تعیین گشته سپس با استفاده از نتایج آزمایش  $FWD$  و نرم‌افزار  $ELMOD$  مدول الاستیسیته هر لایه محاسبه شد. برای نشان دادن وضعیت خرابی و مقاومت حال حاضر روسازی از پارامتر  $SN_{eff}$  استفاده گردید. در میان روابط متعددی که برای محاسبه این متغیر استفاده شده روش  $Rohde$  در تحقیقات پیشین به‌عنوان روش مناسبی برای محاسبه این متغیر توصیه گردیده است (Crook, Matini, Montgomery and Guthrie, 2012) (Zhang et Tabatabaee and Abbasghorbani, 2018) (al., 2003). در این تحقیق به کمک نتایج آزمایش  $FWD$  و روش  $Rohde$  مقدار  $SN_{eff}$  محاسبه شد (Rohde, 1994). روسازی به کمک روش  $CDA^1$  به ۴ قطعه یکنواخت تقسیم گردید (Misra and Das, 2003). در جدول نتایج آزمون

جدول ۲. مشخصات متغیرهای ADT و r

پارامترها	میانگین	انحراف معیار	توزیع احتمال	آماره آزمون اندرسون-دارلینگ	احتمال پذیرفتن فرضیه (p-value)
<b>متوسط ترافیک روزانه (ADT)</b>					
دسته اول سواری و وانت (v <sub>1</sub> )	۱۴۲۴۸	۴۵۳۷	گامبل	۰/۶۴	۰/۰۷
دسته دوم کامیونت و مینی بوس (v <sub>2</sub> )	۱۶۴۹	۵۶۹	گامبل	۰/۶	۰/۱۱
دسته سوم کامیون (v <sub>3</sub> )	۵۰۰	۱۳۷	گاما	۰/۳۱	۰/۴۷
دسته چهارم اتوبوس (v <sub>4</sub> )	۱۶۱۹	۲۷۱/۱	لجستیک	۰/۲۹	۰/۵۱
دسته پنجم تریلر (v <sub>5</sub> )	۹۵۰	۲۴۳/۷	لجستیک	۰/۴۶۶	۰/۲۰۶
<b>نرخ رشد سالیانه ترافیک (r)</b>					
دسته اول سواری و وانت (r <sub>1</sub> )	۰/۳	۰/۳۲۵	لجستیک	۰/۶۶	۰/۰۵
دسته دوم کامیونت و مینی بوس (r <sub>2</sub> )	-۰/۳۵۵۲	۰/۳۲۳	گامبل	۰/۳۸	۰/۳۲
دسته سوم کامیون (r <sub>3</sub> )	۰/۰۵۲۷۸	۰/۳۶۹۳	گامبل	۰/۳	۰/۵
دسته چهارم اتوبوس (r <sub>4</sub> )	-۰/۳۸۸۷	۰/۱۹۲	گامبل	۰/۵۶	۰/۱۴
دسته پنجم تریلر (r <sub>5</sub> )	۰/۶۵۷۸	۰/۷۵۳۶	گامبل	۰/۱۴۴	۰/۹۶

جدول ۳. مشخصات متغیرهای SN<sub>eff</sub> و M<sub>R</sub>

پارامترها	میانگین	انحراف معیار	توزیع احتمال	آماره آزمون اندرسون-دارلینگ	احتمال پذیرفتن فرضیه (p-value)
<b>عدد سازه‌ای مؤثر روسازی (SN<sub>eff</sub>)</b>					
قطعه ۱ (۰ تا ۶/۲ کیلومتر)	۶/۱۶۹	۱/۱۰۳	گامبل	۰/۲۱	۰/۷۵
قطعه ۲ (۶/۴ تا ۱۹/۸ کیلومتر)	۳/۷۹۷	۰/۸۹۴	گامبل	۰/۵	۰/۱۸
قطعه ۳ (۲۰ تا ۲۳/۸ کیلومتر)	۴/۳۰۳	۰/۸۱۶	لاگ نرمال	۰/۳	۰/۵۳
قطعه ۴ (۲۴ تا ۳۵/۸ کیلومتر)	۳/۱۶۵	۰/۶۱۹۴	گامبل	۰/۴۲	۰/۲۸
<b>ضریب برجهنگی خاک بستر (M<sub>R</sub>)</b>					
قطعه ۱ (۰ تا ۶/۲ کیلومتر)	۲۳۰۷	۱۳۶۰	لاگ نرمال	۰/۶	۰/۱۱
قطعه ۲ (۶/۴ تا ۱۹/۸ کیلومتر)	۱۲۴۰/۷	۴۶۳/۳	لاگ نرمال	۰/۵۸	۰/۱۲
قطعه ۳ (۲۰ تا ۲۳/۸ کیلومتر)	۱۷۶۵	۶۹۸/۲۸	لاگ نرمال	۰/۴۴	۰/۲۵۷
قطعه ۴ (۲۴ تا ۳۵/۸ کیلومتر)	۱۶۵۲	۱۰۰۱	لاگ نرمال	۰/۴۱۵	۰/۲۹

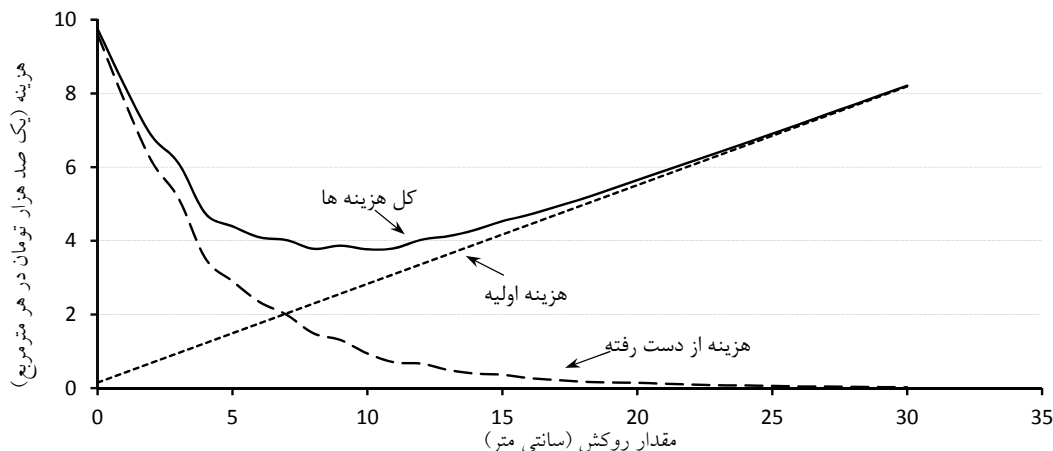
مطابق شکل ۲ برای حالتی که ضخامت روکش کم بوده هزینه از دست رفته تأثیر زیادی بر هزینه کلی گذاشته و هزینه زیادی صرف تعمیر روسازی در آینده می‌شود. این در حالی است که اگر در شکل ۳ هزینه کلی به ازای ضخامت‌های مختلف روکش برای قطعات محور قم-سلفچگان رسم شده است. در قطعه ۱ با افزایش ضخامت روکش هزینه کلی افزایش پیدا می‌کند. در این حالت ضخامت بهینه روکش صفر بوده زیرا روسازی مقاومت اولیه خوبی داشته و نیازی به تعمیر ندارد. ضخامت بهینه در قطعه ۴ از

ضخامت روکش زیاد باشد هزینه اولیه افزایش چشمگیری داشته و موجب افزایش هزینه کلی می‌گردد. در ضخامت روکش بهینه، هزینه کلی به کمترین مقدار خود می‌رسد. بقیه قطعات بیشتر بوده و بیشترین خرابی را نسبت به بقیه قطعات دارد. با انجام این روند، می‌توان مقدار ضخامت روکش بهینه برای تعمیر روسازی را محاسبه کرد. مقدار هزینه‌ها به ازای ضخامت روکش بهینه در

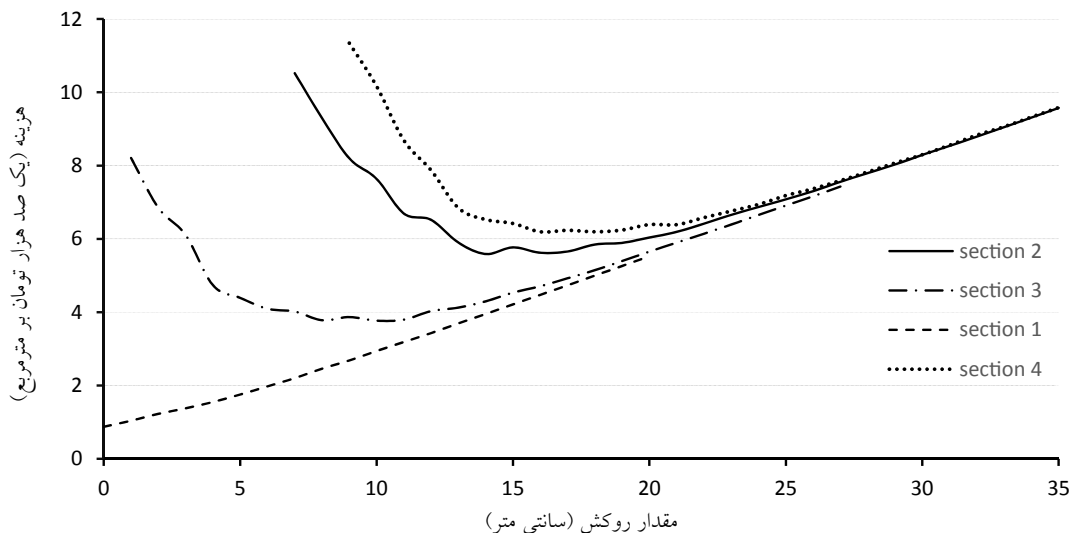


بعدی تعمیر و نگهداری روسازی در آینده را با در نظرگیری نرخ تورم تعیین کرد. محاسبه این هزینه‌ها به تصمیم گیران این امکان را داده که برای تخصیص بودجه راه‌ها برنامه‌ریزی کنند و همچنین امکان پیش‌بینی مقدار تقریبی بودجه موردنیاز برای تعمیر قطعات مسیره‌های مختلف وجود خواهد داشت.

جدول آورده شده است. در این روش با در نظرگیری عدم قطعیت و تغییرپذیری متغیرها می‌توان هزینه بهینه اجرای روکش در وضعیت موجود را محاسبه و بودجه مورد نیاز برای تعمیر راه‌ها را تخمین زد. همچنین با توجه به ضخامت روکشی که در حال حاضر اجرا گردیده می‌توان هزینه‌ها را برای دوره بعدی تعمیر روسازی به صورت تقریبی پیش‌بینی کرد و حدود بودجه موردنیاز برای دوره



شکل ۲. هزینه‌ها نسبت به ضخامت روکش در قطعه سوم



شکل ۳. نمودار هزینه کلی نسبت به ضخامت روکش

ضخامت روکش را بر اساس هزینه‌های تعمیر روسازی بهینه یابی می‌کند. مقدار سطح اطمینان در ضخامت روکش بهینه به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو در زبان برنامه‌نویسی R محاسبه شد و نتایج

مقایسه نتایج بهینه یابی با روش قابلیت اعتماد طراحی روسازی در روش قابلیت اعتماد بر مبنای احتمال شکست است. در این حالت ضخامت روکش به گونه‌ای طراحی شده تا سطح اطمینان روسازی از مقادیری که توسط آیین‌نامه‌ها پیشنهاد گردیده کمتر نشود. روشی که در این تحقیق پیشنهاد گردید مقدار

(and Yekrangnia, 2022) همان‌طور که ملاحظه می‌گردد ضخامت روکش موردنیاز در روش قابلیت اعتماد کمتر از روش پیشنهادی می‌باشد. هزینه اولیه، از دست رفته و کلی برای نتایج روش قابلیت اعتماد محاسبه و در جدول ارائه شد. هزینه اولیه برای تمامی قطعات در روش قابلیت اعتماد کمتر از روش پیشنهادی است. در هزینه از دست رفته و کلی، روش پیشنهادی هزینه کمتری را نسبت به روش قابلیت اعتماد دارد. اختلاف هزینه‌های اولیه و کلی در روش قابلیت اعتماد با روش پیشنهادی محاسبه و در شکل ۴ آورده شده است.

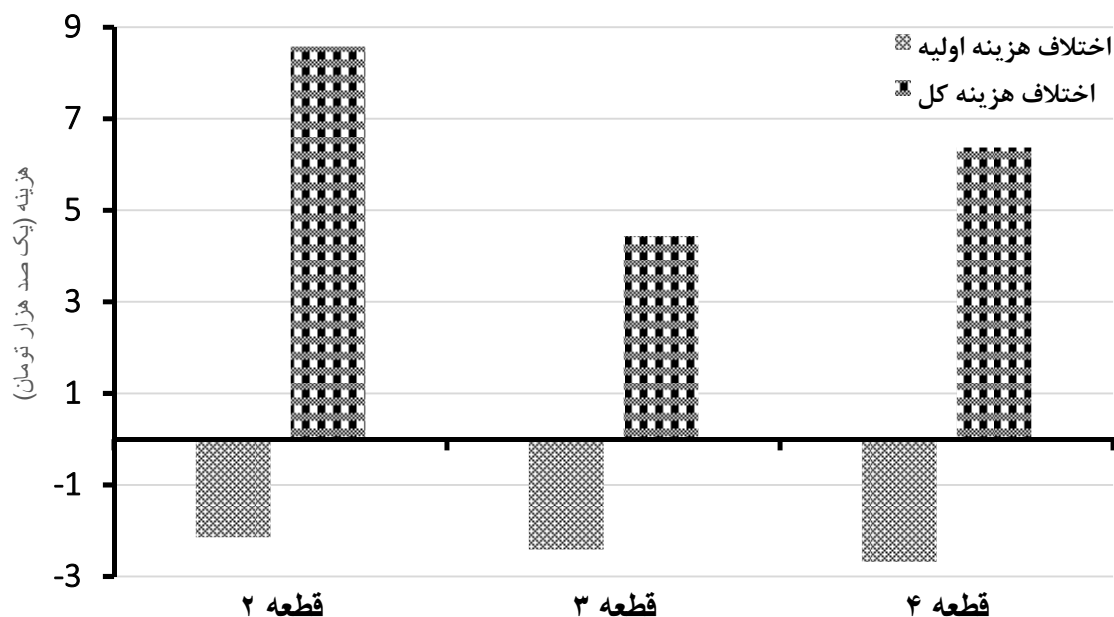
آن در جدول ارائه شده است. مطابق جدول سطح اطمینان برای تمامی قطعات حدود ۹۹ درصد است. مقدار ضخامت روکش با استفاده از روش قابلیت اعتماد نیز محاسبه و با نتایج این تحقیق مقایسه گردید. سطح اطمینان در نشریه ۲۳۴ برای آزادراه و بزرگراه ۸۰ تا ۹۵ توصیه شده است (Management and Planning Organization of Iran, 1390). مقدار سطح اطمینان برای بزرگراه قم-سلفچگان ۸۷/۵ درصد در نظر گرفته شده که در وسط بازه توصیه شده آیین‌نامه است. مقدار ضخامت روکش با استفاده از روش قابلیت اعتماد محاسبه و نتایج آن در جدول آورده شده است (Ghodratbadi

جدول ۴. نتایج بهینه یابی ضخامت روکش قطعات محور قم-سلفچگان

قطعات	ضخامت روکش بهینه (سانتی‌متر)	هزینه اولیه (تومان بر مترمربع)	هزینه از دست رفته (تومان بر مترمربع)	کل هزینه (تومان بر مترمربع)
قطعه ۱	۰	۰	۷۲۴۱۱	۷۲۴۱۱
قطعه ۲	۱۴	۳۹۰۲۰۰	۱۶۸۴۲۵	۵۵۸۶۲۵
قطعه ۳	۱۰	۲۸۳۰۰۰	۹۳۸۷۱	۳۷۶۸۷۱
قطعه ۴	۱۸	۴۹۷۴۰۰	۱۲۲۰۱۱	۶۱۹۴۱۱

جدول ۵. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش قابلیت اعتماد

قطعات	روش پیشنهادی		روش قابلیت اعتماد		
	ضخامت روکش بهینه (سانتی‌متر)	سطح اطمینان	ضخامت روکش (سانتی‌متر)	هزینه اولیه (تومان بر مترمربع)	هزینه از دست رفته (تومان بر مترمربع)
قطعه ۱	۰	۹۹	۰	-	-
قطعه ۲	۱۴	۹۹	۶	۱۷۵۸۰۰	۱۲۴۰۲۴۵
قطعه ۳	۱۰	۹۹	۱	۴۱۸۰۰	۷۷۸۹۵۸
قطعه ۴	۱۸	۹۹	۸	۲۲۹۴۰۰	۱۰۲۷۲۷۱



شکل ۴. مقایسه هزینه‌ها در روش پیشنهادی و قابلیت اعتماد

#### اولویت‌بندی در تعمیر روسازی

قطعات روسازی بر اساس شاخص  $\frac{\partial \beta}{\partial C}$  اولویت‌بندی شدند. مقدار  $\frac{\partial \beta}{\partial C}$  برای هر قطعه روسازی به وسیله نرم‌افزار RtX محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۶ ارائه گردیده است. هرچه مقدار  $\frac{\partial \beta}{\partial C}$  بیشتر باشد قطعه اولویت بیشتری جهت تعمیر و نگهداری دارد. عوامل مختلفی مانند ضریب برجهندگی خاک بستر، طول قطعه راه، مقاومت و وضعیت خرابی حال حاضر روسازی می‌توانند در محاسبه  $\frac{\partial \beta}{\partial C}$  و اولویت‌بندی قطعات تأثیرگذار باشند با توجه به نتایج به دست آمده قطعه دوم بیشترین و قطعه اول کمترین اولویت را جهت تعمیر و نگهداری دارند که این امر با توجه به وضعیت خرابی و مقاومت اولیه روسازی منطقی به نظر می‌رسد.

جدول ۶. اولویت‌بندی قطعات روسازی

قطعات	ضخامت روکش بهینه (سانتی‌متر)	طول قطعه (کیلومتر)	$\frac{\partial \beta}{\partial C}$
قطعہ ۲	۱۴	۱۳	۷/۶۶E-۰۸
قطعہ ۴	۱۸	۱۱/۸	۲/۹۶E-۰۹
قطعہ ۳	۱۰	۳/۸	۵/۵۸E-۱۰
قطعہ ۱	۰	۶/۲	۴/۷E-۱۰

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود اختلاف هزینه کلی در دو روش بیشتر از هزینه اولیه است. در روش پیشنهادی ضخامت روکش در سطح اطمینان بالاتری طراحی شده و در نتیجه هزینه اولیه بیشتری از روش قابلیت اعتماد دارد. ولی به دلیل مقاومت بیشتری که روسازی در روش پیشنهادی داشته آسیب کمتری دیده و هزینه آن در دوره بعدی تعمیر کمتر از روش قابلیت اعتماد است. این ضخامت روکش بیشتر در روش پیشنهادی موجب شده که مجموع هزینه اولیه و از دست رفته تعمیر روسازی در مقایسه با روش قابلیت اعتماد کمتر شود. این نتیجه نشان می‌دهد که طراحی بر مبنای روش پیشنهادی شاید در ابتدا هزینه بیشتری داشته ولی برای مجموع هزینه‌ها اقتصادی‌تر از روش قابلیت اعتماد بوده و موجب کاهش هزینه کلی تعمیر روسازی می‌شود.

## ۵- نتیجه گیری

اعتماد کمتر از روش پیشنهادی بوده در نتیجه هزینه اولیه تعمیر روسازی نیز کمتر می‌شود؛ ولی هزینه‌های دوره بعدی تعمیر در روش قابلیت اعتماد بیشتر از روش پیشنهادی است. این امر نشان می‌دهد که در روش پیشنهادی هزینه‌ها و میزان تعمیر اولیه بیشتر از روش قابلیت اعتماد بوده ولی روسازی به دلیل مقاومت بیشتر آسیب کمتری در آینده دیده و هزینه‌های آن برای دوره بعدی تعمیر کاهش پیدا می‌کند. اختلاف هزینه کلی در دو روش به مراتب بیشتر از اختلاف هزینه اولیه آن‌ها می‌باشد و موجب کاهش بودجه تعمیر روسازی در روش پیشنهادی شده که از نظر اقتصادی این روش به‌صرفه‌تر از روش قابلیت اعتماد است.

-قطعاً روسازی با در نظر گرفتن تغییرپذیری در متغیرها و تحلیل ریسک اولویت‌بندی شدند. این اولویت‌بندی بر این اساس بوده که به ازای هر تومان هزینه برای تعمیر قطعات روسازی کدام یک تأثیری بیشتری بر ریسک داشته و احتمال شکست کل مسیر را کاهش بیشتری می‌دهند.

برای اعتبار سنجی جزئیات روش پیشنهادی نیاز است این روش در حداقل یکی از راه‌های کشور اجرا و هزینه‌های حال حاضر تعمیر محاسبه گردد. سپس بعد از گذشت چند سال و برای دوره بعدی تعمیر، حجم و هزینه‌های مورد نیاز محاسبه و با تخمین صورت گرفته بر اساس روش پیشنهادی مقایسه شود. لازم به ذکر است استفاده از داده موجود تعمیر روسازی نیز نمی‌تواند برای اعتبار سنجی مناسب باشد، زیرا در این داده‌ها تعمیر و نگهداری بر اساس روش آیین‌نامه طراحی روسازی انجام شده است. در صورتی که در این مطالعه اشاره گردید که رویکرد روش پیشنهادی با روش مندرج در آیین‌نامه متفاوت بوده و در نتیجه این دو روش منجر به نتایج متفاوتی نیز خواهند شد.

در این مطالعه ابتدا هزینه‌های دوره بعدی تعمیر روسازی در آینده با توجه به میزان تعمیر آن در حال حاضر تخمین زده شد. سپس مقدار این دو هزینه جمع و هزینه کلی محاسبه گردید. مقدار تعمیر بهینه روسازی در کمترین هزینه کلی رخ می‌دهد. قطعات روسازی جهت تعمیر و نگهداری در مقدار تعمیر بهینه خود اولویت‌بندی شدند. مطالعه موردی بر روی محور قم-سلفچگان انجام گرفت. داده‌های وضعیت روسازی و ترافیک در این محور جمع‌آوری و به کمک آزمون اندرسون-دارلینگ مناسب‌ترین توزیع احتمال هر متغیر مشخص شد. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش به شرح زیر است:

-در این تحقیق مقدار تعمیر روسازی تنها با توجه به وضع خرابی و مقاومت حال حاضر آن تعیین نگردیده بلکه تأثیر میزان تعمیر حال حاضر روسازی بر وضعیت و هزینه آن در آینده نیز در نظر گرفته شده است. برای محاسبه هزینه‌های دوره بعد تعمیر روسازی از روش‌های تحلیل ریسک استفاده شده و نرخ تورم نیز در این محاسبات لحاظ شده است.

-در این روش مقدار هزینه‌های حال حاضر و آینده جهت تعمیر و نگهداری روسازی در مقدار تعمیر بهینه محاسبه گردید. در نتیجه می‌توان حدود بودجه مورد نیاز برای دوره بعدی تعمیر و نگهداری روسازی در آینده را با در نظرگیری نرخ تورم پیش‌بینی کرد. محاسبه این هزینه‌ها به تصمیم‌گیران این امکان را می‌دهد که برای تخصیص بودجه راه‌های کشور برنامه‌ریزی کرده و علاوه بر تعیین بودجه تعمیر روسازی با توجه به وضعیت حال حاضر، مقدار آن را برای دوره بعدی تعمیر نیز پیش‌بینی کنند.

-مقدار روکش موردنیاز به‌وسیله روش‌های قابلیت اعتماد تعیین و با نتایج روش پیشنهادی مقایسه شد. این مقدار در روش قابلیت

## ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Life cycle cost analysis
2. Analytical hierarchy process
3. Artificial Neural Network
4. Geographic Information Systems
5. First Order Reliability Method
6. Average daily traffic
7. Falling Weight Deflectometer
8. Ground Penetrating Radar
9. Effective Structural Number
10. Cumulative Difference Approach

## ۷- مراجع

Pavement Engineering, 10(2), 158-170. doi: 10.1016/j.ijprt.2017.01.001.  
-Chootinan, P., Chen, A., Horrocks, M.R. and Bolling, D. (2006). A multi-year pavement maintenance program using a stochastic

-Ahmed, S., Vedagiri, P. and Krishna Rao, K. V. (2017). Prioritization of pavement maintenance sections using objective based Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Pavement Research and Technology*. Chinese Society of

- Probabilistic Framework for Evaluating Community Resilience: Integration of Risk Models and Agent-Based Simulation. *Journal of Structural Engineering*, 146(11), 04020250. doi: **10.1061/(asce)st.1943-541x.0002810**.
- Pantha, B. R., Yatabe, R. and Bhandary, N. P. (2010). GIS-based highway maintenance prioritization model: an integrated approach for highway maintenance in Nepal mountains. *Journal of Transport Geography*. Elsevier Ltd, 18(3), 426–433. doi: **10.1016/j.jtrangeo.2009.06.016**.
- Rajbongshi, P. and Das, A. (2008). Optimal Asphalt Pavement Design Considering Cost and Reliability. 255–261.
- Reigle, J. A. and Zaniewski, J. P. (1816). Risk-Based Life-Cycle Cost Analysis for Project-Level Pavement Management. (02), 34–42.
- Rohde, G. T. (1994). Determining pavement structural number from FWD testing. *Transportation Research Record*, (1448).
- Salem, O., AbouRizk, S. and Ariaratnam, S. (2003). Risk-based Life-cycle Costing of Infrastructure Rehabilitation and Construction Alternatives. *Journal of Infrastructure Systems*, 9(1), 6–15. doi: **10.1061/(asce)1076-0342(2003)9:1(6)**.
- Sanchez-Silva, M. Arroyo, O. Junca, M., Caro, S. and Caicedo, B. (2005). Reliability based design optimization of asphalt pavements. (January 2016). doi: **10.1080/10298430500445506**.
- Siswanto, H., Supriyanto, B., Pranoto, Prihatditya, R.P. and Friansa, M.A. (2019). District road maintenance priority using analytical hierarchy process, *AIP Conference Proceedings*, 2114(December). doi: **10.1063/1.5112490**.
- Wu, D., Yuan, C. and Liu, H. (2017). A risk-based optimisation for pavement preventative maintenance with probabilistic LCCA : a Chinese case. *International Journal of Pavement Engineering*. Taylor & Francis, 18(1), 11–25. doi: **10.1080/10298436.2015.1030743**.
- Zhang, Z., Claros, G., Manuel, L. and Damnjanovic, I., (2003). Evaluation of the Pavement Structural Condition at Network Level using Falling Weight Deflectometer (FWD) Data', *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 1–26.
- Management and Planning Organization (1390). Publication 234: flexible Pavement Regulations of Iranian Roads' (in Persian).
- Ghodratbadi, M. and Yekrangnia, M. (2022). Reliability analysis of designing overlay thickness according to Iran highway asphalt pavement code. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, under review. (in Persian).
- simulation-based genetic algorithm approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(9), 725–743. doi: **10.1016/j.tra.2005.12.003**.
- Crook, A. L., Montgomery, S. R. and Guthrie, W. S. (2012). Use of falling weight deflectometer data for network-level flexible pavement management. *Transportation Research Record*, 2304, 75–85. doi: **10.3141/2304-09**.
- Deshpande, V. P., Damnjanovic, I. D. and Gardoni, P. (2010). Reliability-Based Optimization Models for Scheduling Pavement Rehabilitation. 25, 227–237. doi: **10.1111/j.1467-8667.2009.00636.x**.
- Han Z, Porrás-Alvarado JD, Stone C, Zhang Z. (2018). Transportmetrica A: Transport Science Incorporating uncertainties into determination of flexible pavement preventive maintenance interval. *Transportmetrica A: Transport Science*. Taylor & Francis, 0(0), 1–21. doi: **10.1080/23249935.2018.1433730**.
- Janani, L., Dixit, R.K., Sunitha, V. and Mathew, S. (2020) 'Prioritisation of pavement maintenance sections deploying functional characteristics of pavements', *International Journal of Pavement Engineering*. Taylor & Francis, 21(14). 1815–1822. doi: **10.1080/10298436.2019.1567923**.
- Mahsuli, M. (2012) 'Probabilistic models, methods, and software for evaluating risk to civil infrastructure. -Mahsuli, M. and Haukaas, T. (2013a). Computer Program for Multimodel Reliability and Optimization Analysis', *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(1), 87–98. doi: **10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000204**.
- Mahsuli, M. and Haukaas, T. (2013b). Sensitivity measures for optimal mitigation of risk and reduction of model uncertainty', *Reliability Engineering and System Safety*. Elsevier, 117, 9–20. doi: **10.1016/j.ress.2013.03.011**.
- Matini, N., Tabatabaee, N. and Abbasghorbani, M. (2018) 'Protocol for FWD Data Collection at Network-Level Pavement Management in Iran', *Transportation Research Record*, 2672(40), 68–77. doi: **10.1177/0361198118758392**.
- Menendez, J. R. and Gharaibeh, N. G. (2017). Incorporating Risk and Uncertainty into Infrastructure Asset Management Plans for Pavement Networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 23(4), 04017019. doi: **10.1061/(asce)is.1943-555x.0000379**.
- Misra, R. and Das, A. (2003). Identification of homogeneous sections from road data. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(4), 229–233. doi: **10.1080/10298430410001672237**.
- Nasrazadani, H. and Mahsuli, M. (2020).

## A Risk-Based Prioritization and Optimization of Pavement Overlay Thickness

*Mehdi Ghodratabadi, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department, Sharif University  
of Technology, Tehran, Iran.*

*Mohammad Yekrangnia, Associate Professor, Civil Engineering Department, Shahid Rajaee  
Teacher Training University, Tehran, Iran.*

*E-mail: yekrangnia@sru.ac.ir*

Received: September 2003 Accepted: January 2024

### ABSTRACT

In the reliability method, design is done based on the level of reliability proposed in the regulations. Design is done according to the current condition of the pavement and the amount of repair in subsequent periods doesn't attention to these methods. A method for repairing the pavement is proposed in this study, which in addition to the current situation, consequences of its failure and reconstruction attention. Risk analysis methods were used due to consider these consequences and the costs of the next period of repair in the future were estimated according to the amount of current pavement repair and the inflation rate. The total cost of pavement repair is equal to the sum of current and future costs. The amount of repair at the lowest total cost is obtained by optimizing, which is equal to the amount of optimal pavement repair. To compare the two methods, traffic data and pavement condition of the Qom-Salafchegan route were collected and the most appropriate probability distribution of variables was determined by the Anderson-Darling test. The pavement was designed with a higher level of reliability in the proposed method according to the results. Also, the total cost of pavement repair in the proposed method is less than the reliability method, thus it is more economical and decreases costs. Then, pavement sections were prioritized using risk analysis methods and considering variability in variables. The present study prioritizes the pavement section according to the amount of reduction in the probability of failure and the risk of the whole route per Toman spent on repair. The results of this method allow decision-makers to predict current and future costs of repairs and to plan more accurately for the maintenance and repair budget.

**Keywords:** Prioritize, Optimization, Repair and Maintenance of Flexible Pavement, Risk Analysis, Reliability Method